

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL: INGENIERÍA CIVIL



Tesis

**Análisis de las propiedades físico – mecánicas de la mezcla asfáltica
modificada con polímero etileno vinil acetato (EVA), en pavimento flexible,
Abancay, Apurímac, 2023**

Asesor:

Dra. Vera Tevés, Rosa Marina

Autor:

Vivanco Jiménez Nilzon

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Civil

Abancay – Apurímac - Perú

2026



Universidad Tecnológica de los Andes

Transformando vidas

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

Acta N°: 018

En la ciudad de Abancay, a los **veintinueve días** del mes de **mayo del 2026**, siendo las **11:00 am** horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° **0338-2026- EPIC-FI-UTEA-SA** de fecha **25 de mayo del 2026**, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería:

| | |
|----------------|--|
| Presidente : | Mag. Américo ROLDAN JUÁREZ |
| Dictaminante : | Mag. Horacio Fernando Antonio Hassan CORNEJO ROSALES |
| Replicante : | Mag. Ángel MALDONADO MENDIVIL |

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

Tesis Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

"Análisis de las propiedades físico-mecánicas de la mezcla asfáltica modificada con polímero etileno vinil acetato (EVA) en pavimento flexible, Abancay, Apurímac, 2023".

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br: VIVANCO JIMÉNEZ, Nilzon

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) APROBADO (S):

Por: Unanimidad
(Unanimidad o Mayoría) (*)

Emitiéndose el calificativo final de:

| Bachiller (Apellidos y Nombres) | Calificación (**) |
|---------------------------------|-------------------|
| VIVANCO JIMÉNEZ, Nilzon | Aprobado |

Siendo las **12:00 pm** horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Mag. Américo ROLDAN JUÁREZ

(.....)

Dictaminante: Mag. Horacio Fernando Antonio Hassan CORNEJO ROSALES

(.....)

Replicante: Mag. Ángel MALDONADO MENDIVIL

(.....)

Abancay 02 de junio del 2026

Se expide, la presente conforme al Libro de Actas de Sustentación de Títulos, consignado en los folios N° 016

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
Ciudad Universitaria Av. Perú N° 700, Abancay, Central Telefónica 051 (083) 32155930
Filial Cusco, Av. Grau N° 516, Teléfono (084) 251565
Filial Andahuayles, Av. Juan Antonio Trolles N° 513 Teléfono (083) 421752
www.utea.edu.pe

(*) Mayoría: Dos integrantes del jurado aprueban o desaprueban; Unanimidad: Todos los integrantes del jurado aprueban o desaprueban; Art. 18 RGGAT.
(**) 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.




18% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el Informe

- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 18%  Fuentes de Internet
- 4%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de Integridad

N.º de alertas de Integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Metadatos

| Datos del autor | |
|--|---|
| Apellidos y Nombres | : Vivanco Jimenez Nilzon |
| Tipo de documento de identidad | : DNI |
| Numero de documento de identidad | : 46188614 |
| URL ORCID (opcional) | : https://orcid.org/0009-0006-7008-984X |
| Datos del asesor | |
| Apellidos y Nombres | : Vera Teves, Rosa Marina |
| Tipo de documento de identidad | : DNI |
| Numero de documento de identidad | : 45400628 |
| URL ORCID (opcional) | : https://orcid.org/0000-0001-6401-416X |
| Datos de la Investigación | |
| Facultad | : Ingeniería |
| Escuela Profesional | : Ingeniería Civil |
| Línea de Investigación | : Gestión de la infraestructura para el desarrollo sostenible. |
| Rango de años en que se realizó la investigación | : 2023-2025 |
| Fuente de financiamiento | : Autofinanciado |
| Porcentaje de similitud | : 18 % |
| URL de OCDE | : https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01 |

Dedicatoria

Dedico de forma muy especial a Dios y a mi padre Daniel Vivanco Aroste, quien desde el firmamento me ilumina y me motiva para avanzar y realizar mis anhelos. Aunque ya no estés físicamente a mi lado, tu espíritu vive en cada instante, sé que en este momento hubiera sido tan especial para ti como lo es para mí, a mi madre Florentina Jiménez Fernández, a mis hermanos, tías y abuelos, quienes han inspirado en mi la vocación de superación y su apoyo incondicional para lograr este paso en mi formación profesional.

Nilzon Vivanco Jimenez

Agradecimiento

Elevo mi gratitud a Dios por su permanente acompañamiento a lo largo de mi existencia, por brindarme la oportunidad de culminar con plena salud esta fase de mi desarrollo profesional, a mi progenitor Daniel Vivanco Aroste Q.E.P.D., a mi madre Florentina Jiménez Fernández, a mis hermanos, tías y abuelos, quienes me impulsaron y confiaron en mí durante la elaboración de esta tesis.

A la Universidad Tecnológica de los Andes, en particular a la facultad de Ingeniería Civil y a su equipo docente, quienes han enriquecido mi carrera con sus saberes y vivencias.

Durante la elaboración de mi tesis, agradezco a la Dra. Rosa Marina Vera Teves por su respaldo, comprensión y disposición para colaborar conmigo.

Nilzon Vivanco Jimenez

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo principal evaluar el comportamiento de las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente mediante la incorporación del polímero Etileno Vinil Acetato (EVA) en pavimentos flexibles. La metodología, tiene un enfoque cuantitativo, tipo de investigación aplicada, nivel explicativo y un diseño experimental. La técnica implicó la creación de 55 briquetas de asfalto en caliente, compuestas por cinco índices de cemento asfáltico PEN60/70: 4.5%, 5%, 5.5%, 6.0% y 6.5%, y un porcentaje de polímero EVA del 2%, 3%, 4%, y 5%, en proporción al peso del ligante asfáltico. Dichas briquetas fueron sometidas a pruebas de laboratorio con el fin de evaluar su comportamiento físico-mecánico. Los resultados alcanzados evidencian mejoras relevantes en las propiedades de la mezcla asfáltica, permitiendo concluir que la adición del 3% de polímero EVA a una mezcla tradicional mejoró su estabilidad en un 7.23%, disminuyó el flujo en un 2.64%, y disminuyó la proporción de vacíos en un 13.64%, además de aumentar su resistencia a la tracción indirecta en un 42.14%. Asimismo, incorporar mezclas asfálticas enriquecidas con el polímero EVA potenciaría la longevidad de los pavimentos asfálticos, disminuyendo así los gastos de mantenimiento y prolongando su durabilidad.

Palabras claves: Pavimento Flexible, Mezcla Asfáltica en Caliente, Polímero EVA (Etileno – Acetato de Vinilo), Cemento Asfáltico, Metodología Marshall.

Abstract

The main objective of this research is to evaluate the physical and mechanical properties of hot mix asphalt by incorporating the polymer Ethylene Vinyl Acetate (EVA) into flexible pavements. The methodology employs a quantitative approach, is applied research, has an explanatory level, and uses an experimental design. The technique involved creating 55 hot mix asphalt briquettes, composed of five percentages of PEN60/70 asphalt cement: 4.5%, 5%, 5.5%, 6.0%, and 6.5%, and EVA polymer percentages of 2%, 3%, 4%, and 5%, in proportion to the weight of the asphalt binder. These briquettes were subjected to laboratory tests to evaluate their physical and mechanical behavior. The results obtained demonstrate significant improvements in the properties of the asphalt mixture, allowing us to conclude that the addition of 3% EVA polymer to a traditional mixture improved its stability by 7.23%, decreased flow by 2.64%, and reduced the void ratio by 13.64%, in addition to increasing its indirect tensile strength by 42.14%. Furthermore, incorporating asphalt mixtures enriched with EVA polymer would enhance the longevity of asphalt pavements, thereby reducing maintenance costs and extending their durability.

Keywords: Flexible Pavement, Hot Mix Asphalt, EVA Polymer (Ethylene – Vinyl Acetate), Asphalt Cement, Marshall Methodology.

Índice general

| | |
|--|-------------|
| Acta de sustentación | ii |
| Reporte de similitud | iii |
| Metadatos | iv |
| Dedicatoria | v |
| Agradecimiento | vi |
| Resumen | vii |
| Abstract | viii |
| Índice general | ix |
| Índice de tablas | xi |
| Índice de figuras | xiii |
| Índice de anexos | xv |
| I. Introducción | 16 |
| II. Planteamiento del problema | 18 |
| 2.1. Descripción y formulación del problema..... | 18 |
| 2.2. Objetivos | 20 |
| 2.2.1. Objetivo general | 20 |
| 2.2.2. Objetivos específicos | 21 |
| 2.3. Justificación e importancia | 21 |
| 2.4. Hipótesis | 22 |
| 2.5. Variables | 24 |
| III. Marco teórico | 25 |
| 3.1. Antecedentes | 25 |
| 3.2. Bases teóricas | 31 |
| 3.2.1. Pavimento flexible | 31 |
| 3.2.2. Mezclas asfálticas..... | 35 |
| 3.2.3. Polímeros..... | 49 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 3.2.4. | Diseño de mezclas asfálticas en caliente..... | 51 |
| 3.3. | Definición de términos..... | 67 |
| IV. | Metodología | 70 |
| 4.1. | Tipo y nivel de investigación..... | 70 |
| 4.2. | Ámbito temporal y espacial | 70 |
| 4.3. | Población y muestra..... | 70 |
| 4.4. | Instrumentos | 72 |
| 4.5. | Procedimientos | 72 |
| 4.6. | Análisis de datos | 74 |
| 4.6.1. | Prueba de Hipótesis..... | 75 |
| 4.7. | Consideraciones éticas | 85 |
| V. | Resultados y discusión..... | 86 |
| 5.1. | Resultados | 86 |
| 5.1.1. | Resultados de las propiedades físico-mecánicas de la MAC..... | 86 |
| 5.1.2. | Resultados del objetivo específico 1 | 101 |
| 5.1.3. | Resultados del objetivo específico 2 | 102 |
| 5.1.4. | Resultados del objetivo específico 3 | 103 |
| 5.1.5. | Resultados del objetivo específico 4 | 103 |
| 5.2. | Discusión de resultados | 106 |
| VI. | Conclusiones | 110 |
| VII. | Recomendaciones | 112 |
| VIII. | Referencias | 113 |
| IX. | Anexos | 118 |

Índice de tablas

| | | |
|-----------------|---|----|
| Tabla 1 | Operacionalización de Variables..... | 24 |
| Tabla 2 | Factores causales y consecuencias de la inestabilidad del pavimento | 54 |
| Tabla 3 | Poca durabilidad..... | 55 |
| Tabla 4 | Factores que generan alta permeabilidad en mezclas asfálticas | 56 |
| Tabla 5 | Mala trabajabilidad..... | 57 |
| Tabla 6 | Bajo comportamiento a la fatiga..... | 58 |
| Tabla 7 | Factores que reducen la resistencia al deslizamiento | 58 |
| Tabla 8 | Requisitos para agregados gruesos según altitud | 59 |
| Tabla 9 | Requisitos para agregados finos según altitud..... | 60 |
| Tabla 10 | Especificación granulométrica MAC-02 | 61 |
| Tabla 11 | Elección de la clase de material del ligante bituminoso | 62 |
| Tabla 12 | Requerimientos del ligante asfáltico por grado de penetración | 62 |
| Tabla 13 | Requerimientos del ligante asfáltico según viscosidad | 63 |
| Tabla 14 | Requerimientos del ligante asfáltico modificado (tipo I, elastómero)..... | 64 |
| Tabla 15 | Requerimiento del filler mineral..... | 65 |
| Tabla 16 | Requisitos de diseño para mezclas de pavimento asfáltico | 65 |
| Tabla 17 | Valor mínimo admisible de vacíos del agregado mineral (VMA) | 67 |
| Tabla 18 | Cantidad de muestras de asfalto convencional y modificado | 71 |
| Tabla 19 | Prueba de normalidad (S-W) HE1 | 75 |
| Tabla 20 | Prueba de homogeneidad de varianzas – HE1 | 76 |
| Tabla 21 | Promedio y Desviación estándar de la estabilidad | 76 |
| Tabla 22 | Prueba de (ANOVA) aplicado a la estabilidad – HE1 | 77 |
| Tabla 23 | Prueba de Tukey para medias de Estabilidad – HE1 | 77 |
| Tabla 24 | Prueba de normalidad (S-W) HE2 | 78 |
| Tabla 25 | Prueba de homogeneidad de varianzas – HE2..... | 78 |
| Tabla 26 | Promedio y Desviación estándar del Flujo | 79 |
| Tabla 27 | Prueba ANOVA del Flujo– HE2 | 79 |

| | | |
|-----------------|---|-----|
| Tabla 28 | Prueba de Tukey para medias del Flujo – HE2..... | 80 |
| Tabla 29 | Prueba de normalidad (S-W) HE3 | 80 |
| Tabla 30 | Prueba de homogeneidad de varianzas – HE3..... | 81 |
| Tabla 31 | Promedio y Desviación estándar del % Vacíos | 81 |
| Tabla 32 | Prueba ANOVA del % de Vacíos – HE3 | 82 |
| Tabla 33 | Prueba de Tukey para medias del % de Vacios – HE3..... | 82 |
| Tabla 34 | Prueba de normalidad (S-W) HE4 | 83 |
| Tabla 35 | Prueba de homogeneidad de varianzas – HE4..... | 83 |
| Tabla 36 | Promedio y Desviación estándar de resistencia a la tracción indirecta | 84 |
| Tabla 37 | Prueba ANOVA a la Tracción Indirecta – HE4 | 84 |
| Tabla 38 | Prueba de Tukey a la Traccion Indirecta – HE4..... | 85 |
| Tabla 39 | Resultados de caracterización de agregado grueso | 86 |
| Tabla 40 | Resultados de caracterización de agregado fino..... | 87 |
| Tabla 41 | Combinación de agregados MAC-2 | 88 |
| Tabla 42 | Parámetros técnicos del ligante asfáltico grado PEN 60–70 | 89 |
| Tabla 43 | Ficha técnicas del polímero EVA | 90 |
| Tabla 44 | Dosificación para mezcla asfáltica tradicional | 91 |
| Tabla 45 | Resultados del Ensayo Marshall - Mezcla asfáltica tradicional..... | 92 |
| Tabla 46 | Contenido optimo del cemento asfaltico | 95 |
| Tabla 47 | Resultados de mezcla asfáltica modificada con polímero EVA | 97 |
| Tabla 48 | Resultados de estabilidad con distintos porcentajes del polímero EVA..... | 101 |
| Tabla 49 | Resultados del flujo con distintos porcentajes del polímero EVA | 102 |
| Tabla 50 | Resultados de % de vacíos con distintos porcentajes del polímero EVA | 103 |
| Tabla 51 | Datos obtenidos del ensayo de compresión diametral | 104 |

Índice de figuras

| | |
|---|-----|
| Figura 1 Sistema de capas del pavimento..... | 33 |
| Figura 2 Comportamiento del asfalto modificado con polímero | 36 |
| Figura 3 Afinidad físico-química entre asfalto y el polímero..... | 37 |
| Figura 4 Porcentaje de polímeros más utilizados para modificar asfaltos..... | 38 |
| Figura 5 Parámetros volumétricos en una probeta compactada..... | 40 |
| Figura 6 Propiedades de los agregados..... | 42 |
| Figura 7 Comportamiento de cemento asfáltico | 43 |
| Figura 8 Ahuellamiento o deformación permanente | 44 |
| Figura 9 Agrietamiento por bajas temperaturas..... | 44 |
| Figura 10 Clasificación de polímeros de uso vial..... | 50 |
| Figura 11 Diagrama - Marshall para mezcla asfáltica tradicional..... | 52 |
| Figura 12 Diagrama - Marshall para mezcla asfáltica modificada..... | 53 |
| Figura 13 Combinación de agregados - MAC 02..... | 89 |
| Figura 14 Gravedad e. Bulk vs Cantidad de ligante asfáltico..... | 92 |
| Figura 15 % vacíos vs Cantidad de ligante asfáltico..... | 93 |
| Figura 16 V.M.A. vs Cantidad de ligante asfáltico | 93 |
| Figura 17 V.F.A. vs Cantidad de ligante asfáltico | 94 |
| Figura 18 Flujo vs Cantidad de ligante asfáltico | 94 |
| Figura 19 Estabilidad vs Cantidad de ligante asfáltico..... | 95 |
| Figura 20 Polímero EVA | 96 |
| Figura 21 Rotura de especímenes ensayo Marshall | 97 |
| Figura 22 Gravedad e. Bulk vs Cantidad de polímero EVA | 98 |
| Figura 23 % de Vacíos vs Cantidad de polímero EVA..... | 98 |
| Figura 24 %V.M.A. vs Cantidad de polímero EVA..... | 99 |
| Figura 25 % V.F.A. vs Cantidad de polímero EVA | 99 |
| Figura 26 Flujo vs Cantidad de polímero EVA..... | 100 |
| Figura 27 Estabilidad vs Cantidad de polímero EVA | 100 |

| | | |
|------------------|---|-----|
| Figura 28 | Resultados de estabilidad con distintos porcentajes del polímero EVA..... | 101 |
| Figura 29 | Resultados del flujo con distintos porcentajes del polímero EVA..... | 102 |
| Figura 30 | Resultados de % de vacíos con distintos porcentajes del polímero EVA..... | 103 |
| Figura 31 | Ensayo de tracción diametral | 105 |
| Figura 32 | Resultados del comportamiento mecánico frente a la carga diametral | 105 |
| Figura 33 | Variación porcentual del ensayo de resistencia a tracción diametral | 106 |

Índice de anexos

| | |
|---|-----|
| Anexo 1 Matriz de consistencia..... | 118 |
| Anexo 2 Operacionalización de variables..... | 119 |
| Anexo 3 Ficha técnica del ligante asfáltico PEN 60/70..... | 120 |
| Anexo 4 Ficha técnica de polímero EVA | 121 |
| Anexo 5 Certificado de calibración de instrumentos de laboratorio | 122 |
| Anexo 6 Resultados de ensayos de laboratorio - Ensayo Marshall | 144 |
| Anexo 7 Resultados de ensayo de laboratorio - Ensayo tracción indirecta..... | 161 |
| Anexo 8 Panel Fotográfico | 162 |

I. Introducción

La implementación de pavimentos asfálticos representa un avance tecnológico significativo y un recurso clave para el desarrollo de países en crecimiento, con las carpetas de rodaduras en buen estado facilitan el transporte de personas y bienes, impulsando el crecimiento económico y la conectividad entre regiones. En Perú, las mezclas bituminosas en caliente, constituidas por agregados pétreos y cemento asfáltico, se calientan a una temperatura ideal que agiliza su mezcla y colocación, permitiendo una apertura casi instantánea del tráfico, resultan ideales para su uso. Por ello, se encuentra crucial explorar cómo el polímero EVA puede potenciar el comportamiento físico-mecánico de estas mezclas para pavimentar flexible.

En la región se observa un crecimiento constante del tránsito vehicular, mientras que muchos pavimentos flexibles evidencian deterioro prematuro a causa de falencias presentes en el diseño, la construcción y las labores de mantenimiento. En consecuencia, diversas vías no alcanzan la vida útil de diseño establecida, condición que se ve agravada por la acción de agentes ambientales como las precipitaciones, los procesos erosivos y los eventos naturales los cuales aceleran los mecanismos de deterioro y reducen significativamente la durabilidad estructural y funcional del pavimento.

El presente estudio tiene como finalidad optimizar el comportamiento de las carpetas asfálticas mediante la adición del polímero EVA en dosificaciones de 2 %, 3 %, 4 % y 5 % en proporción al peso del ligante asfáltico. Para ello, se elaborará una mezcla asfáltica tradicional y otra modificada con EVA, las cuales serán evaluadas mediante el método Marshall para determinar su rendimiento estructural.

En el capítulo I se encuentra constituida por la introducción.

En el capítulo II se presenta la situación problemática de las carpetas asfálticas; además, se desarrolla la formulación del problema, los objetivos del estudio, la justificación e importancia de la adición del EVA, así como las hipótesis y variables de la investigación.

En el capítulo III se despliega el entramado teórico, explorando los cimientos de otras investigaciones sobre esta mezcla tanto a escala global como nacional y local, además de proporcionar fundamentos teóricos y científicos y definiciones de términos del marco conceptual.

En el capítulo IV se presentan de forma estructurada y sistemática los procedimientos metodológicos que orientan la investigación, con el propósito de asegurar la validez, confiabilidad y reproducibilidad de los resultados. Del mismo modo, se expone el rigor metodológico aplicado al análisis de la población, los instrumentos empleados para la obtención de datos y los principios éticos asumidos por el investigador, garantizando un desarrollo del estudio responsable, íntegro y respetuoso.

En el capítulo V se revelan los hallazgos del estudio en ambas variables, llevando a cabo un análisis comparativo entre la mezcla asfáltica tradicional y la remodelada con polímero EVA. Por último, se describen las conclusiones, las sugerencias y los anexos, donde se incluyen los experimentos en laboratorio y las pruebas fotográficas.

II. Planteamiento del problema

2.1. Descripción y formulación del problema

Descripción

El deterioro constante de las infraestructuras del pavimento flexible ha sido resultado de factores como la deficiente compactación, el drenaje deficiente, la carencia de asfalto o la sobrecarga de vehículos, lo que ha desencadenado múltiples afecciones estructurales, como fisuras, deformaciones, desintegración y problemas superficiales. En España, las carreteras sufren problemas como ahuellamientos, hundimientos, fisuras longitudinales y transversales, provocados por fallos en el diseño o construcción, lo que lleva a un mantenimiento vial deficiente y deteriora la calidad de la infraestructura. Según estudio reciente de la Asociación Española de la Carretera (AEC), la conservación de las vías en España es calificada como muy deficiente. Asimismo, el mal estado del pavimento constituye el factor predominante en el 94 % de los accidentes relacionados con la infraestructura. Se calcula que uno de cada trece kilómetros de carreteras en España exhibe daños significativos en más del 50% de su superficie, abarcando desde huecos y roderas hasta grietas profundas. Estos inconvenientes merman la comodidad, eficiencia y seguridad del tráfico, proponiéndose una posible disminución del límite de velocidad general entre 10 y 20 km/h como medida preventiva para reducir la probabilidad de accidentes (Renego, 2022). Una situación analoga se presenta en el país de Canadá, las duras condiciones del invierno y el alto tráfico reducen la durabilidad de los pavimentos; por ello, se investigan aditivos para crear mezclas de asfalto más resistentes, lo que ha llevado a importantes inversiones gubernamentales en mejoras de infraestructura vial para contrarrestar el deterioro y asegurar la resistencia de la infraestructura ante estos factores (Alfaidi et al., 2020).

A nivel nacional, las infraestructuras viales presentan múltiples fallas estructurales y superficiales debido a la falta de mantenimiento oportuno, el aumento del tráfico vehicular, un diseño insuficiente y factores climatológicos. Algunas de estas fallas incluyen problemas

como piel de cocodrilo, fisuras longitudinales, ahuellamiento, hinchamiento y fisuras transversales. PROVIAS Nacional es la institución encargada de la administración y supervisión de estos proyectos a nivel nacional, bajo la supervisión del MTC. En 2024, según un reporte de PROVIAS nacional, la red vial nacional tiene una longitud total de 27,525 km, entre vías pavimentadas y no pavimentadas, de las cuales solo el 18,179 km (66%) está en buen estado, 8,134 km (30%) en estado regular y 1,212 km (4%) en estado malo. En cuanto a vías pavimentadas, la longitud total es de 22,871 km, de las cuales el 15,451km (68%) están en buena condición, 7,191 km (31%) en estado regular y 229 km (1%) en estado malo. (MTC, 2024). De manera análoga, en las zonas cálidas del Perú, las carreteras se deterioran rápidamente debido a la combinación de altas temperaturas, el peso del tráfico y factores externos, lo que provoca deformaciones y fatiga del pavimento y, en consecuencia, reduce su durabilidad. Aunque países sudamericanos ya han adoptado tecnologías como la modificación de asfalto con polímeros para prevenir fallas comunes, esta técnica aún no se implementa en Perú, donde se sigue utilizando asfalto convencional a pesar de la variedad climática del país (Enriquez & Balbin, 2020).

En Abancay, las calles y avenidas sufren daños estructurales notables en sus pavimentos flexibles, manifestados como surcos, grietas y desprendimientos de la carpeta asfáltica, todo lo cual disminuye su durabilidad y afecta al tráfico. Las deficiencias en la infraestructura vial se deben principalmente a la escasa inversión en mantenimiento y rehabilitación, a diseños inadecuados y al incumplimiento de las exigencias del Ministerio de Transportes, así como a una selección incorrecta de los materiales. Ante esta situación, se plantea mejorar la calidad de las mezclas bituminosas, tanto del asfalto como de los agregados, incorporando polímero EVA para incrementar su resistencia y vida útil.

Formulación del problema de investigación

Problema general

- ¿De qué manera varían las propiedades físico-mecánicas de la mezcla asfáltica modificada con polímero etileno vinil acetato (EVA), en pavimento flexible, Abancay – Apurímac, 2023?

Problemas específicos

- ¿De qué manera varía la estabilidad de la mezcla asfáltica modificada con polímero etileno vinil acetato (EVA) al 2%, 3%, 4% y 5% en pavimento flexible, Abancay – Apurímac, 2023?
- ¿De qué manera varía el flujo de la mezcla asfáltica modificada con polímero etileno vinil acetato (EVA) al 2%, 3%, 4% y 5% en pavimento flexible, Abancay – Apurímac, 2023?
- ¿De qué manera varía el porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica modificada con polímero etileno vinil acetato (EVA) al 2%, 3%, 4% y 5% en pavimento flexible, Abancay – Apurímac, 2023?
- ¿De qué manera varía la resistencia a la tracción indirecta de la mezcla asfáltica modificada con polímero etileno vinil acetato (EVA) al 2%, 3%, 4% y 5% en pavimento flexible, Abancay – Apurímac, 2023?

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo general

- Evaluar la variación de las propiedades físico-mecánicas de la mezcla asfáltica modificada con polímero etileno vinil acetato (EVA), en pavimento flexible, Abancay – Apurímac, 2023.

2.2.2. Objetivos específicos

- Determinar la estabilidad de la mezcla asfáltica modificada con polímero etileno vinil acetato (EVA) al 2%,3%,4% y 5% en pavimento flexible, Abancay – Apurímac,2023.
- Determinar el flujo de la mezcla asfáltica modificada con polímero etileno vinil acetato (EVA) al 2%,3%,4% y 5% en pavimento flexible en la ciudad de Abancay – Apurímac,2023.
- Determinar el porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica modificada con polímero etileno vinil acetato (EVA) al 2%,3%,4% y 5% en pavimento flexible, Abancay – Apurímac,2023.
- Determinar la resistencia a la tracción indirecta de la mezcla asfáltica modificada con polímero etileno vinil acetato (EVA) al 2%,3%,4% y 5% en pavimento flexible, Abancay – Apurímac,2023.

2.3. Justificación e importancia

El presente estudio encuentra su justificación en la necesidad de incrementar las características físicas y mecánicas de la mezcla asfáltica tradicional a partir de la inclusión del polímero etileno vinil acetato (EVA), con el propósito de brindar una alternativa duradera a las frecuentes imperfecciones en los pavimentos, como fisuras tipo piel de cocodrilo, fisuras longitudinales y transversales, ahuellamiento e hinchamiento. De esta manera, se procura lograr un correcto desempeño estructural y una mayor resistencia a lo largo del tiempo de las carpetas asfálticas. Además, será el cimiento técnico para futuros proyectos de pavimentos flexibles ejecutados por los gobiernos locales. Finalmente, beneficiará a la población y a los transportistas que se movilizan en distintas direcciones para el traslado de productos y personas, al proporcionar vías más seguras, eficientes y con menores tiempos de viaje, generando un impacto positivo en el ámbito económico y social de la región.

Es esencial comprender el uso adecuado del polímero EVA para lograr un asfalto modificado eficiente, considerando las condiciones climáticas y la zona de aplicación. Su incorporación incrementa el desempeño físico y mecánico de las mezclas asfálticas empleadas en pavimentos flexibles, contribuyendo a reducir fisuras, aumentar la resistencia a la compresión y prolongar la vida útil del ligante. Además, reduce la sensibilidad a la temperatura y a la humedad, favoreciendo una mejor cohesión entre los componentes del asfalto y reduciendo la formación de grietas por variaciones térmicas. De este modo, es posible producir mezclas asfálticas en caliente con mayor durabilidad, cumpliendo con las especificaciones EG-2013 y EM-2016 del MTC, acorde a las exigencias de las obras viales desarrolladas en la ciudad de Abancay.

Además, esta investigación resulta rentable, pues al incorporar una mezcla asfáltica optimizada con polímero EVA se logrará un desempeño superior de los asfaltos flexibles, lo que resultará en un mantenimiento más económico y una longevidad superior con el paso del tiempo.

Limitaciones

La carencia de un laboratorio de pavimentos en la casa superior de estudios conlleva la necesidad de recurrir a laboratorios externos, mientras que, en el ámbito regional, las investigaciones y publicaciones comparables de las universidades locales son escasas.

Asimismo, se tuvo como limitación en la obtención del polímero EVA a nivel local; sin embargo, se realizó el pedido desde la ciudad Lima.

2.4. Hipótesis

Hipótesis general

- Existirá una variación significativa en las propiedades físico-mecánicas de la mezcla asfáltica modificada con polímero etileno vinil acetato (EVA), en pavimento flexible, Abancay – Apurímac, 2023.

Hipótesis específicas

- Existirá una variación significativa en la estabilidad de la mezcla asfáltica modificada con polímero etileno vinil acetato (EVA) al 2%,3%,4% y 5% en pavimento flexible, Abancay – Apurímac,2023.
- Existirá una variación significativa en el flujo de la mezcla asfáltica modificada con polímero etileno vinil acetato (EVA) al 2%,3%,4% y 5% en pavimento flexible, Abancay – Apurímac,2023.
- Existirá una variación significativa en el porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica modificada con polímero etileno vinil acetato (EVA) al 2%,3%,4% y 5% en pavimento flexible, Abancay – Apurímac,2023.
- Existirá una variación significativa en la resistencia a la tracción indirecta de la mezcla asfáltica modificada con polímero etileno vinil acetato (EVA) al 2%,3%,4% y 5% en pavimento flexible, Abancay – Apurímac,2023.

2.5. Variables

Tabla 1

Operacionalización de Variables

| VARIABLES | DEFINICIÓN OPERACIONAL | DIMENSIONES | INDICADORES | UNIDAD DE MEDICION | ESCALA DE MEDICIÓN | TÉCNICAS E INSTRUMENTOS | HERRAMIENTAS |
|--|--|---|--|--|--------------------|---|--|
| Variable Independiente: Polímero etileno vinil acetato (EVA) | El uso de polímero EVA en la modificación del cemento asfáltico mejora notablemente sus propiedades reológicas, incrementando tanto la viscosidad como la cohesión de la mezcla. Asimismo, favorece la flexibilidad en climas fríos y reduce la fluencia en climas cálidos. En aplicaciones de pavimentación, estos cambios se traducen en un mejor comportamiento frente a las cargas repetidas y en una mayor resistencia al ahuellamiento y menor susceptibilidad al agrietamiento por frío (Carranza, 2020). | Dosificación | Polímero etileno vinil acetato (EVA) al 2%,3%,4% y 5% | Porcentaje (%) | Razón. | Observación directa, análisis documental, guías y normas técnicas del MTC, fichas de registro de datos y hojas de cálculo en Excel. | ASTM D792 |
| Variable Dependiente: Propiedades físico - mecánicas de la mezcla asfáltica. | Con la finalidad de caracterizar el comportamiento físico y mecánicos de las mezclas bituminosas, se procederá al diseño de mezclas asfálticas convencionales e incorporado con polímero EVA, posteriormente, estas mezclas serán sometidas a las pruebas correspondientes, utilizando el procedimiento Marshall y el ensayo de tracción indirecta (Gargate & Huamani, 2018). | Estabilidad. Flujo. Porcentaje de vacíos. Resistencia a la tracción indirecta. | <ul style="list-style-type: none"> • 831.07 (Tradicional) • 831.07 (Modificado) • 8 - 14 (Tradicional) • 8 - 14 (Modificado) • 3 – 5 (Tradicional) • 3 – 5 (Modificado) • Mpa (Tradicional) • Mpa (Modificado) | Kilogramo (Kg). Pulgada centésima (0.01") Porcentaje (%) Mpa | Razón. | Observación directa, análisis documental, guías y normas técnicas del MTC, fichas de registro de datos y hojas de cálculo en Excel. | (Ensayo Marshall) MTC E 504 (Ensayo brasileño) NLT-346/90 |

Nota. Elaboración propia.

III. Marco teórico

3.1. Antecedentes

A nivel internacional

Clavijo y Sánchez (2021), realizaron un estudio titulado “Comparación de las propiedades F-M, químicas y reo lógicas del cemento asfaltico con adición de distintos materiales”, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Colombia. El objetivo de estudio se enfocó en describir y determinar las propiedades F-Q y reo lógicas del ligante asfaltico mediante la incorporación de diversos materiales, tales como polímeros, caucho reciclado, arcilla calcinada, cerámica y almidón de yuca. Empleamos una metodología de meta análisis en el contexto de una revisión sistemática previa, adoptando un enfoque descriptivo y cuantitativo. La duración de este estudio abarcó un período de 24 semanas, dividido en tres etapas clave: la recopilación exhaustiva de información bibliográfica, la evaluación y elección de los datos relevantes, y el logro de los objetivos planteados. Los resultados que obtuvimos nos permitieron llevar a cabo comparaciones entre los diferentes materiales y nos brindaron las bases necesarias para tomar decisiones informadas al seleccionar los insumos o combinación de insumos que se ajusten de manera óptima a los requerimientos particulares de determinados estudios. Además, llevamos a cabo un análisis minucioso de las implicaciones ambientales y socioeconómicas asociadas a las alternativas que investigamos, concluyo, de manera general, que las adiciones de insumos alternativos incrementen las características mecánicas, reológicas y físico-químicas del ligante asfáltico; el insumo más investigado es el caucho reciclado, que permite un mayor nivel de confianza en el uso de los insumos. De manera similar, el uso de polímeros y almidón de yuca presenta beneficios que han sido demostrados en investigaciones anteriores. Se requiere más estudios para entender completamente el comportamiento de la arcilla calcinada y los desechos cerámicos.

Janmohammadi et al. (2020), realizaron un estudio titulado “Efectos Simultáneos del Etileno Vinil Acetato (EVA) y la Fibra de Vidrio sobre las Propiedades de la Mezcla

Asfáltica en Caliente (HMA)", Universidad Islámica Azad, Irán. El objetivo de este estudio fue realizar una investigación de laboratorio destinada a evaluar el comportamiento de mezclas asfálticas modificadas mediante la adición de polímero EVA y fibra de vidrio. La investigación se desarrolló bajo un diseño experimental, implementando once tipos de mezclas asfálticas que fueron analizadas mediante los ensayos Marshall y de módulo resiliente, con el propósito de determinar la influencia de los aditivos en proporciones comprendidas entre el 3 % y 7 % del peso del asfalto base. Los resultados mostraron que la incorporación de un 5 % de polímero EVA y un 0.3 % de fibra de vidrio incrementó la estabilidad aproximadamente en un 25 % y 20 %, respectivamente. De forma individual, el uso del 5 % de polímero EVA elevó la estabilidad Marshall hasta 1170 kg, atribuible al aumento de la viscosidad del cemento asfáltico. En cuanto al flujo, un 3 % de EVA generó un incremento de 3.7 mm, mientras que un 5 % lo redujo a 3.4 mm. Por otra parte, los resultados del módulo resiliente evidenciaron que, al incrementar el porcentaje de EVA, tanto a 25 °C como a 40 °C, se observó un aumento del módulo resiliente de las mezclas. En términos generales, se concluyó que la adición de polímero EVA mejora la viscosidad y el módulo resiliente de las mezclas asfálticas, confirmando que este aditivo ejerce un efecto predominante sobre las propiedades mecánicas y dinámicas en comparación con las mezclas convencionales.

Diab et al. (2020), realizaron un estudio titulado "Investigación de los Mecanismos del Caucho, Estireno – Butadieno (SBR) y Etileno Vinil Acetato (EVA) en el Ligante Asfáltico Basándose en Pruebas Reo lógicas y Relacionadas con la Fatiga", Universidad Estatal de Kennesaw, Estados Unidos. La investigación se orientó a evaluar, a través de pruebas de laboratorio, el desempeño físico y mecánico de ligantes asfálticos modificados con caucho y con polímero EVA, considerando propiedades reológicas y principales mecanismos de falla como agrietamiento térmico, ahuellamiento y fatiga. Bajo un diseño experimental, se incorporó EVA en proporciones de 3% y 5% respecto al ligante base y se analizó su desempeño en laboratorio. Los hallazgos evidenciaron que el asfalto

adicionada con EVA presenta mayor comportamiento a esfuerzos elevados y mejor capacidad de deformación, concluyéndose que los ligantes con alto contenido de polímero ofrecen un rendimiento superior frente a aquellos con modificaciones moderadas.

Setyawan et al. (2019), realizaron un estudio titulado “Propiedades Físicas y Mecánicas del Aglutinante Modificado con Etileno Vinil Acetato (EVA)”, Universidad Sebelas Maret, Indonesia. Esta investigación tiene como propósito analizar las consecuencias del polímero EVA en el asfalto PEN 60/70, bajo un diseño experimental de enfoque cuantitativo. Se elaboraron muestras con contenidos de EVA entre 0% y 4%, en incrementos de 0.5%, para evaluar sus propiedades físicas. Los hallazgos evidenciaron que el contenido ideal de EVA fue 3.5%, al evidenciar mejoras en el índice de penetración y en la rigidez a bajas temperaturas. Se concluyó que el ligante asfáltico adicionado con EVA presenta un mejor desempeño que el tradicional, destacando mayores valores de ductilidad, punto de ablandamiento, estabilidad térmica, gravedad específica y adherencia al agregado.

Orozco (2019), realizó un estudio titulado “Efecto de promotores de adherencia en las PM de MA en caliente”, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. El propósito del estudio consistió en desentrañar cómo los agentes de adhesión tenían impacto sobre el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas calientes. La selección de un ligante asfáltico de producción nacional, la caracterización de los materiales de investigación, la selección de aditivos con propiedades que mejoren la adherencia y otros procedimientos pertinentes fueron parte del estudio que se utilizó para cumplir con los objetivos planteados. La muestra y la población del estudio no se especificaron en los fragmentos que se proporcionaron. En cuanto a las conclusiones, se sugirió que se realicen más investigaciones para examinar cómo los promotores de adherencia pueden mitigar el daño que la humedad causa a las mezclas asfálticas, particularmente en circunstancias donde puede haber agua salobre o de mar, entre otras condiciones.

Ballesteros et al. (2019), realizaron un estudio titulado “Estudio de MA Densas con Adición de Materiales Alternativos” en la UCC. El objetivo de la investigación fue examinar el desempeño de las MA densas con la adición de materiales sustitutos. Como parte de la metodología se utilizó un programa experimental para caracterizar los materiales utilizados, entre ellos áridos y RAP (asfalto reciclado). Además, se utilizaron pruebas de estabilidad, flujo y temperatura ideal de compactación para analizar los parámetros volumétricos de la mezcla bituminosa. El alcance del estudio se restringió a evaluar las características volumétricas de mezclas asfálticas densas que incluían materiales sustitutos. La muestra utilizada en el estudio incluyó asfalto reciclado (RAP) así como áridos pétreos provenientes del río Coello, que atraviesa el municipio de Espinal en el Tolima. Entre las herramientas utilizadas se encontraban herramientas de laboratorio para caracterizar los insumos y pruebas de desempeño volumétrico, como la prueba Marshall. Los hallazgos evidenciaron que las mezclas asfálticas densas cambiadas con materiales alternativos tenían suficientes propiedades volumétricas, como estabilidad y fluidez, para satisfacer las necesidades de diseño. En conclusión, el estudio apoyó la viabilidad de modificar mezclas asfálticas densas con insumos alternativos, como aceite de palma y carnauba, para producir mezclas con propiedades volumétricas aceptables.

A nivel nacional

López (2024), realizó un estudio titulado “Análisis de una MA con Incorporación de Polímero de Etileno Vinil Acetato (EVA)”, Universidad Señor de Sipán, Pimentel-Chiclayo, Perú. La meta principal de este trabajo es examinar una mezcla asfáltica que contiene polímero de etileno-acetato de vinilo (EVA) sustituyendo el polímero por el ligante asfáltico PEN 60 - 70 en peso. Se aplicó un diseño experimental y una metodología de investigación cuantitativa. Mediante el ensayo Marshall se determinó la dosificación óptima del ligante asfáltico y del polímero EVA, evaluándose con distintas combinaciones del ligante asfáltico (4 %, 4,5 %, 5 %, 5,5 % y 6 %) y de polímero (2,5 %, 3 %, 3,5 %, 4 % y 4,5 %), seleccionándose aquella proporción que produjo los mejores resultados. Se ha

determinado que añadir un 3 % de polímero EVA a la mezcla mejora significativamente los parámetros de estabilidad y rigidez.

Hervas (2022), realizó un estudio titulado “Evaluación de las propiedades F-M y costo de producción de las MA modificados con polímeros EVA y SBR en la ciudad del Cusco”, Universidad Andina Cusco. El propósito de esta tesis es examinar cómo las mezclas bituminosas enriquecidas con polímeros EVA y SBR pueden modificar sus características físicas y mecánicas mediante la sustitución de porcentajes de agregado por estos polímeros. Se optó por una metodología cuantitativa y se implementó un esquema experimental. Se pretende determinar el porcentaje óptimo de polímero que permita mejorar el desempeño físico y mecánico de la mezcla bituminosa BETUTEC IB PG 70-28. Para ello, se fabricaron especímenes con niveles de ligante asfáltico de 4%, 5% y 6%, combinados con diferentes porcentajes de polímero de 1%, 3%, 5% y 8%, los cuales fueron evaluados mediante ensayos de laboratorio. De acuerdo con los hallazgos alcanzados, se concluye que la adición del 3% de polímero EVA y 1% de SBR evidencio los mayores incrementos en las propiedades volumétricas.

Meza y Palomino (2021), realizó un estudio titulado “Mezcla asfáltica modificada con polímeros para el mejoramiento del pavimento asfáltico en zona de selva”, Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú. El objetivo de este estudio era comparar las mezclas asfálticas tradicionales y enriquecidas mediante polímeros SBS, SBR y EVA. El estudio empleó un enfoque cuantitativo y una estrategia no experimental. Su finalidad fue promover la aplicación de asfaltos modificados con polímeros, especialmente en regiones de altas temperaturas, considerando tanto el comportamiento mecánico como el desempeño de ambas mezclas. Según los hallazgos, la mezcla bituminosa tratada con polímeros SBS (más utilizados) y SBR ha mejorado su rendimiento mecánico. Gracias a su capacidad para resistir tensiones y tiempo de vida operacional en comparación con la mezcla asfaltada tradicional. Se analizaron las carencias de los asfaltos tradicionales en caminos de selva, basándose en estudios bibliográficos. Las causas principales son un diseño deficiente,

técnicas de construcción inadecuadas, condiciones meteorológicas irregulares y un tráfico rodado significativo en la zona. Además, desde una perspectiva económica, la adición de polímeros en el ligante asfáltico aumenta los costos de construcción, pero, con el tiempo, esto se compensa con unos gastos de mantenimiento prematuro y continuo más bajos.

Carranza (2020), realizó un estudio titulado “Efecto del polímero etileno vinil acetato en la estabilidad del concreto asfáltico”, Universidad Cesar Vallejo, Trujillo, Perú. El propósito de esta tesis fue analizar cómo distintos porcentajes del polímero etileno-vinil acetato afectan la estabilidad de la carpeta asfáltica tradicional. Se puso en marcha un plan experimental y se seleccionó una metodología cuantitativa. El estudio se centró en examinar los elementos de la mezcla bituminosa, teniendo en cuenta los insumos como piedra, el polímero EVA BBM-EVA-601 y el ligante asfáltico Petroperú PEN 60 - 70. La muestra constaba de treinta probetas de ensayo que se evaluaron utilizando el método Marshall, y la población estaba compuesta por mezclas asfálticas, concretamente briquetas con diferentes dosis de EVA. Se empleó la observación directa en el laboratorio para recopilar datos, que luego se procesaron en tablas y gráficos utilizando Excel y hojas de datos técnicos. Los resultados demostraron una estabilidad Marshall de 1220 kg para el asfalto normal (5,7 % de aglutinante) y de 1310 kg para el asfalto modificado (4,8 % de EVA), lo que indica un aumento aproximado del 8 % en la estabilidad como resultado de la inserción del polímero.

Aucasi & Escobar (2020), realizaron un estudio titulado “Diseño de mezclas asfálticas incorporando polímeros EVA para pavimento de la carretera 3N en el distrito de Amarilis, Huanuco-2020”, Universidad Cesar Vallejo, Huánuco, Perú. El objetivo de esta tesis fue con la finalidad determinar la aplicación de EVA en la carpeta asfáltica de la autopista 3N. Se aplicó un diseño no experimental y una metodología de investigación cuantitativa. A la hora de elegir el tipo de ligante asfáltico, se tuvo en consideración el clima de la zona en la que se iba a implementar el diseño del pavimento. Se realizó la clasificación del tipo de tránsito, ya sea liviano o pesado, debido a que de esta variable dependen los

grosos de la carpeta asfáltica. Para ello, se empleó las guías o manuales del MTC, el cual permite determinar de manera precisa el cálculo de los ejes equivalentes (ESAL), siendo más detallado y adecuado para el diseño de las carpetas asfálticas. Se consideraron todos los parámetros establecidos en el RNE, específicamente en la Norma CE.010. Asimismo, se empleó el software Matchad versión 15 para determinar el valor medio del ensayo Marshall. Para ello, se recopilaron y analizaron datos provenientes de diversos autores, quienes utilizaron proporciones de polímero EVA del 2 %, 3 %, 4 % y 5 %, así como cantidades del ligante asfáltico de 4,5 %, 5,0 %, 6,3 % y 6,4 %.

A nivel regional y local

No se hallaron investigaciones previas significativas a nivel regional o local sobre el tema en cuestión, por lo que el estudio se desarrolló sin apoyarse en antecedentes específicos del área analizada.

3.2. Bases teóricas

3.2.1. Pavimento flexible

Hervas (2022), indica que el pavimento se planifica previamente considerando distintos materiales y espesores, con el objetivo de resistir las sollicitaciones generadas por el paso constante de vehículos durante su periodo de servicio. Esta estructura está compuesta por varias capas de materiales seleccionados, elaboradas con materiales adecuados y correctamente compactados, las cuales se apoyan sobre una plataforma preparada durante las etapas iniciales del proyecto y deben responder de manera eficiente a las cargas permanentes del tráfico (p.8).

3.2.1.1. Funciones del pavimento flexible

Menéndez (2016) señala que su rol es diverso y está estrechamente ligado a las exigencias de los usuarios y la organización. Estas funciones han pasado por un camino de accesibilidad, conectividad, servicio y, finalmente, la integración. A continuación, se detallan las funciones esenciales de una estructura organizada desde tres ángulos distintos: el usuario y la entidad, la arquitectura y el entorno natural.

Usuario, entidad/institución:

- Ofrecer a los viajeros un recorrido seguro y agradable, con una periodicidad impecable y una resistencia óptima a la presión.
- Facilitar el acceso a los vehículos en cualquier circunstancia climática.
- Abaratar los gastos de mantenimiento de vehículos, acortar el recorrido y evitar percances.
- Abaratar los gastos de reparación y funcionamiento.
- Optimizar y facilitar los aspectos de funcionamiento y traslado.

Estructura:

- Redistribuir y equilibrar el flujo vehicular para preservar la capa subyacente y/o el terreno de cimentación.
- Asegurar la tierra profunda y la base del clima, ya sea a través del agua o el congelamiento.
- Dominar el vaivén y la influencia del agua sobre el terreno de cimentación.
- Resistencia idónea de los componentes de la estructura frente al tráfico y al clima.

Medio ambiente:

- Atender las exigencias ecológicas y estéticas.
- Disminuye el bullicio y la contaminación atmosférica.
- Poseer la longevidad necesaria para no desmoronarse ante los caprichos del entorno (agua, oxidación, cambios térmicos).
- Ofrecer una superficie armoniosa con el entorno y armoniosa estéticamente, especialmente en áreas urbanas preservadas (p.11).

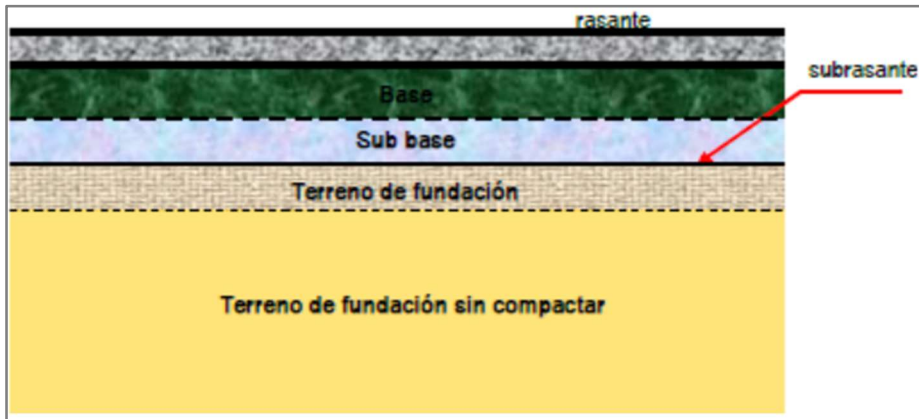
3.2.1.2. Componentes de un pavimento flexible

Hervas (2022) señala que los caminos asfaltados se estructuran como un tapiz de asfalto, sostenido generalmente por dos capas no sólidas: la capa de soporte y la capa inferior. Sin embargo, cada uno de estos niveles puede ser eliminada según las exigencias

específicas del proyecto. A continuación, se detallan las diversas capas que componen una carpeta asfáltica flexible.

Figura 1

Sistema de capas del pavimento



Nota. Representación gráfica de capas de un pavimento flexible. Tomado de (Hervas, 2022).

Carpeta asfáltica

Hervas (2022) señala que la carpeta asfáltica ofrece una capa homogénea y firme al tráfico, con una textura y tonalidad adecuadas, capaz de resistir los golpes del tráfico y el entorno. El manual AASHTO recomienda evaluar el módulo elástico de la carpeta empleando el Concreto Estructural sin refuerzo o con menos refuerzo del necesario (p. 10).

Alarcón y Cárdenas (2021), señalan que el tapiz de asfalto desempeña las siguientes tareas:

- La superficie del eje. La capa de rodamiento debe garantizar una superficie resistente y uniforme para el paso del tráfico, con texturas y colores agradables, y resistente a los golpes del asfalto.
- Resistencia al agua. Hasta donde sea posible, debemos evitar que el agua entre en el suelo.
- Inmovilidad. Su fortaleza ante la presión eleva la robustez del suelo (p.13).

Base

Hervas (2022), señala que la capa base, usualmente granular, se coloca sobre la capa intermedia, encargándose de trasladar las cargas del tráfico hacia el terreno de cimentación. Para su construcción se exigen agregados de alta calidad. Este estrato abarca grava triturada y compactada hasta alcanzar el peso específico seco determinado por el Proctor Modificado. El módulo resiliente (MR), desentraña la flexibilidad del fundamento.

Sub-base

La capa inferior puede incorporarse o no según el diseño estructural de la carpeta asfáltica. Esta se asienta sobre el terreno de cimentación y admite materiales con menores exigencias, dado que las cargas verticales son más intensas en los niveles superiores y se atenúan con la profundización. El comportamiento elástico de la subbase se evalúa a través del coeficiente de recuperación (MR).

Terreno de fundación

El suelo de cimiento puede ser ratificado por un muro o por la naturaleza en caso de rellenos, y en las dos situaciones, la altura superior se conoce como sub-rasante. El coeficiente de recuperación, vinculado al suelo de cimentación, ha sido profundamente explorado por las diversas compañías de servicios de transporte en EE. UU., y ha sido vinculado con el CBR (p. 11).

3.2.1.3. Características que debe reunir un pavimento flexible

Alarcón y Cárdenas (2021) Señalan que, para desempeñar correctamente sus funciones, un pavimento debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Debe resistir las cargas del tránsito.
- Debe soportar las condiciones del clima.
- Debe tener una textura adecuada que garantice seguridad y resista el desgaste.
- Debe ser una superficie regular para brindar comodidad al usuario.
- Debe ser durable.
- Debe permitir un buen drenaje del agua.

- Debe reducir el ruido del tránsito.
- Debe ser económico.
- Debe tener un color que evite deslumbramientos y mejore la seguridad vial. (p.13-14)

3.2.2. Mezclas asfálticas

Villa (2022) sostiene que las composiciones asfálticas se componen aproximadamente 90 por ciento de piedra chancada y arena, 5 por ciento de polvo mineral y un 5 por ciento de ligantes asfálticos. Los materiales mencionados son determinantes para el correcto desempeño del asfalto, ya que una deficiencia en cualquiera de ellos afecta el rendimiento global de la mezcla. En este contexto, el ligante bituminoso y el material de relleno constituyen como factores fundamentales en el desempeño de la mezcla bituminosa y cómo en su costo final (p. 53).

3.2.2.1. Clasificación de las mezclas asfálticas

Mezclas asfálticas en caliente

Hervas (2022) indica que estas mezclas se producen calentando el asfalto hasta alcanzar la viscosidad adecuada, alrededor de 150 °C, y elevando también la temperatura de los agregados para evitar un enfriamiento prematuro del ligante. Sin embargo, cuando se trabaja a temperaturas excesivas, la mezcla pierde trabajabilidad, dificultando su colocación y compactación (p. 16).

Mezclas asfálticas en frío

Hervas (2022) señala que estas mezclas, elaboradas a base del ligante asfáltico, se emplean fundamentalmente en la obra y cuidado de las vías de transporte secundarias. Con el propósito de extender su vida útil y evitar un deterioro temprano, es común la aplicación de lechadas asfálticas en las mezclas frías. Estas se caracterizan por conservar su estabilidad durante el almacenamiento gracias al uso de emulsiones, lo que permite un aumento progresivo de la viscosidad. No obstante, una vez colocadas en capas delgadas, el proceso de endurecimiento se acelera por la pérdida de agua o agentes fluidificantes.

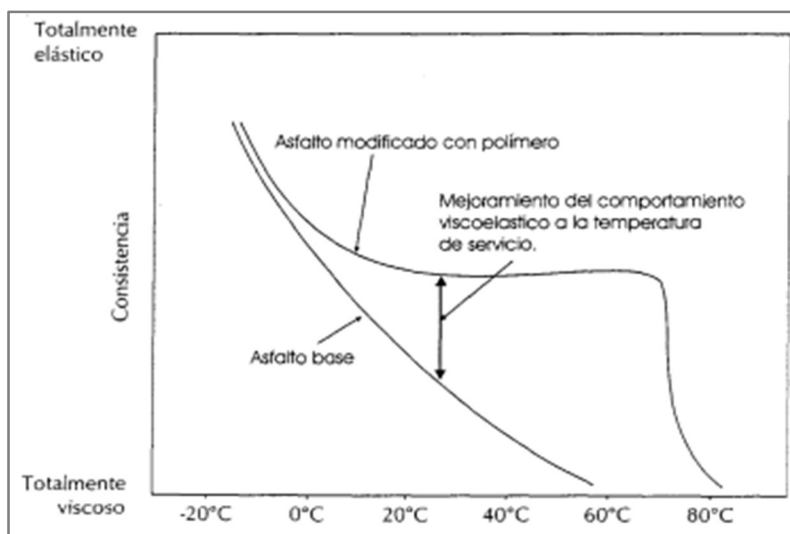
Este proceso, conocido como maduración, otorga a la mezcla la resistencia necesaria para su adecuado desempeño en servicio (p. 16).

Mezclas asfálticas modificadas

Según Gargate y Huamani (2018), las mezclas asfálticas modificadas se obtienen al integrar polímeros al ligante asfáltico con la finalidad de potenciar su resistencia frente a los factores climáticos. Esta incorporación permite optimizar las características físicas y mecánicas del aglutinante asfáltico. Atenuar los procesos de oxidación y reducir su susceptibilidad frente a variaciones de temperatura y humedad. Como resultado, el asfalto modificado presenta mayor elasticidad y una mejor resistencia térmica, lo que amplía su rango de desempeño en servicio (p. 37).

Figura 2

Comportamiento del asfalto modificado con polímero



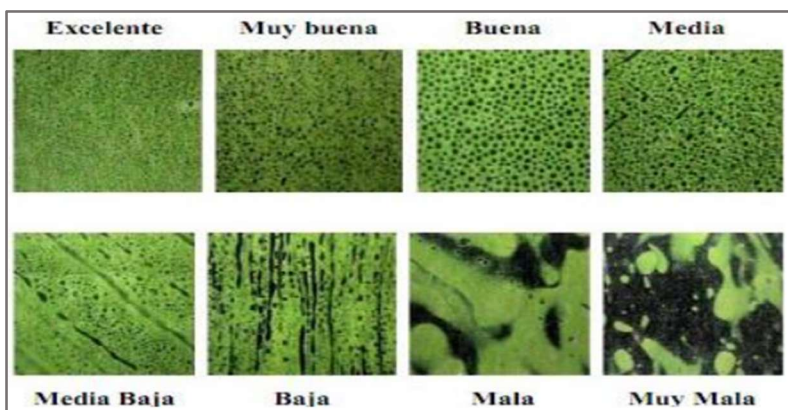
Nota. La figura 2 muestra el incremento de consistencia del asfalto tradicional al ser incorporado con polímero. Tomada de Alarcón y Cárdenas (2021).

Según Gargate y Huamani (2018), la eficacia del ligante asfáltico con el polímero está condicionada por el grado de afinidad entre ambos materiales. Para lograr una modificación adecuada, el polímero debe integrarse homogéneamente con el asfalto, formando una mezcla uniforme y estable. La compatibilidad se evidencia cuando no es posible distinguir visualmente fases separadas entre los componentes. En este sentido, los

asfaltos con mayor contenido de resinas y compuestos aromáticos favorecen la interacción con los polímeros, ya que presentan una mayor capacidad de adhesión. Por el contrario, los asfaltos ricos en saturados y asfáltenos muestran una menor afinidad con los modificadores, lo cual mantiene una correspondencia estrecha con el proceso de refinamiento y la calidad del asfalto utilizado (p.39).

Figura 3

Afinidad físico-química entre asfalto y el polímero



Nota. La figura 3 muestra la composición del asfalto con polímero para crear una mezcla homogénea y estable. Tomada de Gargate y Huamani (2018).

- **Comportamiento de las mezclas asfálticas modificadas**

Durabilidad

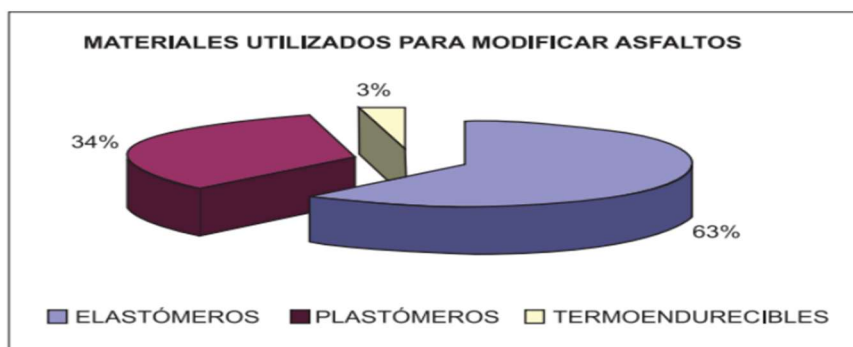
La adición del polímero al asfalto mejora significativamente su desempeño, aumentando su resistencia mecánica y su capacidad de unión con los agregados. Estas mezclas presentan mayor desempeño al ahuellamiento y a la rotura frente a variaciones de carga, temperatura y tiempo de servicio. Asimismo, soportan mejor el calor y las cargas repetitivas del tránsito vehicular. El asfalto modificado reduce la exudación gracias a su mayor estabilidad, menor fluidez y elevada elasticidad. Además, mantiene un buen desempeño elástico a temperaturas frías, lo que contribuye a disminuir la fricción y el deterioro del pavimento.

Duración de servicio estructural

Las mezclas asfálticas adicionadas con polímeros pueden duplicar o triplicar el tiempo de servicio, según las condiciones de uso. Esto se logra gracias a los elastómeros, como el caucho, que mejoran la resistencia al envejecimiento y permiten soportar cargas verticales prolongadas sin deformación. Los asfaltos con hule natural, látex, SBS y SBR proporcionan durabilidad adicional, mientras que los plastómeros aportan resistencia al impacto, aislamiento térmico, baja absorción de agua y prevención de agrietamientos, garantizando un pavimento más resistente y duradero (p.39-40).

Figura 4

Porcentaje de polímeros más utilizados para modificar asfaltos



Nota. Se presentan los porcentajes de los polímeros más utilizados en las mezclas bituminosas. Adaptado del Gargate y Huamani (2018).

Costo

Al incorporar polímeros al asfalto, el costo inicial de la mezcla puede incrementarse alrededor de un 25% frente a la mezcla convencional. Sin embargo, su aplicación debe evaluarse considerando el balance costo-beneficio, en virtud de que el valor económico del material se encuentra condicionado por la complejidad del proceso de polimerización y la oferta de monómeros. Estas mezclas ofrecen ventajas importantes: permiten reducir el espesor de la carpeta de rodadura sin afectar su resistencia ni durabilidad, y disminuyen los gastos de mantenimiento al mejorar la aptitud de la pavimentación para soportar deformaciones y daños a lo largo del tiempo, optimizando así la inversión total (p. 41).

3.2.2.2. Características de las mezclas asfálticas.

Bravo (2018) señala que cada una de estas características es fundamental para el rendimiento de las mezclas bituminosas.

- **Densidad de la mezcla asfáltica**

La densidad específica representa la cantidad de peso que posee la mezcla por cada unidad de volumen. Aunque no interviene directamente en la formulación de la mezcla, es fundamental para los procesos de compactación. En el laboratorio, se determina esta densidad para guiar y controlar la correcta compactación de la mezcla asfáltica.

- **Volúmenes de aire**

Los Va corresponden a los vacíos de aire retenidos dentro de la mezcla densificada. Una mayor proporción de vacíos incrementa la permeabilidad de las mezclas bituminosas. En laboratorio, las mezclas convencionales presentan entre 3 y 5% de vacíos de aire, mientras que en obra se tolera hasta un 8%, facilitando la compactación de la carpeta durante la colocación.

- **Vacíos en la mezcla mineral (VMA)**

Se analiza la porosidad de la mezcla, incluyendo el aire atrapado y el ligante asfáltico eficiente. La especificación define un VMA mínimo según el tamaño de los agregados. Valores bajos de VMA generan un asfalto más frágil y una mezcla susceptible a la oxidación, mientras que valores altos producen un asfalto más duro y una mezcla con mayor resistencia.

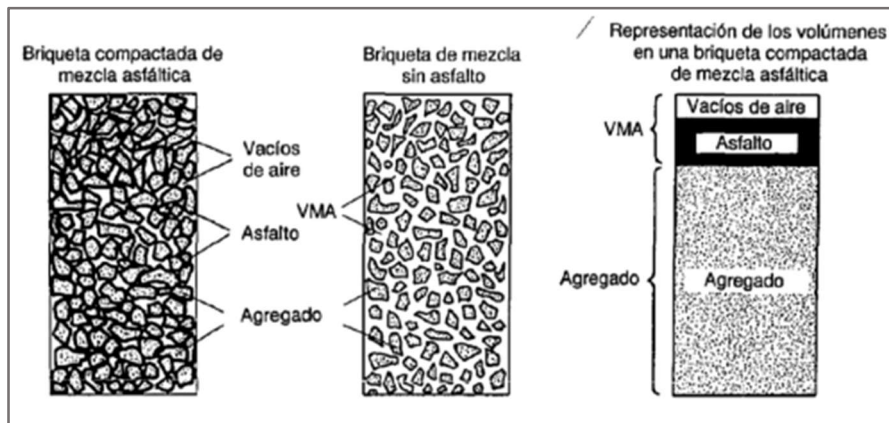
- **Contenido de asfalto**

La presencia de asfalto en la mezcla determina el nivel total de ligante integrado. Una porción de este asfalto es incorporada por los agregados, mientras que la fracción restante genera una capa que cubre las partículas, denominándose asfalto incorporado y asfalto útil. La cantidad ideal de asfalto depende del tamaño de las partículas y del potencial de los agregados para absorberlo; mezclas con mayor cantidad de filler, como las SMA,

requieren más asfalto, mientras que mezclas porosas con menos de 2% de filler necesitan menos ligante (p.22-23).

Figura 5

Parámetros volumétricos en una probeta compactada



Nota. La figura 5 ilustra la distribución volumétrica en una briqueleta compactada de mezcla asfáltica, según lo reportado por Bravo (2018).

3.2.2.3. Componentes de un concreto asfáltico.

El asfalto fundido se compone principalmente de piedra y cemento asfaltado. La incorporación de filler, un compuesto de relleno, es opcional y se emplea para elevar la densidad y la uniformidad de la mezcla, especialmente cuando los agregados poseen una granulometría más dispersa.

Agregados pétreos.

Villa (2022) define como materiales granulares con una composición mineralógica y una resistencia que se utilizan para combinar partículas de distintos tamaños, como el asfalto mezclado en caliente, se conocen como áridos. Finos y gruesos, escoria de alto horno, fragmentos pétreos triturados y polvo mineral son algunos de los compuestos típicos. El pavimento se comporta debido a la importancia crucial de seleccionar adecuadamente el material, ya que el mismo agregado es el arquitecto de las características resistentes del pavimento (p.31).

Bravo (2018) indica que los agregados son esenciales en una mezcla asfáltica, constituyendo aproximadamente el 90-95% del peso y el 75-85% del espacio total. La resistencia y durabilidad de la carpeta rodadura dependen principalmente de la idoneidad de estos insumos, por lo que es fundamental seleccionar y manejar cuidadosamente los agregados utilizados en la mezcla (p. 9).

Villa (2022), nos revela que los minerales se distribuyen en grueso, fino y filler.

- **Agregado grueso:** Según el ítem MTC E-207, el material retenido en el tamiz de 4.75 mm (N°4) debe provenir de la trituración de roca, grava o una mezcla de ambos, y no debe superar el 5% en peso de partículas planas o alargadas (Ministerio de Transportes y Comunicaciones MTC, 2013).
- **Agregado fino:** Son los fragmentos de tamaño intermedio que pasan por el tamiz N°4 (4.75 mm) y se retienen en el N°200, provenientes de piedra triturada, escoria, grava o arena natural. Su función principal es ocupar los espacios vacíos en la mezcla, haciéndola más compacta (Ministerio de Transportes y Comunicaciones MTC, 2013).
- **Filler:** Se refiere al segmento de agregado fino cuya granulometría es menor que la abertura del tamiz N°200, generalmente mineral o comercial como cal hidratada o cemento portland, que se añade a la mezcla para llenar los vacíos entre agregados y mejorar la granulometría de los finos que no cumplen las especificaciones técnicas.

❖ **Propiedades de los agregados**

- Granulometría y diámetro máximo
- Eliminación de impurezas
- Rigidez
- Geometría granular
- Morfología superficial
- Índice de absorción

- Adherencia al asfalto
- Gravedad específica (p. 37-38)

Figura 6

Propiedades de los agregados



Nota. La figura 6 ilustra un esquema de las características de los agregados, según Villa (2022).

Cementos Asfálticos

Menéndez (2016) indica que el ligante asfáltico se produce a partir de la evaporación controlada de los residuos más pesados del petróleo crudo, prolongando el procedimiento hasta alcanzar la consistencia deseada. El uso de vapor permite separar los componentes volátiles sin elevar demasiado la temperatura, evitando así la pérdida de ductilidad, mayor vulnerabilidad y la constitución de un material menos uniforme.

La excelencia de un cemento asfaltado depende de la naturaleza del crudo, que puede fluctuar notablemente incluso en un mismo yacimiento, y del método de refinación utilizado (p.175).

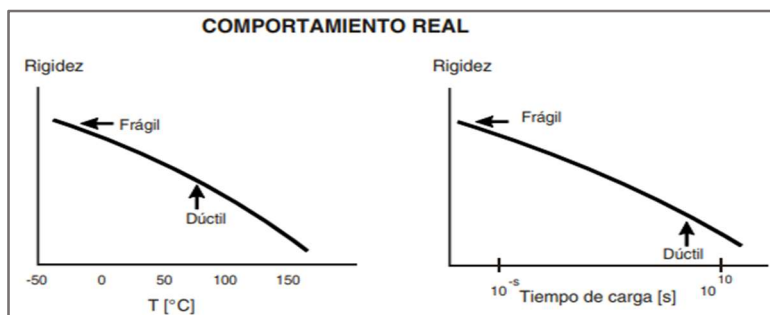
La dureza de los cementos asfaltados se determina a través del ensayo de penetración. Este experimento revela cuán profundamente una aguja se adentra en una muestra de asfalto bajo una presión y un lapso específicos. En Perú, los precios del asfalto varían según su grado: 40–50, 60–70, 85–100 y 120–150 PEN, según las condiciones climáticas locales.

❖ Comportamiento físico-mecánico del asfalto

Villa (2022), señala que el asfalto actúa como una danza visco-elástica, adaptándose al clima y al tiempo de esfuerzo aplicado. El ligante asfáltico a altas temperaturas pierde su elasticidad, especialmente en el momento de la mezcla (135°C). A medida que el termómetro baja, el ligante asfáltico se torna más sólido. A climas bajas, el ligante asfáltico tiende a romperse, transformándose en un barro frágil y quebradizo.

Figura 7

Comportamiento de cemento asfáltico



Nota. El comportamiento del cemento asfaltado se revela en el gráfico. Bajo la aplicación de cargas rápidas, el asfalto se rigidiza, mientras que cuando las cargas son más pausadas, se desmorona y se desliza. Tomada del (Gargate & Huamani, 2018, p.8).

❖ Comportamiento a altas temperaturas

Hervas (2022) señala que el ligante asfáltico, sometido a temperaturas extremadamente altas o a cargas prolongadas aplicadas a baja velocidad, puede transformarse en un líquido viscoso, actuando como un líquido ideal, manteniéndose una relación constante entre la tensión aplicada y la velocidad de deformación.

Además, el cemento asfáltico presenta un comportamiento plástico, ya que al fluir no recuperan su forma original. Por ello, cuando se aplican a altas temperaturas, su comportamiento se asemeja al de un plástico, generando desplazamientos en las intersecciones y disminuyendo su adhesión al agregado, lo que puede causar fisuras o fallas en el pavimento (p.22).

Figura 8

Ahuellamiento o deformación permanente



Nota. En la figura 8 se observa deformación permanente, causada principalmente por cargas de tráfico, altas temperaturas y un diseño inadecuado. Tomada del (Gargate & Huamani, 2018).

❖ Comportamiento a bajas temperaturas

Hervas (2022) señala que el cemento asfáltico, al ser sometido a temperaturas frías o a un tráfico pesado a una velocidad vertiginosa, se comporta como un sólido deformable, diferente a los fluidos plásticos previamente mencionados, y a diferencia de los líquidos plásticos, tiene la habilidad de retornar a su forma original tras un desplazamiento; sin embargo, si superan su capacidad de carga, no se expande sino que se fractura (p.22-23)

Figura 9

Agrietamiento por bajas temperaturas



Nota. Agrietamiento por bajas temperaturas, causadas a temperaturas frías, esto provoca fisuras perpendiculares al eje del pavimento. Tomada del (Gargate & Huamani, 2018).

❖ **Comportamiento a temperatura ambiente**

Hervas (2022), señala que a temperaturas ambiente, el cemento asfáltico adopta dos metamorfosis: una líquida plástica y otra sólida elástica, garantizando así una adherencia impecable al asfalto. Además, esto revela su eficacia, ya que combina las bondades de ambos estados: al calentarse, se transforma en un fluido que envuelve al agregado, creando así una mezcla. Después de que el asfalto se enfríe, actúa como un vínculo entre los agregados, creando una mezcla sólida que, al final, se comporta como una danza visco-elástica (p.23).

❖ **Comportamiento al envejecimiento**

Hervas (2022), describe que la oxidación es una danza química del asfalto al interactuar con el entorno, transformando al cemento asfáltico en un cemento más frágil, provocando un endurecimiento desmedido de la carpeta asfáltica. Aunque esta reacción suele ser paulatina, puede acelerarse al ser sometida a temperaturas extremas. Las carpetas de asfalto con una longevidad considerable o una compactación deficiente son idóneas para la oxidación, pues su deterioro y la presencia de vacíos facilitan la entrada del oxígeno a la mezcla (p.23).

3.2.2.4. Indicadores volumétricos del asfalto compactado

Santos y Estrada (2021) señalan que un aspecto crucial al evaluar cómo se comporta el conjunto asfáltico es el equilibrio volumétrico entre ligante asfáltico y los materiales pétreos; o, más específicamente, los índices de compactación de la mezcla. Este capítulo aborda la evaluación volumétrica de las mezclas asfálticas en caliente (MAC), evaluando volúmenes de aire (V_a), vacíos en la mezcla mineral (VMA), porcentaje de ligante ocupado por aire (VFA) y contenido de ligante utilizable (Pbe), propiedades que permiten estimar su desempeño. Los índices descritos son aplicables tanto a mezclas de laboratorio como a muestras de pavimento in situ (p.50).

Gravedad específica seca Bulk (G_{sb})

El agregado total, que integra partículas gruesas, finas y filler, presenta diferentes valores de gravedad específica según su tipo. Para calcular la densidad específica del conjunto de agregados, se utiliza la ecuación que se presenta:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 \dots \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} \dots \dots + \frac{P_N}{G_N}}$$

Siendo:

G_{sb} = gravedad específica bulk global de la combinación de agregados.

P_1, P_2, P_n = proporción o peso correspondiente a cada agregado dentro de la mezcla.

G_1, G_2, G_n = Asfalto absorbido, porcentaje del peso del agregado.

Gravedad específica efectivo del agregado total (G_{se})

La firmeza efectiva del agregado se determina utilizando la gravedad específica teórica máxima mediante la ecuación que se muestra a continuación:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

Se define como:

G_{se} = propiedad que representa la gravedad específica efectiva de los agregados.

G_{mm} = propiedad que indica la gravedad específica máxima teórica de la mezcla.

P_{mm} = masa total de la mezcla asfáltica, equivalente al 100%.

P_b = proporción de ligante asfáltico presente en la mezcla.

G_b = propiedad que representa la gravedad específica del asfalto empleado.

Gravedad específica teórica máxima (G_{mm})

Para elaborar una mezcla asfáltica adecuada a un terreno específico, es fundamental conocer la masa volumétrica máxima teórica (G_{mm}), ya que permite calcular con precisión el contenido de espacios de aire en la mezcla. Una vez determinada la masa volumétrica efectiva del agregado (G_{se}) y ponderados los resultados obtenidos, se puede estimar la masa volumétrica máxima teórica en función de los distintos contenidos de

asfalto, considerando que la capacidad de absorción del asfalto permanece constante frente a las variaciones.

$$G_{mm} = \frac{100}{\frac{\% \text{ asf}}{G_{sa \text{ asf}}} + \frac{\% \text{ grueso}}{A} + \frac{\% \text{ fino}}{B} + \frac{\% \text{ polimero}}{C}}$$

Se define como:

G_{mm} = valor que representa la densidad máxima teórica de la mezcla asfáltica.

$\% \text{ asfalto}$ = cantidad de ligante asfáltico incorporado en la mezcla.

$G_{sa \text{ asf}}$ = gravedad específica correspondiente al asfalto utilizado.

$\% \text{ grueso, fino}$ = proporción de agregado grueso presente en la mezcla.

A, B, C = gravedad específica del agregado grueso, fino, polímero.

$\% \text{ polimero}$ = cantidad de polímero añadido a la mezcla.

Absorción del asfalto (P_{ba})

La absorción del asfalto se revela como una fracción del volumen del agregado, en vez de como una fracción del conjunto de la mezcla:

$$P_{ba} = 100 \times \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{SB} \times G_{se}} \times G_b$$

Siendo:

P_{ba} = cantidad de ligante asfáltico que es absorbido por los agregados, expresados en porcentaje.

G_{se} = valor que representa la gravedad específica efectiva de los agregados.

G_{sb} = valor que representa la gravedad específica bulk de los agregados.

G_b = densidad relativa del asfalto empleado

Porcentaje de asfalto efectivo (P_{be})

El asfalto útil representa la fracción del ligante asfáltico presente en la mezcla que cubre los agregados, sin incluir la parte que es absorbida por ellos. Esta fracción es la que realmente contribuye al comportamiento y desempeño de la composición bituminosa. Se determina usando la fórmula que sigue:

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} \times P_s$$

Se define como:

P_{be} = asfalto efectivo (% en peso de la mezcla)

P_b = asfalto total (% en peso de la mezcla)

P_{ba} = Asfalto absorbido, porcentaje del peso del agregado.

P_s = contenido de agregado, porcentaje en peso total de la mezcla.

vacíos en la mezcla mineral (VMA)

Los espacios en la mezcla mineral (VAM) se definen como los vacíos que se encuentran entre los granos del agregado en una mezcla bituminosa densificada. Estos espacios incluyen tanto los vacíos de aire como el ligante asfáltico disponible. Se determina a través de la ecuación:

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} \times P_s$$

Siendo:

VMA: porcentaje de vacíos en el agregado mineral.

G_{sb} : gravedad específica de los agregados.

G_{mb} : gravedad específica de la mezcla compactada.

P_s : porcentaje de agregados en peso respecto al total de la mezcla.

Este indicador es clave para evaluar la densidad de los agregados y la cantidad de espacio disponible para el asfalto en la mezcla.

Volúmenes de aire (Va)

El Va indica el volumen de aire existente entre las partículas del agregado en un material asfáltico densificado. Se determina utilizando la siguiente expresión:

$$Va = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$$

Se define como:

V_a: porcentaje de espacios vacíos de aire presentes en la mezcla compactada.

G_{mm}: valor que representa la gravedad específica máxima teórica de la mezcla, sin considerar vacíos de aire.

G_{mb}: valor que representa la gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada.

Este valor es fundamental para calcular la densidad de la mezcla y garantizar su durabilidad y resistencia al tránsito.

Porcentaje de vacíos ocupados por asfalto (VFA)

El VFA indica qué proporción de los vacíos dentro del agregado mineral está ocupada por el asfalto, sin considerar el asfalto retenido por los agregados. se determina mediante la siguiente fórmula:

$$VFA = 100x \frac{(VMA - V_a)}{VMA}$$

VFA: porcentaje de vacíos llenos de asfalto.

VMA: vacíos del agregado mineral en porcentaje del volumen total de la mezcla.

V_a: vacíos de aire en la mezcla compactada en porcentaje del volumen total.

Este valor refleja la cantidad de asfalto que realmente recubre los agregados, lo que es clave para garantizar la resistencia, cohesión y durabilidad de la mezcla asfáltica.

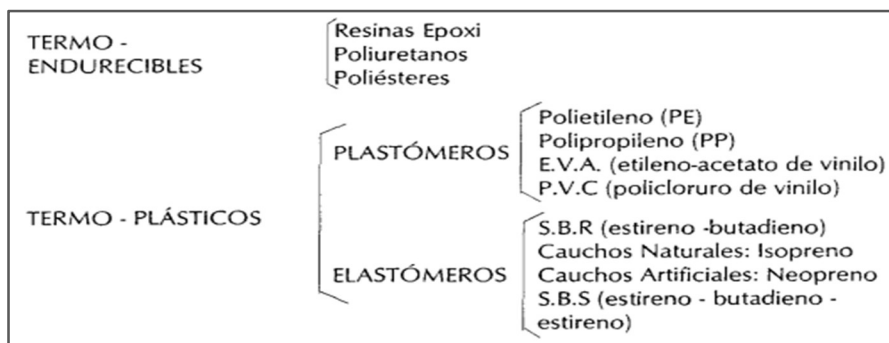
(p. 51-55)

3.2.3. Polímeros

Alarcón y Cárdenas (2021) sostienen que los polímeros son compuestos químicos compuestos por la unión de numerosas moléculas diminutas, denominadas monómeros. La vasta gama de compuestos poliméricos complica su categorización y ordenación; sin embargo, basándonos en su estructura y características, se categorizan para uso vial tal y como se manifiestan.

Figura 10

Clasificación de polímeros de uso vial



Nota. En la figura 10 se presentan las categorías de polímeros utilizados en aplicaciones viales. Fuente: (Alarcón & Cárdenas, 2021).

Polímeros elastómeros

Se trata de polímeros rígidos, usualmente insaturados, que al someterse a vulcanización desarrollan una red parcialmente entrecruzada, confiriéndoles propiedades elásticas; entre los cauchos más comunes en la vida diaria se encuentran:

SBR: Cauchos artificiales compuestos por un 25% de estireno y un 75% de butadieno; para potenciar su adhesión, se le añade un toque de ácido acrílico.

SBS: (estireno-butadieno-estireno) o caucho moldeable a temperatura ambiente. Este es el polímero predilecto para transformar los asfaltos, dado su excepcional rendimiento durante la longevidad de la mezcla.

EPDM: (polipropileno-monómero) se distingue por su flexibilidad y tolerancia al calor y a los químicos.

Polímeros plastómeros

Al expandirse, la longitud original se pierde al finalizar la solicitud. Poseen alteraciones parecidas a la plasticidad, carentes de elasticidad. Entre ellos hallamos:

EVA: Etileno –el vinilo acetato.

EMA: Etileno – un dúo químico entre etileno y acrilato de metilo.

PE: (Polietileno) destaca por su robustez a la tracción y su robustez térmica, además de su excelente adaptación a temperaturas frías.

PP: (Polipropileno) (p. 27-28)

La inclusión de polímeros dentro de las mezclas bituminosas influye en la viscosidad y en las condiciones térmicas de mezclado y compactación, transformando así el asfalto en una sinfonía de viscosidad y temperatura, permitiendo su uso a diversas temperaturas operativas (Hervas, 2022, p. 27)

3.2.3.1. Polímero EVA

Repsol (2023) afirma que los polímeros de etileno-acetato de vinilo (EVA) son termoplásticos formados por cadenas repetidas de acetato de vinilo y etileno que son más flexibles que el polietileno y tienen una gran adhesión, procesabilidad y adaptabilidad; a mayor contenido de acetato de vinilo, se incrementa la adherencia al asfalto, mejorando su desempeño bajo cargas, con una densidad de 0.948 g/cm³ y 28 % de acetato de vinilo según su ficha técnica.

3.2.4. *Diseño de mezclas asfálticas en caliente*

3.2.4.1. Ensayo y metodología Marshall

La metodología Marshall, desarrollada por Bruce Marshall en 1929 y perfeccionada por el Army Corps of Engineers en 1943, se emplea para compactar probetas cilíndricas de dimensiones normalizadas de 64 mm de altura por 102 mm de diámetro. Originalmente diseñada para agregados de hasta 1 pulgada y actualmente adaptable hasta 1 ½ pulgada. Esta metodología permite evaluar la calidad de diseño de especímenes compactados para establecer la gravedad específica, la capacidad de soporte y la deformabilidad, así como los volúmenes de vacíos (Ponce & Villa, 2020, p.19-20).

3.2.4.2. Estabilidad y flujo

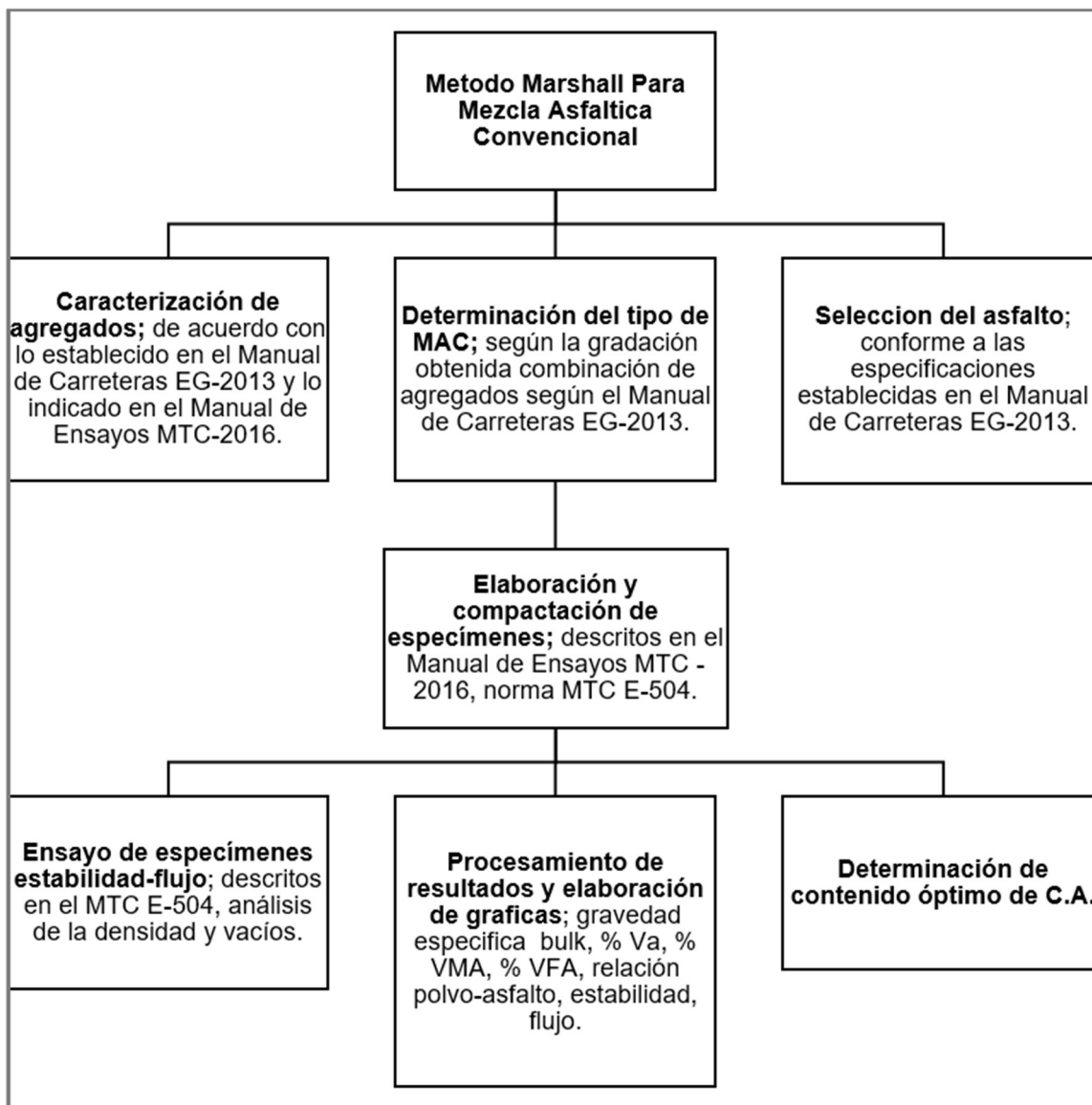
De acuerdo con la norma MTC E 504, el método Marshall examina la relación entre la densidad y los huecos en muestras compactadas para evaluar su estabilidad y fluidez. La carga máxima de la probeta durante la prueba de compresión se representa mediante la estabilidad, y la deformación vertical total que experimenta desde el principio hasta alcanzar esa carga se indica mediante la fluidez.

3.2.4.3. Método Marshall para mezcla asfáltica tradicional

Para la creación del método Marshall, se estableció una serie de 7 etapas esenciales orientadas a lograr una dosificación óptima de MA en caliente tradicionales.

Figura 11

Diagrama - Marshall para mezcla asfáltica tradicional



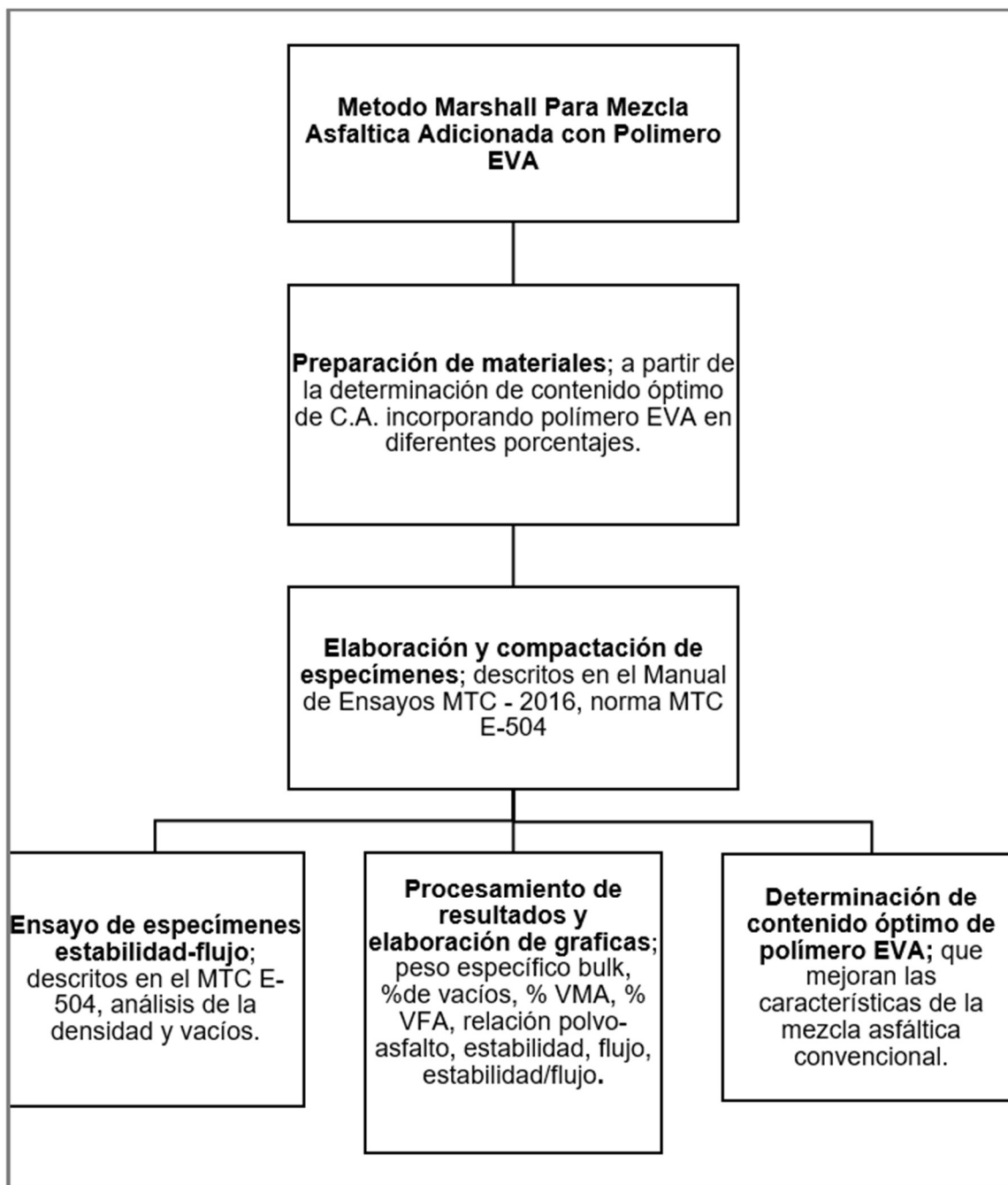
Nota. Se muestra el procedimiento Marshall de la mezcla asfáltica tradicional.

3.2.4.4. Método Marshall para MAM con polímero EVA.

Para perfeccionar el método Marshall en asfalto, se diseñó una secuencia de cinco etapas que permiten crear mezclas asfálticas moldeadas con polímero EVA.

Figura 12

Diagrama - Marshall para mezcla asfáltica modificada



Nota. Se puede observar el procedimiento de método Marshall para MAM.

3.2.4.5. Condiciones técnicas del diseño de la mezcla asfáltica:

Estabilidad.

La estabilidad de la carpeta asfáltica, según Bravo (2018), está relacionada con la capacidad para resistir deformaciones por el tráfico y el desplazamiento horizontal, determinada por la fricción de los componentes sólidos y la unión de material ligante. La fricción depende de la forma y textura de los agregados, mientras que la cohesión está ligada a las propiedades del asfalto. Una mezcla con estabilidad insuficiente puede generar ahuellamientos y deformaciones. A medida que se incrementa el ligante asfáltico, la mezcla se integra mejor y su estabilidad mejora hasta un punto óptimo; si se excede, la capa de asfalto entre los agregados es demasiado gruesa, dificultando su interbloqueo y reduciendo la estabilidad.

Tabla 2

Factores causales y consecuencias de la inestabilidad del pavimento

| Causas | Efectos |
|--|--|
| Contenido excesivo del ligante asfáltico | Ondulaciones, ahuellamiento y afloramiento o exudación |
| Demasiado arena de tamaño intermedio | Disminución de la resistencia durante la compactación |
| Agregados redondeados con baja angularidad | Ahuellamiento |

Nota. Se describen los factores que originan la inestabilidad del pavimento y los efectos que esta genera. Basado en (Bravo, 2018).

Durabilidad

La longevidad de la mezcla asfáltica está íntimamente vinculada a su habilidad para desmoronarse, a su habilidad para interactuar con el entorno y a su capacidad para mantenerse firme.

Las fracciones que integran la mezcla asfáltica no solo deben ajustarse a las medidas granulométricas, sino también a las normas de excelencia. Los agregados, especialmente en sus aristas, deben ser robustos y extremadamente resistentes.

Tabla 3

Poca durabilidad

| Causas | Efectos |
|--|---|
| Bajo contenido del ligante bituminoso | Rápida rigidez del asfalto y deterioro debido a la pérdida de los insumos. |
| Elevada proporción de vacíos causada por el diseño o por insuficiente compactación | El asfalto primero se endurece antes de agrietarse o desintegrarse. |
| Componentes granulares con alta absorción de agua (hidrofilicos) | El pavimento se desgasta o se descompone a medida que las películas de asfalto se separan del agregado. |

Nota. Se muestra las causas y consecuencias de poca durabilidad del pavimento. Tomado del (Bravo, 2018).

Impermeabilidad

La impermeabilidad de un material, está condicionada por la proporción de huecos en la mezcla compactada y su relación con la superficie, es su capacidad para impedir el paso del aire y el agua. Las mezclas porosas permiten el drenaje rápido del agua, pero un exceso de vacíos aumenta la oxidación del asfalto, situación que se reduce al usar asfaltos modificados.

Tabla 4*Factores que generan alta permeabilidad en mezclas asfálticas*

| Causas | Efectos |
|-----------------------------------|--|
| Insuficiente asfalto en la mezcla | Las capas de asfalto quedan demasiado finas, provocando un envejecimiento acelerado y degradación temprana del pavimento |
| Mezcla con exceso de vacíos | Permite que agua y aire penetren con facilidad, lo que origina oxidación y debilitamiento de la estructura |
| Compactación deficiente | Causa hundimientos o depresiones que facilitan la infiltración de agua y reducen la vida útil y la capacidad estructural de la mezcla. |

Nota. Se muestra las causas y los efectos de una mezcla demasiado permeable. Tomado del (Bravo, 2018).

Trabajabilidad

La eficiencia de la mezcla depende de su facilidad para la colocación y el proceso de compactación. La combinación no es especialmente eficaz cuando está saturada de relleno o áridos gruesos. Las mezclas saturadas de filler pueden volverse extremadamente rígidas, impidiendo su compactación adecuada.

Tabla 5*Mala trabajabilidad*

| Causas | Efectos |
|---|---|
| Escala máxima de partículas: colosal | Superficie rugosa, complicada su ubicación |
| Demasiado llenado ancho | La compactación puede resultar un desafío. |
| Muy frío en la mezcla | Sin recubrimiento, mezcla frágil; superficie rugosa, difícil de comprimir. La mezcla se desliza por la compactadora y se mantiene tierna o suave bajo la compactadora. |
| El exceso de arena de tamaño asequible. | Aspecto cristalino, extremadamente permeable |
| Muy escaso depósito de minerales | Amalgama viscosa, complicada de controlar; escasa longevidad. |

Nota. Se observa las causas y efectos de mala trabajabilidad de la mezcla. Tomado del (Bravo, 2018).

Resistencia a la fatiga

La tenacidad ante el agotamiento se considera la aptitud para aguantar la repetida flexión bajo las cargas del tráfico. Una mezcla con menos vacíos se traduce en una robusta resistencia al agotamiento.

Tabla 6*Bajo comportamiento a la fatiga*

| Causas | Efectos |
|--------------------------------------|--|
| Bajo cantidad del ligante asfáltico | Inquietud ante el agotamiento |
| Vacíos altos de diseño | La vejez precoz del asfalto, seguida por su fragilidad a causa del esfuerzo. |
| Falta de rigidez y elasticidad | El asfalto comienza a envejecer antes de sucumbir al desgaste. |
| Engrosamiento incorrecto del asfalto | Un exceso de flexión seguido de un agrietamiento provocado por el agotamiento. |

Nota. Se muestra bajo comportamiento a la fatiga en el pavimento. Tomado del (Bravo, 2018).

Comportamiento al deslizamiento

Se define como la capacidad de minimizar el resbalamiento de los neumáticos sobre la superficie del pavimento, especialmente en condiciones de humedad (Bravo, 2018, p. 24-27).

Tabla 7*Factores que reducen la resistencia al deslizamiento*

| Causas | Efectos |
|--|---|
| Cantidad excesiva de asfalto | Aparición de exudación y reducción de la fricción del pavimento |
| Agregado con granulometría inadecuada o textura deficiente | Superficie lisa, aumentando el riesgo de hidroplaneo |
| Agregado desgastado o pulido en la mezcla | Menor adherencia y disminución de la resistencia al deslizamiento |

Nota. La tabla resume las principales causas y consecuencias que afectan la resistencia al deslizamiento en pavimentos (Bravo, 2018).

3.2.4.6. Especificaciones para el diseño de mezclas asfálticas en caliente

Las piedras angulares en la creación de mezclas asfálticas radican en la elección de materiales, garantizando que alcancen los estándares mínimos de excelencia. Aquí se despliegan los detalles más cruciales.

Requerimiento del agregado grueso

Un agregado resistente debe satisfacer los requisitos establecidos en la Tabla 8 para condiciones de altitud de 2377 m.s.n.m.

Tabla 8

Requisitos para agregados gruesos según altitud

| Ensayos | Norma | Requerimiento | |
|--------------------------------------|-----------|----------------|----------|
| | | Altitud (msnm) | |
| | | ≤3000 | >3000 |
| Durabilidad (al sulfato de magnesio) | MTC E 209 | 18%max. | 15%max. |
| Abrasión los ángeles | MTC E 207 | 40%max. | 35%max. |
| adherencia | MTC E 517 | +95 | +95 |
| Índice de durabilidad | MTC E 214 | 35%min. | 35%min. |
| Partículas chatas y alargadas | ASTM 4791 | 10%max., | 10%max., |
| Caras fracturadas | MTC E 210 | 85/50 | 90/70 |
| Sales solubles totales | MTC E 219 | 0.5%max. | 0.5%max. |
| Absorción* | MTC E 206 | 1.0%max. | 1.0%max. |

Nota:

* En circunstancias especiales, solo se aceptará un porcentaje superior solo si se pueden propiedades de durabilidad de la mezcla asfáltica.

La adherencia de agregados gruesos para áreas mayores a 3000 msnm será evaluada por el desempeño de la mezcla asfáltica, como se describe en la subsección 430.02.

La notación “85/50” señala que el 85% del agregado grueso tiene una cara fracturada y el 50% tiene dos caras fracturadas.

Tomado de especificaciones técnicas generales para la construcción EG-2013 - Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Requerimiento del agregado fino

La tabla 9 enumera el material fino que debe utilizarse en la mezcla asfáltica para condiciones a 2377 m s.n.m.

Tabla 9

Requisitos para agregados finos según altitud

| Ensayos | Norma | Requerimiento | |
|--------------------------------------|--------------|----------------|----------|
| | | Altitud (msnm) | |
| | | ≤3000 | >3000 |
| Equivalente de arena | MTC E 114 | 60 | 70 |
| Angularidad del agregado fino | MTC E 222 | 30 | 40 |
| Azul de metileno | AASHTO TP 57 | 8 máx. | 8 máx. |
| Índice de plasticidad (malla N° 40) | MTC E 111 | NP | NP |
| Durabilidad (al sulfato de magnesio) | MTC E 209 | - | 18% máx. |
| Índice de durabilidad | MTC E 214 | 35 min. | 35 min. |
| Índice de plasticidad (malla N°200) | MTC E 111 | 4 máx. | NP |
| Sales solubles totales | MTC E 219 | 0.5%max. | 0.5%max. |
| Absorción** | MTC E 205 | 0.5%max. | 0.5%max. |

Nota:

** como excepción, solo se aceptarán porcentajes mayores solo si se garantizan las características de durabilidad de la mezcla asfáltica.

La adherencia de agregado grueso para áreas mayores a 3000 msnm será evaluada mediante la performance de la mezcla asfáltica según lo señalado en la subsección 430.02.

Tomado de especificaciones técnicas generales para la construcción EG-2013 - Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Requerimiento Granulométrico MAC - 02

La mezcla fue diseñada con la gradación MAC – 02, la dimensión máxima nominal del agregado empleado es ½”.

Tabla 10

Especificación granulométrica MAC-02

| Tamiz | MAC-1 (% que pasa) | MAC-2 (% que pasa) | MAC-3 (% que pasa) |
|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 25 mm (1") | 100 | – | – |
| 19 mm (3/4") | 80–100 | 100 | – |
| 12,5 mm (1/2") | 67–85 | 80–100 | – |
| 9,5 mm (3/8") | 60–77 | 70–88 | 100 |
| 4,75 mm (N°4) | 43–54 | 51–68 | 65–87 |
| 2,0 mm (N°10) | 29–45 | 38–52 | 43–61 |
| 425 µm (N°40) | 14–25 | 17–28 | 16–29 |
| 180 µm (N°80) | 8–17 | 8–17 | 9–19 |
| 75 µm (N°200) | 4–8 | 4–8 | 5–10 |

Nota. En la tabla 10 se visualiza el requerimiento granulométrico MAC-2 de acuerdo al (MTC, 2013).

Selección del tipo de ligante asfáltico

Para las mezclas bituminosas en caliente, el ligante asfáltico se clasificará tomando en cuenta sus propiedades de penetración y viscosidad absoluta, seleccionándose de acuerdo con el clima predominante en la zona de ejecución.

Tabla 11*Elección de la clase de material del ligante bituminoso*

| De acuerdo con la temperatura media anual de la zona, se recomienda emplear | | | |
|---|---------------|----------------|----------------------------|
| ≥ 24°C | 15 - 24°C | 5 - 15°C | < 5°C |
| Grados 40- 50 ó | Grados 60- 70 | Grados 85- 100 | Asfalto |
| 60- 70 ó | | 120 - 150 | Modificado con Polímero |
| Modificado | | | |

Nota. La tabla 11 presenta la temperatura media anual utilizada para seleccionar el tipo de ligante asfáltico. Adaptado de (MTC, 2013).

Tabla 12*Requerimientos del ligante asfáltico por grado de penetración*

| Tipo / Ensayo | PEN 40- 50 | PEN 60- 70 | PEN 85- 100 | PEN 120- 150 | PEN 200- 300 |
|--|---------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Pruebas sobre el material bituminoso | | | | | |
| Penetración a 25°C, 100 g, 5 s (0,1 mm) | 40–50 | 60–70 | 85–100 | 120–150 | 200–300 |
| Punto de inflamación (°C) | 232 | 232 | 232 | 218 | 177 |
| Ductilidad a 25°C, 5 cm/min (cm) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Solubilidad en tricloroetileno (%) | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 |
| Índice de penetración (susceptibilidad térmica) | -1 / +1 | -1 / +1 | -1 / +1 | -1 / +1 | -1 / +1 |
| Ensayo de mancha (Oliensies) | | | | | |
| Nafta estándar | Neg. | Neg. | Neg. | Neg. | Neg. |
| Nafta-xileno (% xileno) | Neg. | Neg. | Neg. | Neg. | Neg. |
| Heptano-xileno (% xileno) | Neg. | Neg. | Neg. | Neg. | Neg. |
| Pruebas sobre residuo de película delgada (163°C, 3,2 mm, 5 h) | | | | | |
| Pérdida de masa (%) | 0,8 | 0,8 | 1,0 | 1,3 | 1,5 |
| Penetración retenida (%) | 55+ | 52+ | 47+ | 42+ | 37+ |
| Ductilidad del residuo a 25°C, 5 cm/min (cm) | 50 | 75 | 100 | 100 | 100 |

Nota:

(1), (2) ensayos opcionales para su evaluación complementaria del comportamiento geológico en el material bituminoso indicado.

(3) si la ductilidad es menor de 100 cm, el material se aceptará si la ductilidad a 15,5°C es mínimo 100 cm a la velocidad de 5 cm/min.

Tomado de especificaciones técnicas generales para la construcción EG-2013 - Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Tabla 13

Requerimientos del ligante asfáltico según viscosidad

| Características | AC-2,5 | AC-5 | AC-10 | AC-20 | AC-40 |
|--|----------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| Viscosidad absoluta a 60°C (poises) | 250 ± 50 | 500 ± 100 | 1.000 ± 200 | 2.000 ± 400 | 4.000 ± 800 |
| Viscosidad cinemática a 135°C (cSt, mínimo) | 80 | 110 | 150 | 210 | 300 |
| Penetración a 25°C, 100 g, 5 s (mínimo, dmm) | 200 | 120 | 70 | 40 | 20 |
| Punto de inflamación (COC, °C, mínimo) | 163 | 177 | 219 | 232 | 232 |
| Solubilidad en tricloroetileno (% masa, mínimo) | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 |
| Pruebas sobre el residuo del ensayo de película fina | | | | | |
| Viscosidad absoluta a 60°C (poises, máximo) | 1.25 | 2.5 | 5 | 10 | 20 |
| Ductilidad a 25°C, 5 cm/min (cm, mínimo) | 100 | 100 | 50 | 20 | 10 |
| Ensayo de mancha (Oliensies) | | | | | |
| Nafta estándar | Neg. | Neg. | Neg. | Neg. | Neg. |
| Nafta-xileno (% xileno) | Neg. | Neg. | Neg. | Neg. | Neg. |
| Heptano-xileno (% xileno) | Neg. | Neg. | Neg. | Neg. | Neg. |

Nota: (1) Los porcentajes de solvente se determinarán únicamente cuando el ensayo evidencie presencia positiva de mancha. Adaptado de (MTC-2013).

Tabla 14*Requerimientos del ligante asfáltico modificado (tipo I, elastómero)*

| Características | Unidad / Norma | I-A | I-B | I-C | I-D |
|--|-------------------|-------------|--------|-------|-------|
| Pruebas sobre el producto original | | | | | |
| Penetración (25°C, 100 g, 5 s) | MTC E-304 | 100–150 | 75–100 | 50–75 | 40–75 |
| Viscosidad absoluta a 60°C (poise) | MTC E-308 | 1.250–2.500 | – | 5 | 5 |
| Viscosidad cinemática a 135°C (cst) | MTC E-310 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Punto de inflamación (COC, °C) | MTC E-303 | 232 | 232 | 232 | 232 |
| Solubilidad en tricloroetileno (%) | MTC E-302 | 99 | 99 | 99 | 99 |
| Separación, diferencia punto de ablandamiento (°C) | MTC E-307 / E-319 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 |
| Recuperación elástica a 25°C (%) | ASTM D-6084 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Recuperación elástica a 5°C (%) | ASTM D-6084 | 50 | – | – | – |
| Punto de ablandamiento (anillo y bola, °C) | MTC E-307 | 45 | 50 | 60 | 60 |
| Pruebas en residuo de película fina y rotatoria | | | | | |
| Recuperación elástica 25°C, 10 cm elongación (%) | ASTM D-6084 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Penetración a 4°C, 200 g, 60 s (dmm) | MTC E-304 | 20 | 15 | 13 | 10 |
| Separación, diferencia punto de ablandamiento (°C) | MTC E-307 | ≤10 | ≤10 | ≤10 | ≤10 |

Nota:

(*) Asfalto modificado con polímero de tipo elastómero.

(1) Se puede emplear horno de película fina convencional; en caso de discrepancia, prevalece el método de película fina rotatoria.

(**) Para polímeros insolubles en tricloroetileno, opcionalmente se puede usar ASTM D-5546. Fuente: Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción EG-2013 – Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Requerimiento del filler

Se añade dentro de las mezclas asfálticas, el filler o polvo mineral se incorpora para ajustar la composición de tamaños de la fracción fina. Los insumos utilizados incluyen cal hidratada, cemento Portland, polvo de roca, entre otros. La cual debe cumplir con la norma AASHTO M303, y los demás materiales, la ASTM D-242.

Tabla 15

Requerimiento del filler mineral

| Tamaño de tamiz | Porcentaje retenido/pasante (%) |
|-----------------|---------------------------------|
| 1,18 mm (N°16) | 100 |
| 600 µm (N°30) | 97-100 |
| 300 µm (N°50) | 95-100 |
| 75 µm (N°200) | 70 -100 |

Nota. Las necesidades de relleno se indican en la Tabla 15, derivada de la norma ASTM D-242, que constituye la guía de referencia para el polvo mineral empleado en mezclas bituminosas.

Requerimientos volumétricos de la mezcla asfáltica en caliente

Según el tipo de combinación especificado en el diseño del proyecto, las mezclas asfálticas deben tener características volumétricas que garanticen su calidad y cumplan con los requerimientos técnicos especificados para el asfalto mezclado.

Tabla 16

Requisitos de diseño para mezclas de pavimento asfáltico

| Parámetro de diseño | Clase A | Clase B | Clase C |
|--------------------------------|---------|---------|---------|
| Compactación (golpes por lado) | 75 | 50 | 35 |

| | | | |
|--|------------------|------------------|------------------|
| Estabilidad mínima | 8,15 kN (831 kg) | 5,44 kN (555 kg) | 4,53 kN (462 kg) |
| Flujo (0,01" / 0,25 mm) | 8 – 14 | 8 – 16 | 8 – 20 |
| Vacíos de aire (%) | 3 – 5 | 3 – 5 | 3 – 5 |
| Vacíos en el agregado mineral | Ver tabla 11 | Ver tabla 11 | Ver tabla 11 |
| Inmersión – Compresión (MTC E-518) | | | |
| Resistencia mínima a la compresión (Mpa) | 2,1 | 2,1 | 1,4 |
| Resistencia retenida mínima (%) | 75 | 75 | 75 |
| Relación polvo/asfalto | 0,6 – 1,3 | 0,6 – 1,3 | 0,6 – 1,3 |
| Relación estabilidad/flujo (kg/cm) | 1700 – 4000 | 1700 – 4000 | 1700 – 4000 |
| Resistencia en tracción indirecta (AASHTO T 283) | ≥ 80% | ≥ 80% | ≥ 80% |

Nota:

(1) En Perú, los tramos construidos presentan un rango de 2% a 4%, siendo recomendable acercarse al 2% en zonas frías sobre 3000 msnm.

(2) Relación entre el porcentaje en peso del agregado que pasa por el tamiz 0,075 mm y el contenido efectivo de asfalto, respecto al peso total de la mezcla.

(3) Para climas fríos, se recomienda que la relación estabilidad/flujo sea lo más baja posible.

(4) El índice de compatibilidad mínimo es 5, calculado como: $\frac{1}{GEB\ 50-G\ 5}$

donde GEB 50 Y GEB 5, son las gravedades específicas netas de las briquetas a 50 y 5 golpes (Ministerio de transportes y comunicaciones, 2013).

Tabla 17*Valor mínimo admisible de vacíos del agregado mineral (VMA)*

| Tamaño de Tamiz | Vacíos mínimos (%) según método |
|------------------|---------------------------------|
| 2,36 mm (N°8) | Marshall: 21 |
| 4,75 mm (N°4) | Marshall: 18 |
| 9,50 mm (3/8") | Marshall: 16, Superpave: 15 |
| 12,5 mm (1/2") | Marshall: 15, Superpave: 14 |
| 19,0 mm (3/4") | Marshall: 14, Superpave: 13 |
| 25,0 mm (1") | Marshall: 13, Superpave: 12 |
| 37,5 mm (1 1/2") | Marshall: 12, Superpave: 11 |
| 50,0 mm (2") | Marshall: 11,5, Superpave: 10,5 |

Nota. La tabla 17 presenta los requerimientos mínimos de porosidad en los áridos minerales. Adaptado del (MTC, 2013).

3.3. Definición de términos

- **Polímero:** La incorporación de polímeros a una mezcla bituminosa modifica el rango de viscosidad-temperatura y la hace más manejable a diferentes temperaturas de funcionamiento, lo que permite que el asfalto sea termoplástico o no termoplástico. Esto afecta tanto a la viscosidad como a la temperatura de mezcla y compactación (Hervas, 2022, p.27).
- **Polímero EVA:** Son polímeros termoplásticos formados por unidades repetitivas de etileno y acetato de vinilo. Presentan un comportamiento más elastomérico que el polietileno y destacan por su elevada manejabilidad, flexibilidad y compatibilidad

con otros materiales. La presencia de grupos polares en su cadena molecular mejora notablemente la cohesión y la adhesión, favoreciendo que la combinación de este polímero con el asfalto soporte de manera más eficiente las cargas y esfuerzos a los que se somete (Repsol, 2023).

- **Propiedades mecánicas:** Las cualidades que caracterizan la reacción de un material ante las fuerzas que actúan sobre él se conocen como propiedades mecánicas. A la hora de elegir un material para la construcción de un objeto, estas características son fundamentales, ya que determinan cómo se comportará el material bajo diversas cargas y circunstancias (Huillcapoma & Figueroa, 2022, p.18).
- **Mezclas asfálticas bituminosas:** Composición de materiales granulares, asfalto y modificadores, aplicada a altas temperaturas y diseñada según especificaciones técnicas, empleada como capa de rodadura en pavimentos flexibles (Hervas, 2022, p.16).
- **Agregados pétreos:** Son materiales granulares inertes que se utilizan en la producción de bienes duraderos como el mortero y el hormigón, generalmente junto con aglutinantes asfálticos o hidráulicos (Cáceres, 2024, p.28).
- **Asfalto:** Sustancia aglutinante cuyo color varía entre el marrón oscuro y el negro y que se compone principalmente de betún natural o betún obtenido del refinado del petróleo. Se encuentra en el petróleo crudo en diferentes cantidades (Glosario de terminología utilizada frecuentemente en infraestructuras viarias, 2018, p. 4).
- **Asfalto modificado:** Se denomina así al asfalto al que se incorporan polímeros o aditivos con el propósito de optimizar sus características físicas y mecánicas, reforzando su resistencia frente a cambios de temperatura y la humedad (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018, p. 5).
- **Concreto asfáltico:** Los agregados, tanto los robustos como los delicados, se entrelazan con bituminoso y, si es necesario, se añaden aditivos para potenciar su

comportamiento. Es empleada como base o soporte y constituye la arquitectura del suelo (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018, p. 8).

- **Ensayo Marshall:** Método empleado para determinar la dosificación óptima del ligante asfáltico y analizar diferentes indicadores de calidad que permiten evaluar el comportamiento de una mezcla bituminosa (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018, p. 11).
- **Estabilidad:** La capacidad del asfalto para moldearse bajo la presión del tráfico y resistir el movimiento horizontal, se basa en su elasticidad y solidez interna. La interacción superficial se asocia con la forma y la textura de los elementos; la cohesión se entrelaza con las particularidades del vínculo. Si esta propiedad no se ajusta a la mezcla asfáltica, surgen problemas de adherencias, fugas y demás (Bravo, 2018, p.24).
- **Impermeabilidad:** Habilidad de una superficie asfáltica para impedir que el agua y el aire entren o atraviesen su estructura (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018, p. 14).
- **Viscosidad:** Indicador de la facilidad con que el asfalto se deforma bajo carga; se emplea para evaluar su consistencia (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018, p. 23).
- **Ahuellamiento:** Hundimientos o canales en la carretera que se generan por la compactación o el movimiento de los materiales ocasionados por el paso continuo de vehículos (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018, p. 4).

IV. Metodología

4.1. Tipo y nivel de investigación

Tipo de investigación

La presente tesis se enmarca en una investigación aplicada, dado que se orienta al uso del conocimiento científico con fines prácticos, con el objetivo de resolver problemas específicos o mejorar situaciones existentes (Maldonado et al., 2023).

Nivel o alcance de investigación

Esta investigación corresponde al nivel explicativo, ya que se enfoca en identificar las causas de los problemas, analizar las relaciones de causa y efecto entre las variables y plantear hipótesis que expliquen de qué manera las variables independientes impactan en la variable dependiente (Del Rio, 2018).

Diseño de la investigación

Esta tesis se desarrolla bajo un diseño experimental, lo que posibilita la alteración deliberada de una o varias variables independientes para evaluar su efecto sobre la variable dependiente (Hernandez & Mendoza, 2018).

4.2. Ámbito temporal y espacial

Temporal

El desarrollo de los ensayos y la obtención de resultados se efectuó entre junio y septiembre de 2025.

Espacial

Con el fin de obtener datos pertinentes, este estudio se limita espacialmente en la ciudad de Abancay, región de Apurímac.

4.3. Población y muestra

Población

Condori (2020) afirma que todas las unidades de análisis disponibles en el área de estudio conforman la población (p. 3). Para determinar la población en esta investigación se utilizó el diseño Marshall para mezclas asfálticas calientes, que establece un mínimo de

tres muestras por % de asfalto y se representa mediante probetas cilíndricas de 64 mm × 102 mm de mezclas tradicionales y mezclas que contienen polímero EVA.

Muestra

Condori (2020) señala que la muestra es un subconjunto representativo de la población que permite generalizar los resultados (p. 3). En este estudio se trabajó con 55 probetas cilíndricas: 23 de mezclas convencionales (asfalto 4.5%–6.5%) y 32 de mezclas modificadas con polímero EVA (2%–5%), todas ensayadas mediante Marshall para cargas pesadas.

Tabla 18

Cantidad de muestras de asfalto convencional y modificado

| Descripción | | Dosificación EVA (%) | Cantidad |
|----------------------------------|---------------------|----------------------|-----------|
| Mezcla Convencional | % Optimo de Asfalto | 0% | 15 |
| | MAC +0.0% EVA | 0% | 4 |
| Ensayo Marshall | MAC +2.0% EVA | 2% | 4 |
| | MAC +3.0% EVA | 3% | 4 |
| MTC E 504 | MAC +4.0% EVA | 4% | 4 |
| | MAC +5.0% EVA | 5% | 4 |
| Ensayo Tracción Indirecta | MAC +0.0% EVA | 0% | 4 |
| | MAC +2.0% EVA | 2% | 4 |
| NLT-346/90 (Ensayo brasileño) | MAC +3.0% EVA | 3% | 4 |
| | MAC +4.0% EVA | 4% | 4 |
| | MAC +5.0% EVA | 5% | 4 |
| TOTAL | | | 55 |

Nota. La Tabla 18 indica el número de muestras analizadas para el asfalto tradicional y el asfalto modificado con EVA.

Muestreo

El presente estudio empleó un muestreo no probabilístico de tipo intencional, dado que los elementos se seleccionan de manera deliberada según el criterio del investigador, aprovechando el conocimiento previo sobre las particularidades del grupo estudiado (Reales et al., 2022, pág. 683).

4.4. Instrumentos

Para llevar a cabo esta investigación se utilizó la observación directa. Según Duana y Hernández (2020), la observación representa un elemento fundamental en cualquier procedimiento investigativo, puesto que posibilita al investigador recopilar la mayor cantidad de información posible, siempre con un propósito específico y claramente definido. Esto implica que la observación debe ser planificada de manera cuidadosa para asegurar que se enfoquen correctamente los aspectos que se pretenden examinar (p. 3-4).

Por observación directa se revisaron los ensayos de la mezcla asfáltica con polímero EVA (estabilidad, fluidez y comprensión) para asegurar que los resultados cumplieran con las especificaciones técnicas correspondientes.

El instrumento escogido para recopilar datos será la ficha o guía de seguimiento de indicadores, la cual documentará minuciosamente la información que evidencie los avances en el objeto de estudio, comparando los resultados obtenidos entre las mezclas asfálticas modificadas con polímero y las tradicionales (Gargate & Huamani, 2018, p.58).

El laboratorio INGEOMAT E.I.R.L. suministró hojas de cálculo para la recopilación de datos, las cuales están basadas en la norma NTP del MTC, y normas internacionales reconocidas, como AASHTO y ASTM.

4.5. Procedimientos

El objetivo principal fue evaluar la resistencia de las mezclas bituminosas con polímero EVA mediante la descripción de la tendencia de sus resultados. Se incluyó revisión bibliográfica, control de calidad de insumos, diseño de mezclas convencionales y modificadas, ensayos de laboratorio, interprete de resultados, y desarrollo de conclusiones.

Ensayos de control de calidad de los agregados

Los controles de calidad permiten garantizar los materiales empleados en mezclas asfálticas cumplan con los requisitos de tamaño, forma, limpieza y resistencia, adaptándose a las condiciones de altitud de la ciudad, según lo indicado en la tabla 423-01-02 del MTC.

Elaboración de muestras

Se analizaron cinco niveles de proporción de ligante asfáltico en la mezcla tradicional y cuatro niveles de polímero EVA en las mezclas con cemento asfáltico en su proporción óptima.

Preparación de mezcla asfáltica

Después de elegir los agregados, estos se secan en un horno entre 105 °C y 110 °C y luego se separan por tamaños mediante tamizado en seco, obteniendo así las siguientes fracciones: (3/4" a 1/2"), (1/2" a 3/8"), (3/8" a N° 4), y las que pasan a través del tamiz N°4.

La temperatura para calentar el cemento asfáltico y compactar la mezcla se define mediante su carta de viscosidad, que establece un rango de 135 a 160 °C; en esta investigación en particular, se aplicó 150 °C, como se indica en el anexo 3, con el fin de garantizar que la mezcla alcanzara la viscosidad óptima para su colocación y compactación.

Se preparan briquetas individuales o en lotes de hasta cuatro, con un peso aproximado de 1200 g por unidad. En las mezclas con polímero EVA, éste se combina primero con el cemento asfáltico calentado; luego se integran los agregados, mezclando durante 60 s para una briqueta y 120 s si se elaboran múltiples briquetas a la vez.

Compactación de mezclas bituminosas

La mezcla asfáltica elaborada se coloca en moldes previamente calentados, junto con el mazo de compactación, a temperaturas entre 90 y 150 °C. Se dispone papel impermeable en la base, se vierte la mezcla (\approx 1200 g), se asegura el molde sobre el

pedestal y se aplican 75 impactos por cada cara, de acuerdo con los criterios de tránsito pesado.

Procedimiento del ensayo Marshall

Para el ensayo, las briquetas deben alcanzar temperatura ambiente y ser evaluadas dentro de las 24 horas siguientes a su compactación. A continuación, se describen los pasos del procedimiento experimental.

Determinación gravedad específica Bulk

El ensayo permite calcular el volumen del espécimen considerando la diferencia entre su peso con parafina en aire y sumergida en agua a 25 °C. Conforme al MTC, se utiliza la norma E-514 cuando la absorción es inferior al 2% y la norma E-506 cuando la absorción excede este umbral.

Para continuar con los ensayos, se registran las dimensiones del espécimen, 04 lados de altura y 02 lados de diámetro. Luego, se sumerge cada espécimen en agua a 25 °C para determinar su peso específico de la biqueta, y se usa parafina para recubrir el espécimen y evitar la absorción de agua durante el ensayo.

Ensayo de estabilidad y flujo

Para garantizar la precisión en los ensayos de estabilidad y fluencia, las pastillas se sumergen en un baño maría a 60 °C por 30 a 40 minutos, tiempo tras el cual se colocan en el equipo Marshall para evaluar su comportamiento mecánico.

Se extrae un espécimen del baño de agua, se seca su superficie con una franela, se coloca el espécimen centrado en el molde del equipo de ensayo, se acopla la parte superior del cabezal y se somete a carga, todo ello en un máximo de 30 segundos desde su extracción del agua. Se registra el valor de estabilidad cuando se alcanza la carga máxima y el flujo registrado en el dial de la pantalla del equipo.

4.6. Análisis de datos

De acuerdo con Hernández y Mendoza (2018), las hipótesis formuladas deben ser sometidas a análisis estadístico, considerando la posibilidad de generalizar los resultados

obtenidos a partir de los datos, apoyándose en técnicas de organización como tablas y representaciones gráficas (p. 312). Para este propósito, se empleó el análisis ANOVA (Análisis de Varianza) para evaluar la hipótesis relacionada con las mezclas asfálticas modificadas con polímero EVA, utilizando los datos procesados mediante software estadístico como IBS, SPSS y Excel.

La técnica de ANOVA se empleó para analizar estadísticamente las hipótesis, comparando los promedios de tres o más grupos y determinando si existen diferencias significativas. Para que el análisis fuera válido, se comprobó que los datos de cada grupo tuvieran distribución normal mediante la prueba de Shapiro-Wilk y que las varianzas fueran homogéneas, usando la prueba de Levene. Tras un análisis ANOVA que indica la existencia de diferencias generales entre varios grupos, se emplea la prueba post hoc de Tukey para determinar cuáles pares de grupos presentan diferencias significativas entre sí.

4.6.1. Prueba de Hipótesis

4.6.1.1. Prueba estadística aplicado a la HE1

Verificación de normalidad

Tabla 19

Prueba de normalidad (S-W) HE1

| Grupos | % de polímero EVA | S-W | | |
|-------------|-------------------|-------------|----|-------|
| | | Estadístico | gl | Sig. |
| Estabilidad | 0% | 0.986 | 4 | 0.938 |
| | 2% | 0.811 | 4 | 0.123 |
| | 3% | 0.938 | 4 | 0.641 |
| | 4% | 0.919 | 4 | 0.532 |
| | 5% | 0.937 | 4 | 0.637 |

Nota. Los resultados obtenidos para la estabilidad fueron procesados en SPSS.

El análisis de normalidad presentado en la Tabla N.º 19 indica que, para todos los porcentajes analizados, los valores obtenidos exceden el umbral de significancia del 5 %, lo que respalda que se cumple la condición de normalidad.

Evaluación de la homogeneidad de las varianzas

Tabla 20

Prueba de homogeneidad de varianzas – HE1

| Estadístico de Levene | gl1 | gl2 | Sig. |
|-----------------------|-----|-----|-------|
| 2.726 | 4 | 15 | 0.069 |

Nota. Los resultados fueron evaluados en SPSS.

El análisis de homogeneidad de varianzas presentado en la Tabla N° 20 muestra que el valor de Sig. = 0,069 es superior al nivel de significancia del 5 %, lo que indica que se cumple la condición de igualdad de varianzas.

Estadísticos descriptivos

La tabla 21 muestra los resultados estadísticos de la MA y desviación típica, utilizados para evaluar la variabilidad y las calificaciones de estabilidad del polímero EVA en diferentes porcentajes.

Tabla 21

Promedio y Desviación estándar de la estabilidad

| % de polímero EVA | Media | Desv.Est. | 95% del intervalo de confianza para la media | |
|-------------------|---------|-----------|--|-----------|
| | | | Lim. Inf | Lim. Sup. |
| 0% | 1272.40 | 9.069 | 1257,966 | 1286,829 |
| 2% | 1342.57 | 8.306 | 1329,353 | 1355,787 |
| 3% | 1364.40 | 5.973 | 1354,895 | 1373,904 |
| 4% | 1224.80 | 15.856 | 1199,574 | 1250,036 |
| 5% | 880.98 | 6.951 | 869,916 | 892,039 |

Nota. Los resultados fueron calculados mediante el SPSS.

Prueba de Anova

H_0 : No existe una mejoría en la propiedad de estabilidad de la MAM con polímero EVA.

H_1 : Si existe una mejoría en la propiedad de estabilidad de la MAM con polímero EVA

Tabla 22

Prueba de (ANOVA) aplicado a la estabilidad – HE1

| | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
|------------------|-------------------|----|------------------|---------|-------|
| Entre grupos | 614142.01 | 4 | 153535.50 | 1577.42 | 0.000 |
| Dentro de grupos | 1459.99 | 15 | 97.33 | | |
| total | 615602.01 | 19 | | | |

Nota. Los resultados fueron calculados mediante el SPSS.

El análisis ANOVA presentado en la tabla 22 confirma que la adición de polímero EVA produce aumentos estadísticamente significativos en la estabilidad de las mezclas asfálticas. El valor de significancia obtenido (Sig. = 0,000) es inferior al nivel de significación del 5 %, lo que confirma la relevancia estadística de las diferencias observadas.

Prueba Post Hoc (Tukey).

Tabla 23

Prueba de Tukey para medias de Estabilidad – HE1

| % de polímero EVA | N | Subconjunto para alfa=0.05 | | | | |
|-------------------|---|----------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 5% | 4 | 880.98 | | | | |
| 4% | 4 | | 1224.80 | | | |
| 0% | 4 | | | 1272.40 | | |
| 2% | 4 | | | | 1342.57 | |
| 3% | 4 | | | | | 1364.40 |

Nota. Los resultados fueron calculados mediante el SPSS.

El análisis post hoc de Tukey, presentado en la Tabla 23, evidencia que, con un nivel de confianza del 95 %, existen diferencias estadísticamente significativas en la estabilidad de las mezclas bituminosas, destacándose un incremento del desempeño al adicionar un 3 % de polímero EVA.

4.6.1.2. Prueba estadística aplicado a la HE2

Verificación de normalidad

Tabla 24

Prueba de normalidad (S-W) HE2

| Grupos | % de polímero EVA | Estadístico | S-W | |
|--------|-------------------|-------------|-----|-------|
| | | | gl | Sig. |
| Flujo | 0% | 0.946 | 4 | 0.689 |
| | 2% | 0.993 | 4 | 0.972 |
| | 3% | 0.827 | 4 | 0.161 |
| | 4% | 0.927 | 4 | 0.577 |
| | 5% | 0.971 | 4 | 0.850 |

Nota. Los resultados fueron calculados mediante el SPSS.

El análisis de normalidad presentado en la tabla N° 24 demuestra que el valor “Sig.” es mayor al nivel de significancia del 5%, lo que confirma el cumplimiento de la normalidad para todos los porcentajes evaluados.

Evaluación de la homogeneidad de las varianzas

Tabla 25

Prueba de homogeneidad de varianzas – HE2

| Estadístico de Levene | gl1 | gl2 | Sig. |
|-----------------------|-----|-----|-------|
| 0.677 | 4 | 15 | 0.618 |

Nota. Los resultados fueron calculados mediante el SPSS.

La Tabla N.° 25 presenta los resultados de la prueba de homogeneidad de varianzas, mostrando un valor de $p = 0,618$, el cual supera el nivel de significancia $\alpha = 0,05$. Esto indica que no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula, confirmando que las varianzas de los datos son uniformes.

Estadísticos descriptivos

Los estadísticos descriptivos consignados en la tabla 26 permiten analizar la variabilidad y las calificaciones del flujo de la MAM con polímero EVA en los porcentajes evaluados.

Tabla 26

Promedio y Desviación estándar del Flujo

| % de polímero EVA | Media | Desv.Est. | 95% del intervalo de confianza para la media | |
|-------------------|-------|-----------|--|-----------|
| | | | Lim. Inf. | Lim. Sup. |
| 0% | 13.25 | 0.264 | 12.829 | 13.671 |
| 2% | 12.95 | 0.129 | 12.745 | 13.155 |
| 3% | 12.90 | 0.141 | 12.675 | 13.125 |
| 4% | 14.20 | 0.216 | 13.856 | 14.544 |
| 5% | 16.43 | 0.171 | 16.153 | 16.697 |

Nota. Los resultados fueron calculados mediante el SPSS.

Prueba de Anova

H_0 : No existe una mejoría en la propiedad del flujo de la MAM con polímero EVA.

H_1 : Si existe una mejoría en la propiedad del flujo de la MAM con polímero EVA

Tabla 27

Prueba ANOVA del Flujo- HE2

| | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
|------------------|-------------------|----|------------------|--------|-------|
| Entre grupos | 35.122 | 4 | 8.780 | 240.56 | 0.000 |
| Dentro de grupos | 0.548 | 15 | 0.037 | | |
| total | 35.669 | 19 | | | |

Nota. Los resultados fueron calculados mediante el SPSS.

El análisis ANOVA presentado en la Tabla 27, con un nivel de confianza del 95 %, muestra que el valor de Sig. = 0,000, menor al umbral de significancia del 5 %, evidencia que la adición de polímero EVA mejora de manera estadísticamente significativa el flujo de las mezclas asfálticas.

Prueba Post Hoc (Tukey)

Tabla 28

Prueba de Tukey para medias del Flujo – HE2

| % de polímero EVA | N | Subconjunto para alfa=0.05 | | |
|-------------------|---|----------------------------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| 3% | 4 | 12.90 | | |
| 2% | 4 | 12.95 | | |
| 0% | 4 | 13.25 | | |
| 4% | 4 | | 14.20 | |
| 5% | 4 | | | 16.43 |

Nota. Los resultados fueron calculados mediante el SPSS.

La prueba post hoc de Tukey, mostrada en la Tabla 28, indica que, con un nivel de confianza del 95 %, se presentan diferencias significativas en el flujo de las MAM, observándose una disminución progresiva al añadir un 3 % de polímero EVA

4.6.1.3. Prueba estadística aplicado a la HE3

Verificación de normalidad

Tabla 29

Prueba de normalidad (S-W) HE3

| Grupos | % de polímero EVA | Estadístico | S-W | |
|----------|-------------------|-------------|-----|-------|
| | | | gl | Sig. |
| % Vacíos | 0% | 0.963 | 4 | 0.800 |
| | 2% | 0.926 | 4 | 0.571 |
| | 3% | 0.893 | 4 | 0.397 |
| | 4% | 0.967 | 4 | 0.821 |
| | 5% | 0.853 | 4 | 0.235 |

Nota. Los resultados fueron calculados mediante el SPSS.

Según el análisis de normalidad presentado en la tabla N.º 29, el valor de “Sig.” excede el nivel de significancia del 5 %, lo que indica que los datos cumplen con la normalidad en todos los porcentajes considerados.

Evaluación de la homogeneidad de las varianzas

Tabla 30

Prueba de homogeneidad de varianzas – HE3

| Estadístico de Levene | gl1 | gl2 | Sig. |
|-----------------------|-----|-----|-------|
| 2.01 | 4 | 15 | 0.145 |

Nota. Los resultados fueron calculados mediante el SPSS.

El análisis de homogeneidad de varianzas presentado en la tabla N.º 30 muestra que el valor de $p = 0,145$, superior al nivel de significancia del 5 %, confirma el cumplimiento de la condición de homogeneidad.

Estadísticos descriptivos

Los estadísticos descriptivos presentados en la Tabla 31 permiten analizar la variabilidad del contenido de vacíos en las MAM con diferentes proporciones de polímero EVA.

Tabla 31

Promedio y Desviación estándar del % Vacíos

| % de polímero EVA | Media | Desv.Est. | 95% del intervalo de confianza para la media | |
|-------------------|-------|-----------|--|-----------------|
| | | | Límite inferior | Límite superior |
| 0% | 4.40 | 0.301 | 3.920 | 4.880 |
| 2% | 4.10 | 0.167 | 3.832 | 4.363 |
| 3% | 3.80 | 0.620 | 2.813 | 4.787 |
| 4% | 4.53 | 0.112 | 4.355 | 4.710 |
| 5% | 6.40 | 0.504 | 5.596 | 7.200 |

Nota. Los resultados fueron calculados mediante el SPSS.

Prueba de ANOVA

H_0 : No existe una mejoría en los % vacíos de la MAM con polímero EVA.

H_1 : Si existe una mejoría en los % vacíos de la MAM con polímero EVA

Tabla 32*Prueba ANOVA del % de Vacíos – HE3*

| | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
|------------------|-------------------|----|------------------|-------|-------|
| Entre grupos | 16.631 | 4 | 4.158 | 27.02 | 0.000 |
| Dentro de grupos | 2.308 | 15 | 0.154 | | |
| total | 18.939 | 19 | | | |

Nota. Los resultados fueron calculados mediante el SPSS.

Según los resultados del ANOVA presentados en la Tabla 32, el valor de significancia (Sig. = 0.000), inferior al 5%, indica que la incorporación del polímero EVA genera diferencias estadísticamente significativas en la porosidad de las mezclas asfálticas.

Prueba Post Hoc (Tukey)

Tabla 33*Prueba de Tukey para medias del % de Vacíos – HE3*

| % de polímero EVA | N | Subconjunto para alfa=0.05 | |
|-------------------|---|----------------------------|------|
| | | 1 | 2 |
| 3% | 4 | 3.80 | |
| 2% | 4 | 4.10 | |
| 0% | 4 | 4.40 | |
| 4% | 4 | 4.53 | |
| 5% | 4 | | 6.40 |

Nota. Los resultados fueron calculados mediante el SPSS.

El análisis post hoc de Tukey presentado en la tabla 33 revela diferencias estadísticamente significativas entre las medias. Con un nivel de confianza del 95 %, se evidencia que la adición del 3 % de EVA a la mezcla asfáltica provoca una disminución progresiva del contenido de vacíos en comparación con la mezcla tradicional.

4.6.1.4. Prueba estadística aplicado a la HE4

Verificación de normalidad

Tabla 34

Prueba de normalidad (S-W) HE4

| Grupos | % de polímero EVA | Estadístico | S-W | |
|---|-------------------|-------------|-----|-------|
| | | | gl | Sig. |
| Resistencia a la tracción indirecta | 0% | 0.788 | 4 | 0.082 |
| | 2% | 0.949 | 4 | 0.707 |
| | 3% | 0.812 | 4 | 0.125 |
| | 4% | 0.887 | 4 | 0.371 |
| | 5% | 0.994 | 4 | 0.976 |

Nota. Los resultados fueron calculados mediante el SPSS.

De acuerdo con la prueba de normalidad presentada en la tabla N° 34, los valores de “Sig.” obtenidos superan el umbral de 0,05, lo que permite no rechazar la hipótesis nula y confirmar que los datos analizados se distribuyen normalmente.

Evaluación de la homogeneidad de las varianzas

Tabla 35

Prueba de homogeneidad de varianzas – HE4

| Estadístico de Levene | gl1 | gl2 | Sig. |
|-----------------------|-----|-----|-------|
| 1.520 | 4 | 15 | 0.247 |

Nota. Los resultados fueron calculados mediante el SPSS.

Los resultados de la prueba de homogeneidad de varianzas mostrados en la Tabla N.º 35 indican que el valor de $p = 0.247$ supera el umbral de significancia de 0.05, lo que permite mantener la hipótesis nula y asumir que las varianzas de los datos son homogéneas.

Estadísticos descriptivos

Los estadísticos descriptivos presentados en la tabla 36 permiten analizar la dispersión y el desempeño de la resistencia a tracción indirecta de las mezclas asfálticas modificadas con EVA para los porcentajes evaluados.

Tabla 36

Promedio y Desviación estándar de resistencia a la tracción indirecta

| % de polímero EVA | Media | Desv.Est. | 95% del intervalo de confianza para la media | |
|-------------------|-------|-----------|--|-----------|
| | | | Lim. Inf. | Lim. Sup. |
| 0% | 8.70 | 0.204 | 8.053 | 9.352 |
| 2% | 10.23 | 0.047 | 10.084 | 10.386 |
| 3% | 12.37 | 0.131 | 11.951 | 12.784 |
| 4% | 11.16 | 0.112 | 10.804 | 11.516 |
| 5% | 9.44 | 0.113 | 9.075 | 9.795 |

Nota. Los resultados fueron calculados mediante el SPSS.

Prueba de Anova

H_0 =No existe una mejoría en la (ITS) de la MAM con polímero EVA.

H_1 : Si existe una mejoría en la (ITS) de la MAM con polímero EVA.

Tabla 37

Prueba ANOVA a la Tracción Indirecta – HE4

| | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
|------------------|-------------------|----|------------------|--------|-------|
| Entre grupos | 33.146 | 4 | 8.287 | 119.94 | 0.000 |
| Dentro de grupos | 1.036 | 15 | 0.069 | | |
| total | 34.183 | 19 | | | |

Nota. Los resultados fueron calculados mediante el SPSS.

Según el ANOVA presentado en la tabla 37, las mezclas asfálticas con distintos porcentajes de EVA mostraron diferencias significativas en su resistencia a tracción indirecta, considerando un nivel de confianza del 95%. El valor de p, al ser menor que 0.05,

permite rechazar la hipótesis nula, indicando que la incorporación de EVA mejora estadísticamente esta propiedad.

Prueba Post Hoc (Tukey)

Tabla 38

Prueba de Tukey a la Tracción Indirecta – HE4

| % de polímero EVA | N | Subconjunto para alfa=0.05 | | | | |
|----------------------|---|----------------------------|------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 0% | 4 | 8.70 | | | | |
| 5% | 4 | | 9.44 | | | |
| 2% | 4 | | | 10.23 | | |
| 4% | 4 | | | | 11.16 | |
| 3% | 4 | | | | | 12.37 |

Nota. Los resultados fueron calculados mediante el SPSS.

A partir del análisis post hoc de Tukey mostrado en la tabla 38, se identifican diferencias estadísticamente significativas entre los promedios. En este sentido, y con un 95% de confianza, se confirma que la incorporación de 3% de EVA aumenta de manera significativa la resistencia a tracción indirecta frente a la mezcla sin adición.

4.7. Consideraciones éticas

El objetivo fundamental es salvaguardar la integridad y el bienestar del investigador, garantizando el reconocimiento de su autoría en el desarrollo del presente estudio. Para ello, esta tesis considerará como fuentes de referencia trabajos relacionados con los conceptos abordados, así como tesis provenientes de repositorios académicos y artículos de revistas científicas de alcance internacional (Gargate & Huamani, 2018, p.59).

Los ensayos de laboratorio fueron desarrollados en INGEOMAT E.I.R.L. bajo estricto cumplimiento de los lineamientos técnicos establecidos en el EM-2016 y las normas MTC, ASTM, AASHTO y Marshall, garantizando la integridad y veracidad de resultados obtenidos.

V. Resultados y discusión

5.1. Resultados

5.1.1. Resultados de las propiedades físico-mecánicas de la MAC

Los resultados se presentan de acuerdo con cada variable de estudio. Primero, se analizan las propiedades físico-mecánicas de los materiales que componen la mezcla asfáltica; a continuación, se desarrolla el diseño Marshall de mezclas asfálticas en caliente, tanto convencionales como modificadas con polímero EVA, con el fin de evaluar la estabilidad, el flujo y el porcentaje de vacíos.

5.1.1.1. Resultados de Caracterización granulométrica de los agregados

Según los resultados proporcionados por el laboratorio Ingeomat, los agregados finos y gruesos analizados satisfacen los criterios establecidos en el Manual de Carreteras EG-2013 del MTC para su empleo en mezclas asfálticas en caliente.

a) Agregado grueso

El agregado grueso utilizado en la investigación consiste en grava triturada al 100%, proveniente de la cantera del Murillo, la cual es proveedora de la planta de concreto dentro de la región.

Tabla 39

Resultados de caracterización de agregado grueso

| Ensayos | Norma MTC | Requerimiento | | Resultados Obtenidos | Condición |
|--------------------------|--------------|----------------|-----------|-------------------------|-----------|
| | | Altitud (msnm) | | | |
| | | ≤3000 | >3000 | | |
| Durab. MgSO ₄ | E 209 | 18% (Mx) | 15% (Mx) | 4.18% | SC |
| Abrasión L.A. | E 207 | 40% (Mx) | 35% (Mx) | 24.10% | SC |
| Adherencia | E 517 | +95 | +95 | +96 | SC |
| ID | E 214 | 35% (Mn) | 35% (Mn) | -- | SC |
| Part. chatas y alarg. | E 223 | 10%(Mx) | 10% (Mx). | 9.65% | SC |
| Caras fract. | E 210 | 85/50 | 90/70 | 96.27/84.88 | SC |

| | | | | | |
|---------------|-------|-----------|-----------|-------|----|
| SST | E 219 | 0.5%(Mx) | 0.5%(Mx). | 0.06% | SC |
| Absorción (%) | E 206 | 1.0% (Mx) | 1.0%(Mx) | 0.58% | SC |

Nota. De acuerdo con la normativa del MTC, la tabla presenta los resultados alcanzados en las pruebas de control de calidad del agregado grueso.

b) Agregado fino

El agregado fino utilizado en la investigación consiste en arena chancada al 100%, proveniente de la cantera del Murillo, la cual es proveedora de la planta de concreto dentro de la región.

Tabla 40

Resultados de caracterización de agregado fino

| Ensayos | Norma MTC E | Requerimiento | | Resultados Obtenidos | Condición |
|---|-----------------|----------------|----------|-------------------------|-----------|
| | | Altitud (msnm) | | | |
| | | ≤3000 | >3000 | | |
| Determinación del equivalente de arena | 114 | 60 | 70 | 75.53 | SC |
| Evaluación de la angularidad del agregado fino | 222 | 30 (Mn) | 40 (Mn) | 44.75 | SC |
| Contenido de finos por azul de metileno | AASHTO TP 57 | 8 (Mx) | 8 (Mx) | 7.5 mg | SC |
| Índice de plasticidad en malla N.° 40 | 111 | NP | NP | NP | SC |
| Resistencia a la acción del sulfato de magnesio | 209 | - | 18% (Mx) | 1.50 | SC |
| Evaluación de la durabilidad | 214 | 35 (Mn) | 35 (Mn) | -- | SC |
| Índice de plasticidad en malla N.° 200 | 111 | 4 (Mx) | NP | NP | SC |
| Contenido de sales solubles totales | 219 | 0.5% (Mx) | 0.5%(Mx) | 0.05 | SC |
| Capacidad de absorción | 205 | 0.5% (Mx) | 0.5%(Mx) | 0.48 | SC |

Nota: En la tabla se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de control de calidad del agregado fino, realizados conforme a las normas del MTC.

c) Combinación de agregados

La evaluación de la granulometría indicó que los agregados grueso y fino de la cantera Murillo cumplen con los rangos establecidos para el huso MAC-02 según el EG-2013 del MTC.

Tabla 41

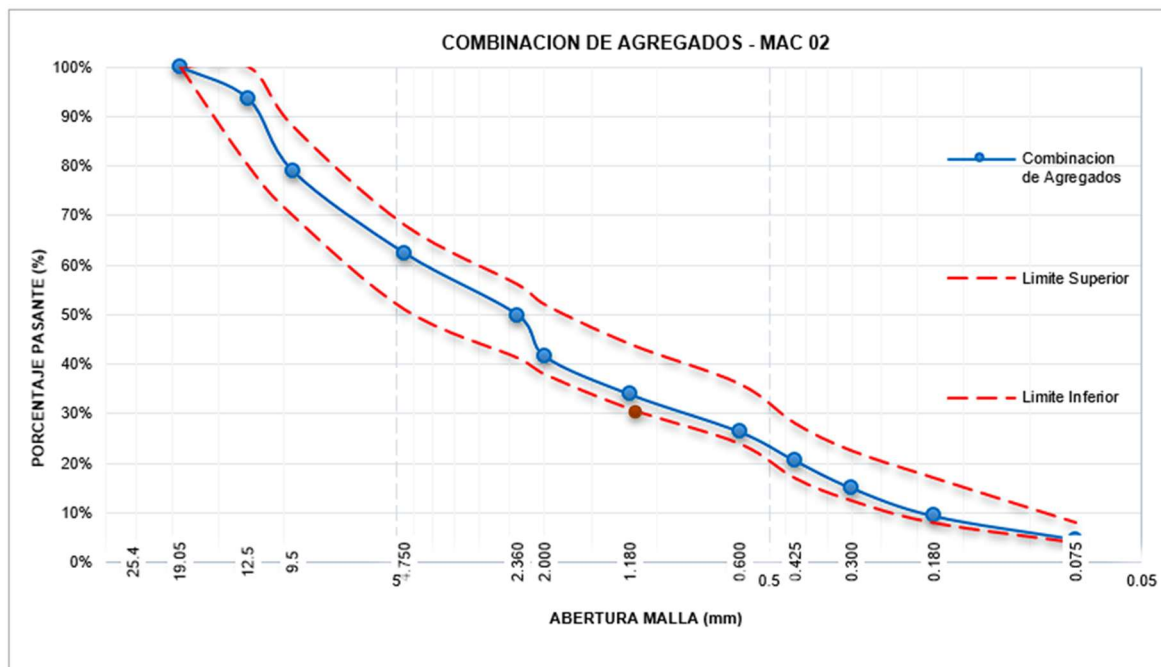
Combinación de agregados MAC-2

| Cantera | | Murillo | | | | | Condición | |
|-----------------|-------|------------|----------|---------------|------------------|---------|-----------|--|
| Agregado Grueso | | 35% | | Agregado Fino | | 65% | | |
| Abertura | Tamiz | Pasante | Pasante | Combinación | Especificaciones | | | |
| | | Ag. Grueso | Ag. Fino | | Teórica | Mac - 2 | | |
| mm | Astm | % | % | % | Min | Max | | |
| 25.40 | 1" | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100 | 100 | | |
| 19.05 | ¾" | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100 | 100 | | |
| 12.50 | ½" | 81.53 | 100.00 | 93.54 | 80 | 100 | Cumple | |
| 9.50 | 3/8" | 40.04 | 100.00 | 79.01 | 70 | 88 | Cumple | |
| 4.75 | N° 4 | 0.00 | 96.03 | 62.42 | 51 | 68 | Cumple | |
| 2.36 | N° 8 | 0.00 | 76.82 | 49.93 | | | | |
| 2.00 | N°10 | 0.00 | 64.03 | 41.62 | 38 | 52 | Cumple | |
| 1.18 | N°16 | 0.00 | 52.22 | 33.94 | | | | |
| 0.60 | N°30 | 0.00 | 40.63 | 26.41 | | | | |
| 0.425 | N°40 | 0.00 | 31.62 | 20.55 | 17 | 28 | Cumple | |
| 0.30 | N°50 | 0.00 | 23.17 | 15.06 | | | | |
| 0.18 | N°80 | 0.00 | 14.47 | 9.41 | 8 | 17 | Cumple | |
| 0.075 | N°200 | 0.00 | 7.17 | 4.66 | 4 | 8 | Cumple | |

Nota. Según el reporte de laboratorio, la tabla presenta la combinación de agregados MAC-2 conforme a los límites establecidos por la norma del MTC.

Figura 13

Combinación de agregados - MAC 02



Nota. Según el reporte de laboratorio, la Figura 13 refleja que la gradación de la combinación de agregados MAC-2 se encuentra dentro de los parámetros establecidos por el MTC-2013.

5.1.1.2. Especificaciones técnicas del ligante asfáltico PEN 60-70

Los datos de la Tabla 42, provienen del Anexo 02 de la ficha técnica del ligante asfáltico PEN 60-70 de Petroperú, y permiten confirmar la calidad del cemento asfáltico utilizado en las mezclas.

Tabla 42

Parámetros técnicos del ligante asfáltico grado PEN 60–70

| Propiedades | Especificaciones | | Método de ensayo | |
|---------------------------------|------------------|----------|------------------|--------|
| | min | máx. | ASTM | AASHTO |
| Penetración (25 °C, 100 g, 5 s) | 60 | 70 | D-5 | T-49 |
| Volatilidad | | | | |
| G.E. (15.6/15.6 °C) | | Reportar | D-70 | T-228 |

| | | | |
|--|-----------|--------|-------------|
| P. inflamación (COC, °C) | 232 | D-92 | T-48 |
| Ductilidad (25 °C) | 100 | D-113 | T-51 |
| Solubilidad en tricloroetileno, % masa | 99.0 | D-2042 | T-44 |
| susceptibilidad térmica | | | |
| TFOT | | D-1754 | T-179 |
| Pérdida por calent. (%) | 0.8 | | |
| Penetración retenida (%) | 52+ | D-5 | T-49 |
| Ductilidad (25 °C) | 50 | D-113 | T-51 |
| IST | -1.0 +1.0 | | Francés RLB |
| Fluidez | | | |
| Visc. cinemática 100 °C (cSt) | Reportar | D-2170 | T-201 |
| Visc. cinemática 135 °C (cSt) | 200 | D-2170 | T-201 |
| P. ablandamiento (°C) | 46 | D-36 | T-53 |

Nota. De acuerdo con la ficha técnica de Petroperú, la tabla resume las principales especificaciones del cemento asfáltico.

5.1.1.3. Especificaciones técnicas del polímero EVA

El polímero empleado en esta investigación, identificado con el código EVA UE 634 28VA y presentado en sacos de 25 kg, se encuentra en forma granular. Sus características físicas y químicas se describen en la Tabla 43 y en la Figura 20.

Tabla 43

Ficha técnicas del polímero EVA

| Physical Properties | | |
|---|-------------|---------------|
| Properties | Test Method | Typical Value |
| VA content (wt%) | USI (ASTM) | 28 |
| Melt index (g/10min) | D1238 | 6 |
| Density (g/cm ³) | D792 | 0.948 |
| Tensile strength break kg/cm ² | D638 | 180 |
| Ultimate elongation (molded)(%) | D638 | 830 |

| | | |
|--------------------------------------|-------|------|
| Low temperatura brittleness (°C/F50) | D746 | <-76 |
| Vicat softening temperatura (°C) | D1525 | 45 |
| Ring and Ball softening point (°C) | E28 | 145 |
| Melt point (°C) | D3418 | 73 |
| Hardness (shore A) | D2240 | 78 |

Nota. Según la ficha de datos del polímero EVA – USI, la Tabla 43 muestra las principales especificaciones técnicas de este material.

5.1.1.4. Resultados de la mezcla asfáltica convencional por método Marshall

Para determinar el porcentaje óptimo de ligante asfáltico, se variaron los contenidos de asfalto en intervalos de 0.5%, estableciendo cinco niveles de evaluación: 4.5%, 5%, 5.5%, 6% y 6.5%, incluyendo dos valores inferiores y dos superiores al contenido de diseño.

a) Dosificación para las briquetas

Como parte del diseño Marshall, la Tabla 44 presenta la dosificación de agregados MAC-02 empleada en la preparación de pastillas de 1200 g, empleadas para evaluar resistencia, deformación y porosidad de aire en la mezcla.

Tabla 44

Dosificación para mezcla asfáltica tradicional

| Material | % CA | | | | | |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 5.7 | 6.0 | 6.5 |
| A. Grueso | 33.43% | 33.25% | 33.07% | 33.00% | 32.90% | 32.73% |
| A. Fino | 62.07% | 61.75% | 61.43% | 61.30% | 61.10% | 60.77% |

Nota. En la tabla presenta la composición dosificada de la mezcla asfáltica tradicional utilizada para determinar el contenido óptimo del ligante asfáltico.

b) Resultados del Ensayo Marshall

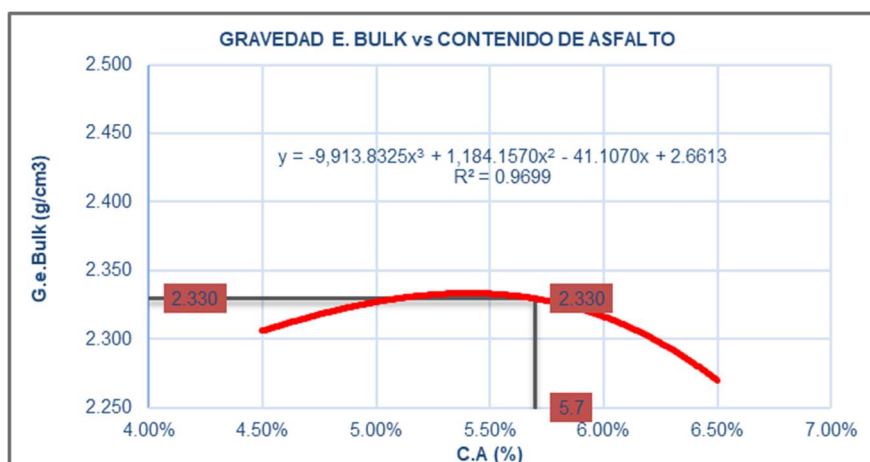
La Tabla 45 presenta los resultados del ensayo Marshall obtenidos durante el diseño de una mezcla asfáltica destinada a tránsito pesado, considerando diferentes contenidos de asfalto.

Tabla 45*Resultados del Ensayo Marshall - Mezcla asfáltica tradicional*

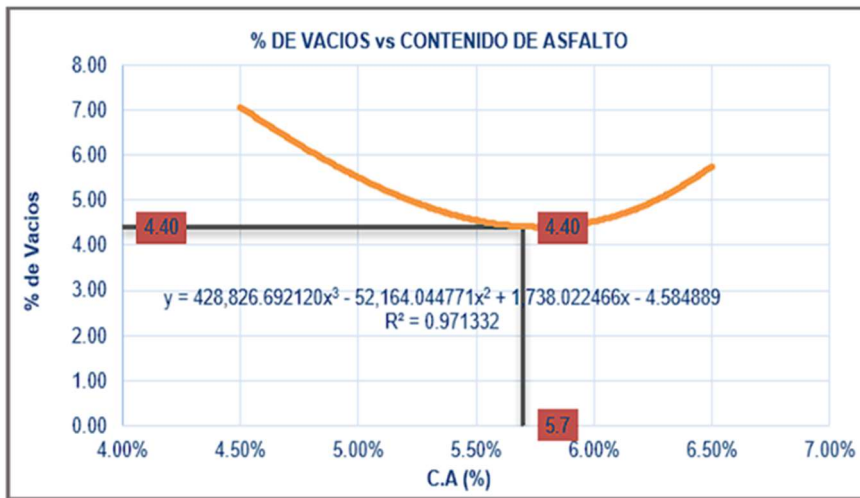
| Parámetros | Und | R. Obtenidos | | | | |
|--------------------------|-------|--------------|---------|---------|---------|---------|
| PEN 60-70 | % | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0 | 6.5 |
| Gravedad especifica Bulk | g/cm3 | 2.307 | 2.323 | 2.339 | 2.312 | 2.271 |
| Vacíos - Va | % | 7.03 | 5.68 | 4.30 | 4.70 | 5.72 |
| V.M.A | % | 16.68 | 16.55 | 16.40 | 17.81 | 19.71 |
| V.F.A | % | 57.87 | 65.67 | 73.79 | 73.58 | 70.99 |
| Flujo 0,01" | mm | 8.50 | 11.20 | 12.60 | 14.40 | 16.60 |
| Estabilidad | kg | 961.61 | 1135.20 | 1270.17 | 1240.91 | 1082.58 |

Nota. La presente tabla exhibe los resultados del ensayo Marshall de la mezcla asfáltica tradicional, de acuerdo con el informe emitido por el laboratorio.

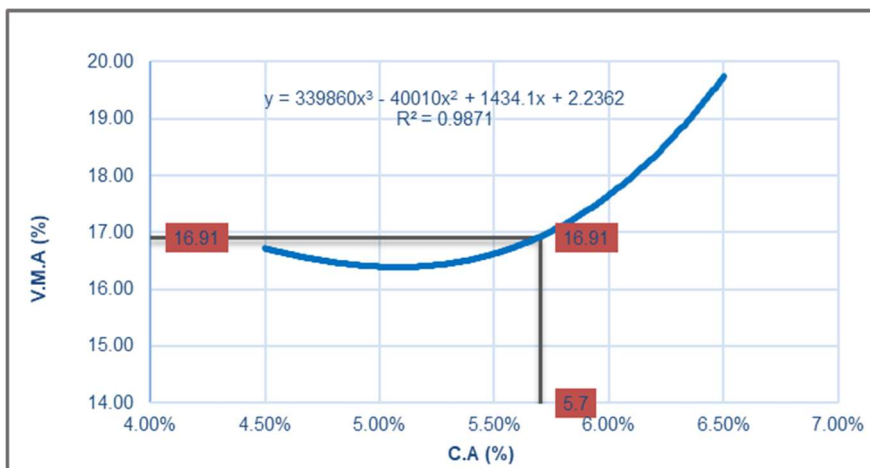
Seguidamente, se muestran los gráficos del diseño Marshall para la mezcla MAC-02, construidos con la información de la tabla 45.

Figura 14*Gravedad e. Bulk vs Cantidad de ligante asfáltico*

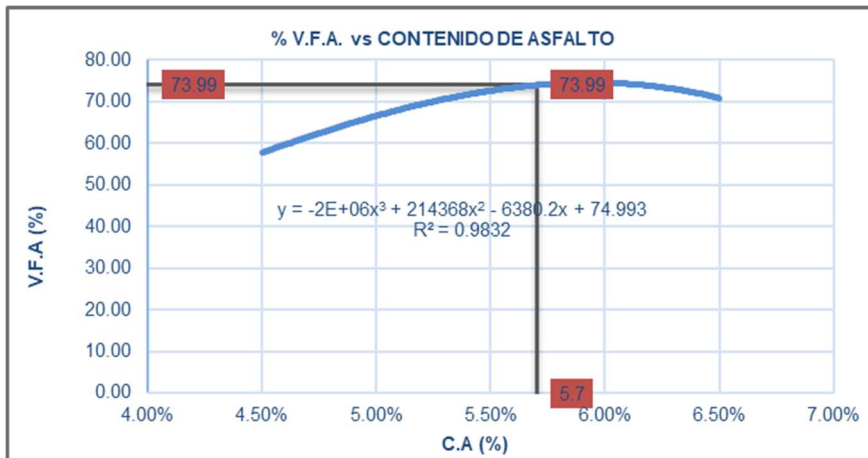
Nota. La Figura 14 muestra los resultados de la gravedad específica Bulk. Debido a que el Manual de Carreteras EG-2013 no define límites mínimos ni máximos, se consideran aceptables los valores situados a la izquierda de la línea negra, dentro del rango de 4.5% a 5.70% de C.A. Fuente: Reporte de laboratorio de diseño Marshall.

Figura 15*% vacíos vs Cantidad de ligante asfáltico*

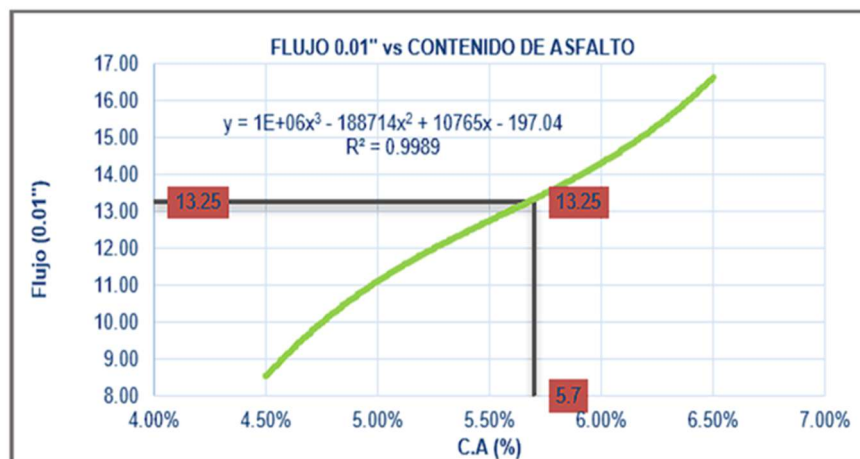
Nota. En la Figura 15 se evidencia el % de vacíos que cumple con el intervalo normativo de 3–5% establecido por el EG-2013 para mezclas MAC-2. Este cumplimiento se da en el rango de 5.50% a 5.70% de ligante asfáltico, situado a la izquierda de la línea límite. Fuente: Reporte de laboratorio de diseño Marshall.

Figura 16*V.M.A. vs Cantidad de ligante asfáltico*

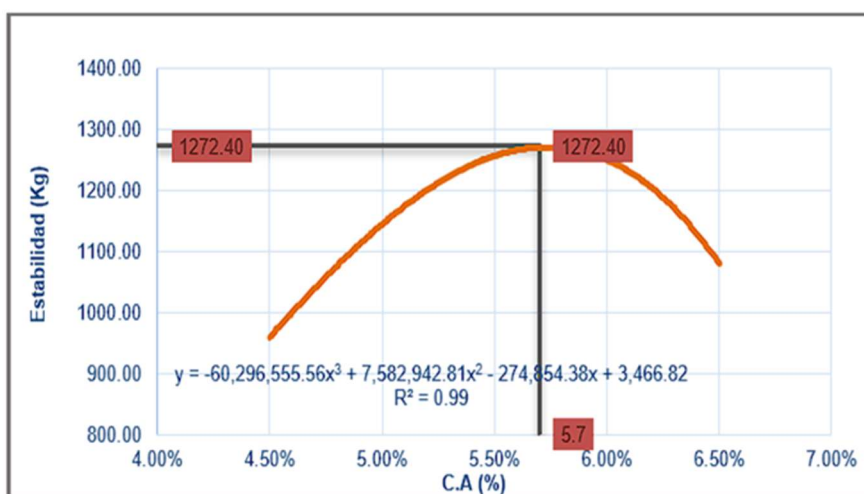
Nota. La figura 16 muestra que los valores de V.M.A superan el mínimo normativo de 15% para una mezcla MAC-2 con agregado de 1/2", según el EG-2013. Este cumplimiento se presenta en contenidos de cemento asfáltico entre 4.5% y 6.50%, definidos como aceptables. Fuente: Reporte de laboratorio de diseño Marshall.

Figura 17*V.F.A. vs Cantidad de ligante asfáltico*

Nota. Aunque la EG-2013 no define un valor mínimo para el %V.F.A., la figura 17 indica que los resultados entre 5.0 % y 6.5 % de C.A. cumplen con el rango sugerido por el Instituto del Asfalto. Fuente: Reporte de laboratorio de diseño Marshall.

Figura 18*Flujo vs Cantidad de ligante asfáltico*

Nota. Según la Figura 18, los resultados de fluencia muestran que las mezclas con contenidos de asfalto entre 4.5 % y 5.7 % cumplen con los criterios establecidos por el EG-2013, los cuales oscilan entre 8 -14, considerándose técnicamente aceptables. Fuente: Reporte de laboratorio de diseño Marshall.

Figura 19*Estabilidad vs Cantidad de ligante asfáltico*

Nota. Los resultados de estabilidad mostrados en la figura 19 indican que los valores dentro del rango 4.5 %–5.7 % de C.A. son aceptables, al superar el límite mínimo fijado por la EG-2013 para mezclas MAC-2 que debe ser de 831.07 kg. Fuente: Reporte de laboratorio de diseño Marshall.

c) Determinación del contenido óptimo del C.A.

Se determinó que el 5.7 % de ligante asfáltico cumple con todos los criterios para la mezcla convencional, según los gráficos de Marshall (fig. 14 a 19). Con este valor se elaboraron 4 briquetas y sus resultados están en la tabla 46.

Tabla 46*Contenido óptimo del cemento asfáltico*

| Parámetros | Und | % C.A. Óptimo | Requerimiento EG- 2013 MAC-2 | Cumple |
|--------------------------|-------------------|------------------|---------------------------------|--------|
| Compactación | und | 75 | 75 | SI |
| % ligante asfáltico | % | 5.7 | - | SI |
| Gravedad específica Bull | g/cm ³ | 2.330 | - | SI |
| Vacíos-Va | % | 4.40 | 3 - 5 | SI |
| V.M.A | % | 16.91 | 15 min | SI |

| | | | | |
|-------------|----|---------|-----------------|----|
| V.F.A | % | 73.99 | 65-75 | SI |
| Flujo 0.01" | mm | 13.25 | 8 - 14 | SI |
| Estabilidad | kg | 1272.40 | 831.07 kg (min) | SI |

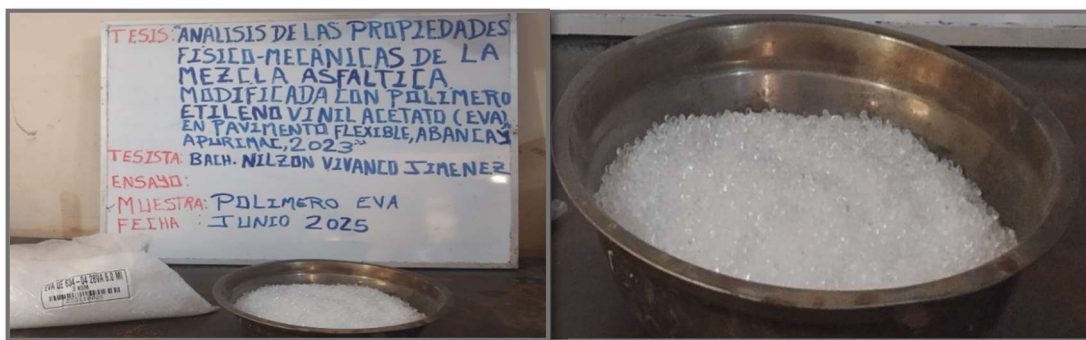
Nota. Según el MTC-2013, la dosificación ideal de asfalto para esta mezcla es de 5,7 %, al cumplir con todos los parámetros establecidos por la norma.

5.1.1.5. Resultados de la mezcla asfáltica modificada

Este estudio tiene como propósito principal analizar el desempeño de mezclas asfálticas modificadas con polímero EVA, con el fin de determinar si su incorporación mejora las propiedades físico-mecánicas frente a una mezcla tradicional. Para ello, se empleó la gradación MAC-2 y una cantidad optima de ligante asfáltico de 5.7 %, elaborándose especímenes con distintos porcentajes de EVA en relación con el peso del ligante.

Figura 20

Polímero EVA



Nota. En la presente figura se puede ver polímero EVA utilizado en la presente investigación.

a) Resultados del Ensayo Marshall con el ligante asfáltico en su proporción optima y porcentajes de adición del polímero EVA

Tabla 47**Resultados de mezcla asfáltica modificada con polímero EVA**

| Ensayo Marshall con adición de polímero EVA al 0% - 2% - 3% - 4% - 5% | | | | | | |
|---|---------|---------|---------|---------|--------|-----------------|
| Contenido óptimo de asfalto (PEN 60-70) – 5.70% | | | | | | |
| % de polímero EVA | 0% | 2% | 3% | 4% | 5% | Requerimiento |
| Estabilidad | 1272.40 | 1342.57 | 1364.40 | 1224.80 | 880.98 | 831.07 kg (min) |
| Flujo | 13.25 | 12.95 | 12.90 | 14.20 | 16.43 | 8 – 14 (0.01") |
| Gravedad específica Bulk | 2.330 | 2.341 | 2.351 | 2.335 | 2.291 | - |
| Vacíos de aire Va | 4.40 | 4.10 | 3.80 | 4.53 | 6.40 | 3 – 5 (%) |
| V.M.A | 16.91 | 16.41 | 16.02 | 16.54 | 18.05 | 15 % (min) |
| V.F.A | 73.99 | 75.03 | 76.29 | 72.61 | 64.58 | - |

Nota. De acuerdo con el informe de laboratorio, se presentan los resultados del ensayo Marshall realizado sobre la mezcla modificada, conforme a la norma del MTC.

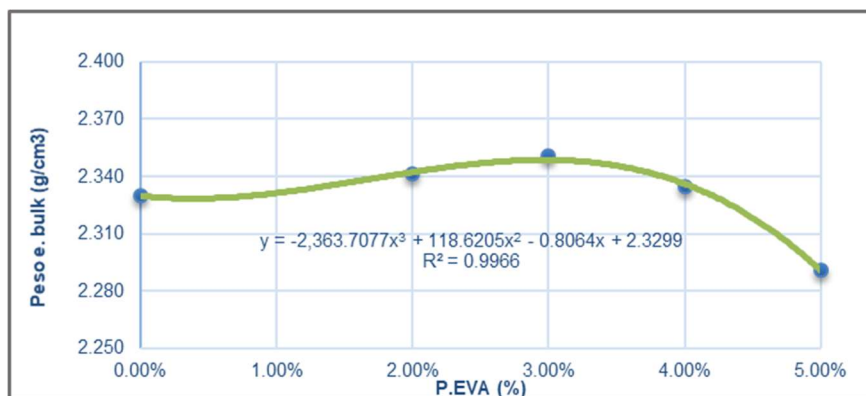
Figura 21**Rotura de especímenes ensayo Marshall**

Nota. La Figura 21 ilustra la etapa de rotura de las briquetas bajo la carga aplicada, según el procedimiento del ensayo Marshall.

A partir del ensayo Marshall, se evaluó el desempeño de mezclas tradicionales y modificadas con EVA, enfocándose en cómo varían estabilidad, flujo y vacíos según el porcentaje de polímero incorporado.

Figura 22

Gravedad e. Bulk vs Cantidad de polímero EVA

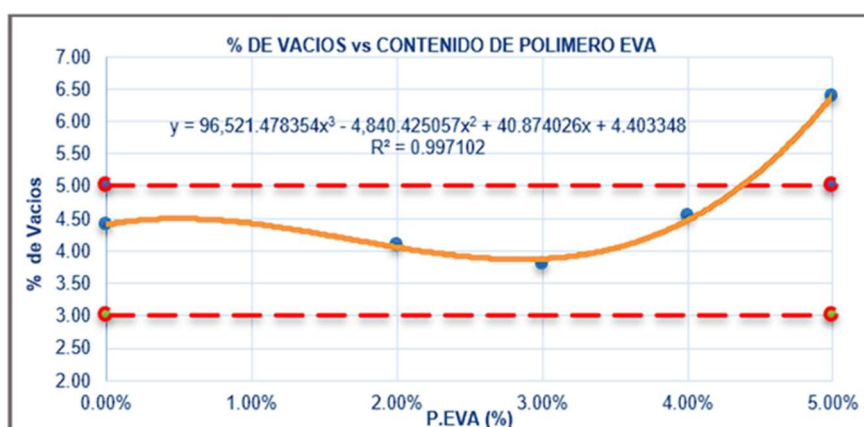


Nota. En la figura 22 se puede apreciar los resultados de gravedad específica Bulk, dado que no se establecen límites mínimos ni máximos, se consideran aceptables todos los valores obtenidos en la evaluación del polímero EVA con distintos porcentajes de adición.

Fuente: Reporte de laboratorio.

Figura 23

% de Vacíos vs Cantidad de polímero EVA



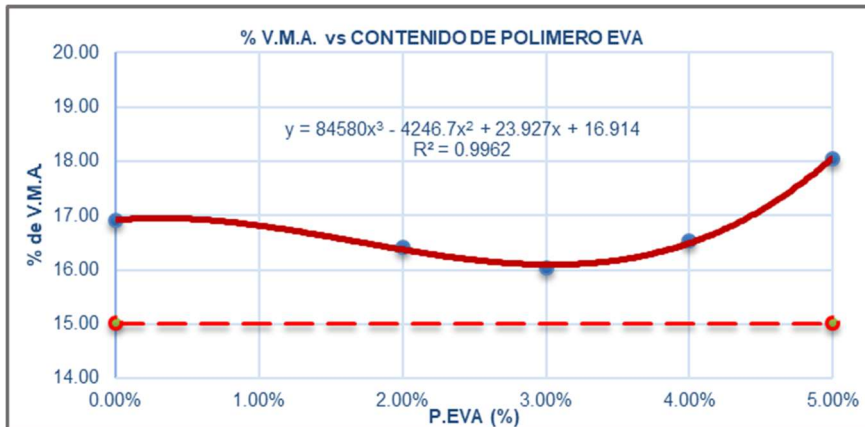
Nota. La Figura 23 evidencia que la mezcla con 3% de polímero EVA presenta una disminución en el contenido de vacíos respecto a la mezcla patrón, lo que implica mejor

compactación, menos permeable a la humedad y conformidad con la normativa EG-2013.

Fuente: Reporte de laboratorio.

Figura 24

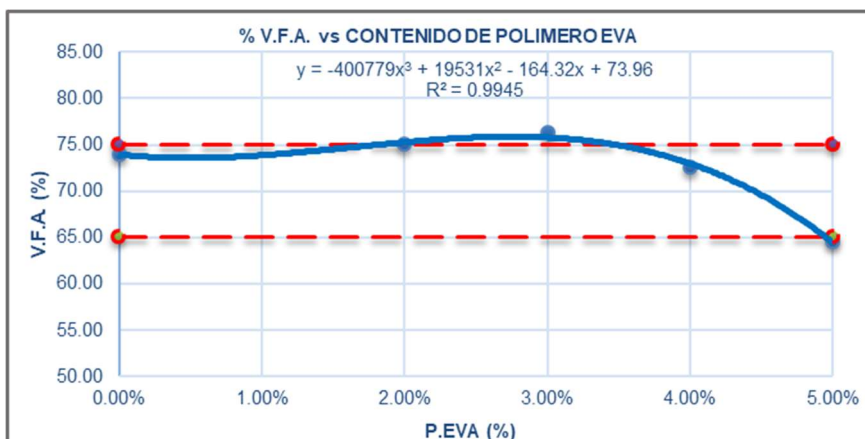
%V.M.A. vs Cantidad de polímero EVA



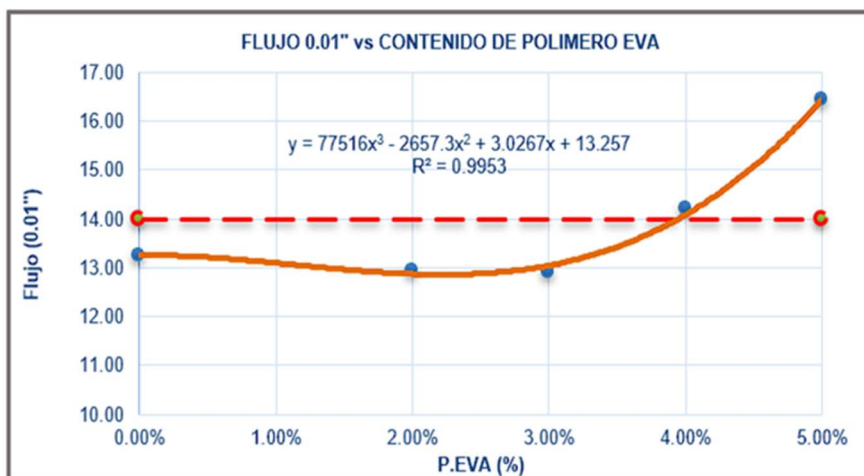
Nota. Los datos de la figura 24 confirman que los %V.M.A. obtenidos en las mezclas modificadas con polímero EVA están por encima del límite mínimo requerido por la norma EG-2013 para MAC-02. Fuente: Reporte de laboratorio.

Figura 25

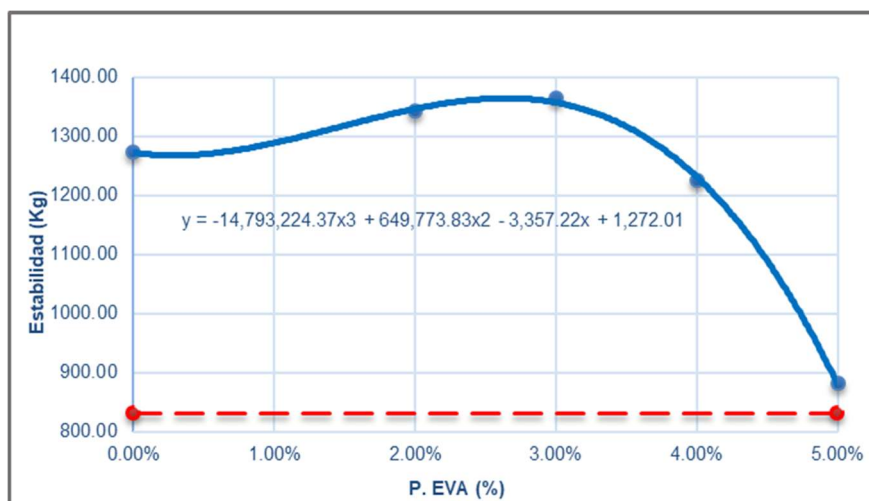
% V.F.A. vs Cantidad de polímero EVA



Nota. De acuerdo con la figura 25, el grado de llenado de vacíos por asfalto (%V.F.A.) en las mezclas modificadas con 2 % y 3 % de EVA no alcanzan el intervalo recomendado por el Instituto del Asfalto (65 %–75 %). Sin embargo, estas dos mezclas presentan buenos resultados en los demás criterios evaluados. Fuente: Reporte de laboratorio.

Figura 26*Flujo vs Cantidad de polímero EVA*

Nota. Como se observa en la figura 26, la adición de 3 % de polímero EVA reduce el valor del flujo frente a la mezcla tradicional, esto demuestra que la mezcla es más estable y resistente a la deformación. Los resultados obtenidos se mantienen dentro de los criterios exigidos por la EG-2013. Fuente: Reporte de laboratorio.

Figura 27*Estabilidad vs Cantidad de polímero EVA*

Nota. La figura 27 evidencia un incremento en la estabilidad al aplicar 2 % y 3 % de EVA, superando a la mezcla tradicional. Con mayores porcentajes (4 % y 5 %) se observa una tendencia descendente, manteniéndose siempre por encima del valor mínimo requerido de 831.07 kg según EG-2013. Fuente: Reporte de laboratorio.

5.1.2. Resultados del objetivo específico 1

Tabla 48

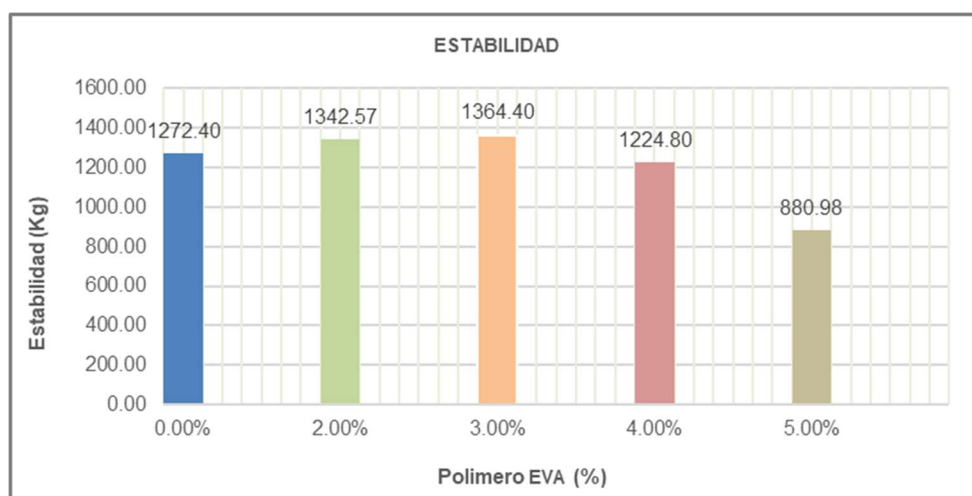
Resultados de estabilidad con distintos porcentajes del polímero EVA

| Ensayo Marshall con adición de polímero EVA al 0% - 2% - 3% - 4% - 5% | | | | | | |
|---|---------|---------|---------|---------|--------|-----------------|
| Contenido óptimo de asfalto (PEN 60/70) – 5.70% | | | | | | |
| % de polímero EVA | 0% | 2% | 3% | 4% | 5% | Requerimiento |
| Estabilidad promedio (Kg) | 1272.40 | 1342.57 | 1364.40 | 1224.80 | 880.98 | 831.07 kg (min) |
| Estabilidad promedio (Kn) | 12.478 | 13.166 | 13.380 | 12.011 | 8.6395 | 8.15 KN |

Nota. Según la norma MTC E 504, se analizó la estabilidad de mezclas asfálticas con adición de polímero EVA en distintos porcentajes.

Figura 28

Resultados de estabilidad con distintos porcentajes del polímero EVA



Nota. La Figura 28 muestra que la estabilidad de la mezcla alcanza su valor máximo con un 3 % de polímero EVA, mientras que porcentajes superiores reducen su rendimiento. Este contenido cumple con los requerimientos establecidos en el Manual de Carreteras EG-2013.

5.1.3. Resultados del objetivo específico 2

Tabla 49

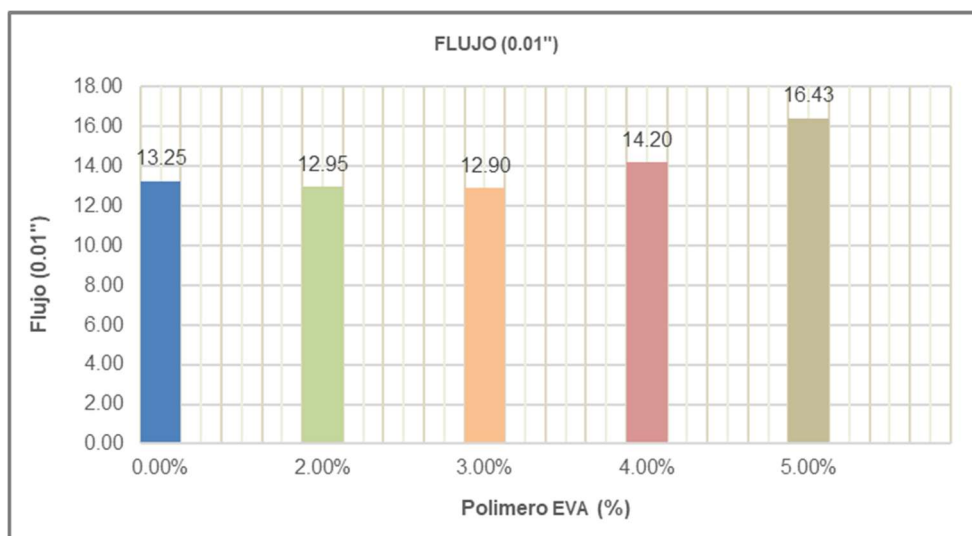
Resultados del flujo con distintos porcentajes del polímero EVA

| Ensayo Marshall con adición de polímero EVA al 0% - 2% - 3% - 4% - 5% | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|
| Contenido óptimo de asfalto (PEN 60/70) – 5.70% | | | | | | |
| % de polímero EVA | 0% | 2% | 3% | 4% | 5% | Requerimiento |
| Flujo | 13.25 | 12.95 | 12.90 | 14.20 | 16.43 | 8 – 14 (0.01") |

Nota. La Tabla 49 presenta un resumen de los valores de fluencia de las mezclas asfálticas con diferentes proporciones de polímero EVA, obtenidos de acuerdo con la norma MTC E 504.

Figura 29

Resultados del flujo con distintos porcentajes del polímero EVA



Nota. Según la figura 29, se observa una reducción en el flujo con 2 % y 3 % de polímero EVA. A partir del 4 %, la fluencia tiende a aumentar. El porcentaje óptimo identificado es el 3 %, por cumplir con los criterios establecidos en el Manual de Carreteras EG-2013.

5.1.4. Resultados del objetivo específico 3

Tabla 50

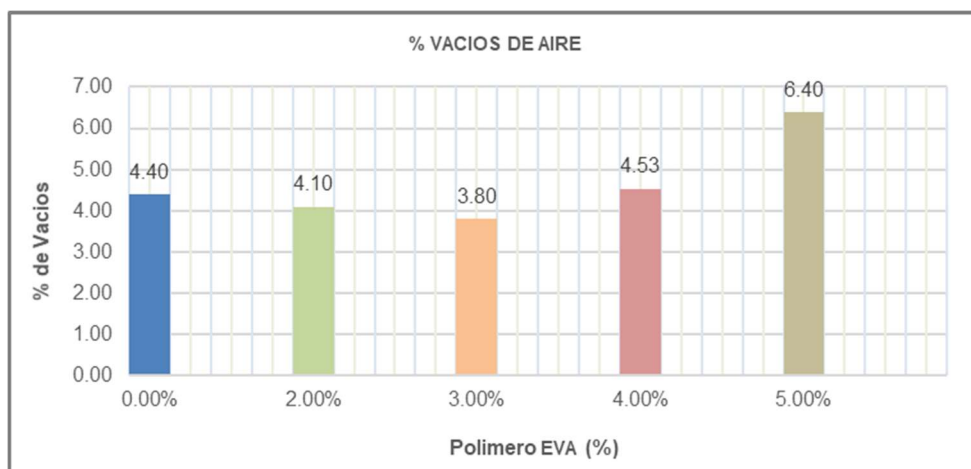
Resultados de % de vacíos con distintos porcentajes del polímero EVA

| Ensayo Marshall con adición de polímero EVA al 0% - 2% - 3% - 4% - 5% | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|---------------|
| Contenido óptimo de asfalto (PEN 60/70) – 5.70% | | | | | | |
| % de polímero EVA | 0% | 2% | 3% | 4% | 5% | Requerimiento |
| Vacíos de aire Va | 4.40 | 4.10 | 3.80 | 4.53 | 6.40 | 3 – 5 (%) |

Nota. La Tabla 50 reúne los valores del contenido de vacíos en mezclas asfálticas elaboradas con variados contenidos de polímero EVA, según lo estipulado en la norma MTC E 504.

Figura 30

Resultados de % de vacíos con distintos porcentajes del polímero EVA



Nota. En la Figura 30 se constata el porcentaje de vacíos disminuye con 2 % y 3 % de polímero EVA, mientras que con 4 % y 5 % aumenta. El comportamiento más favorable, que cumple con lo estipulado en el Manual de Carreteras EG-2013, es el 3% de polímero EVA.

5.1.5. Resultados del objetivo específico 4

Con el propósito de evaluar el desempeño estructural de las mezclas asfálticas frente a esfuerzos de tracción, se llevó a cabo el ensayo de compresión diametral conforme a la norma NLT-346/90, empleando briquetas cilíndricas dispuestas horizontalmente. Se

prepararon 20 probetas en total: 4 de mezcla convencional y 16 con polímero EVA en proporciones de 2 %, 3 %, 4 % y 5 %, siguiendo el método Marshall. Cada muestra fue medida (diámetro y altura) con vernier y pesada con una balanza de precisión (± 0.1 g) para asegurar exactitud en los cálculos. Posteriormente, las briquetas fueron acondicionadas durante 6 horas en un baño termostático a 60 °C, y ensayadas usando el equipo Marshall con cabezal Lottman, aplicando una carga continua de 50.8 mm/min hasta generar una fractura vertical. El esfuerzo máximo registrado fue empleado para determinar el desempeño a tracción indirecta, parámetro clave en el análisis comparativo de desempeño de las mezclas evaluadas.

$$Rt = \frac{2P}{\pi HD}$$

Rt = Resistencia a compresión diametral (kgf/cm²)

P = Fuerza máxima de aplicación N (kgf)

D = Diámetro del espécimen, mm

H = Altura del espécimen, mm

La tabla 30 presenta los resultados obtenidos del ensayo de tracción indirecta realizados sobre mezclas asfálticas tradicionales y aquellas modificadas con distintos porcentajes de polímero EVA.

Tabla 51

Datos obtenidos del ensayo de compresión diametral

| Ensayo resistencia a compresión diametral con polímero EVA al 0% - 2% - 3% - 4% - 5% | | | | | |
|--|------|--------|--------|--------|-------|
| Contenido óptimo de asfalto (PEN 60/70) – 5.70% | | | | | |
| % de polímero EVA | 0% | 2% | 3% | 4% | 5% |
| T° Digestión (°C) | 0 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| T° Digestión (hr) | 0 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Resistencia a compresión diametral (kg/cm ²) | 8.70 | 10.23 | 12.37 | 11.16 | 9.44 |
| Resistencia a compresión diametral (Mpa) | 0.87 | 1.02 | 1.24 | 1.12 | 0.94 |
| Variación porcentual | 0.0% | 17.61% | 42.14% | 28.23% | 8.44% |

Nota: La tabla 51 presenta los valores obtenidos del ensayo de compresión diametral para las mezclas asfálticas evaluadas con diferentes dosificaciones de polímero EVA.

Figura 31

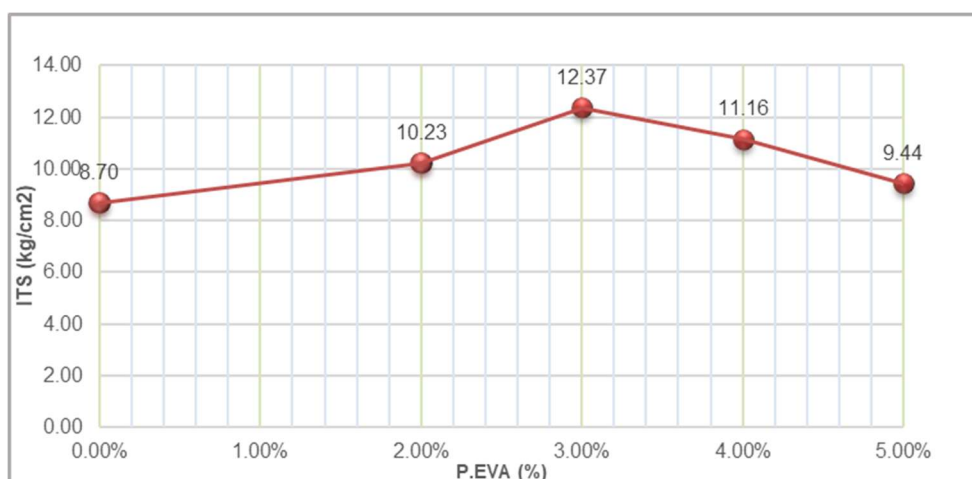
Ensayo de tracción diametral



Nota. En la figura 31 se ilustra el método aplicado para determinar la resistencia a la tracción indirecta mediante la rotura de probetas cilíndricas, utilizando el cabezal de Lottman.

Figura 32

Resultados del comportamiento mecánico frente a la carga diametral

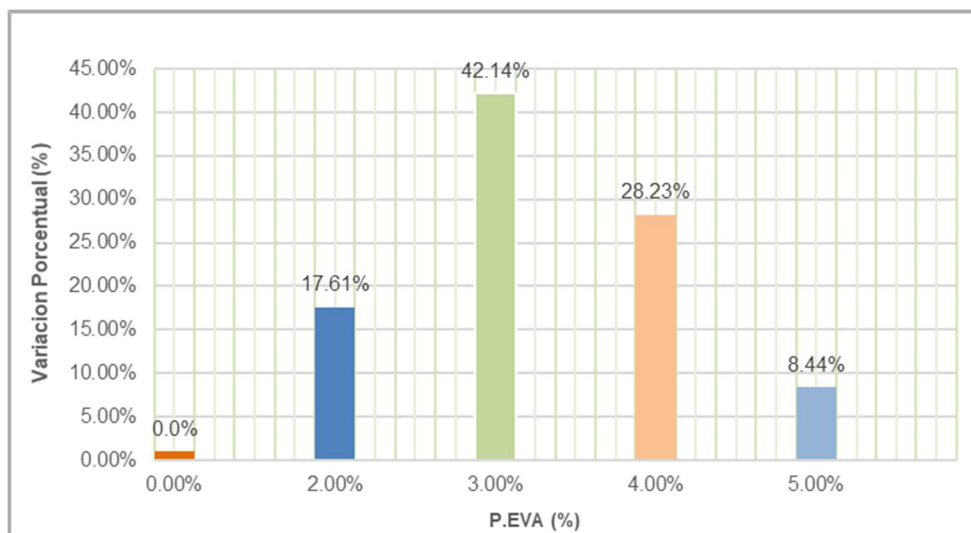


Nota. En la figura 32, la resistencia al corte de la mezcla se incrementa progresivamente hasta alcanzar un valor máximo de 12.37 kg/cm² cuando se emplea un 3 % de polímero

EVA. Superado este porcentaje, los valores comienzan a disminuir, lo que indica los porcentajes mayores generan un efecto negativo en la cohesión interna del material.

Figura 33

Variación porcentual del ensayo de resistencia a tracción diametral



Nota. La figura 33 indica que la resistencia a la tracción indirecta aumenta con la inclusión de 2 % y 3 % de polímero EVA. Sin embargo, al aumentar la dosificación a 4 % y 5 %, se observa una disminución progresiva de esta propiedad. El mejor desempeño se alcanza con una adición del 3 %.

5.2. Discusión de resultados

En cumplimiento del objetivo general, se evaluaron mezclas asfálticas en caliente diseñadas con gradación MAC-02, compactadas con 75 golpes por cara y trabajadas a 150 °C según el método Marshall. Se compararon una mezcla tradicional y otra modificada con distintos porcentajes de EVA. El análisis evidenció que la adición del polímero incrementa notablemente las propiedades físico-mecánicas: mayor estabilidad, menor flujo y vacíos, y mejor resistencia a la tracción indirecta. Estos resultados, presentados en las tablas 47 y 51, confirman que las mezclas modificadas cumplen con los criterios del Manual de Carreteras EG-2013.

En cumplimiento del objetivo específico 01, se identificó que la mezcla convencional con 5.7 % del ligante asfáltico registro una estabilidad de 1272.40 kg, mientras que la mezcla modificada con 3 % de EVA registró 1364.40 kg, reflejando un aumento del 7.23 %. Ambas superan el mínimo exigido por la norma EG-2013 (831.07 kg). Este resultado evidencia una mayor resistencia a cargas, mejor cohesión interna y un desempeño más eficaz frente al ahuellamiento.

Según (López, 2024), en su estudio se utilizaron adiciones de EVA de 2.5 % a 4.5 %, concluyéndose que la mezcla con 3 % de polímero EVA presenta mejores resultados en comparación con la mezcla asfáltica tradicional, incrementando la estabilidad en 6.67 %, alcanzando un valor de 14.24 KN. De manera similar, Hervas (2022) utilizó adiciones de EVA de 1 % a 8 %, encontrando mejoras significativas con una dosificación del 3 % de polímero, donde la estabilidad aumentó en 65.15 %, alcanzando un valor de 14.89 KN.

Pese a las variaciones en la gradación y calidad de agregados, los resultados coinciden con estudios previos al confirmar que existe un porcentaje óptimo de EVA que mejora la estabilidad. En este caso, la adición del polímero elevó la estabilidad a 1364.40 kg, con un incremento del 7.23 %.

En cumplimiento del objetivo específico 02, se evidencio un incremento en la fluencia de la mezcla modificada con 3 % de EVA, alcanzando 12.90 (0.01”), en comparación con 13.25 (0.01”) de la mezcla tradicional, lo que representa una reducción del 2.64 %. Ambos valores se sitúan dentro del rango permitido por el EG-2013 (8–14 centésimas de pulgada). Esta reducción indica una mezcla más estable y con mayor capacidad de resistir la deformación bajo carga, lo que contribuye a prolongar la durabilidad del pavimento.

Según (Carranza, 2020), en su estudio se emplearon adiciones de EVA entre 2.5 % a 6.5 % respecto al peso del ligante asfáltico óptima, concluyéndose que la incorporación de 4.8 % de este polímero genera una mejora significativa en las propiedades Marshall frente al concreto asfáltico tradicional, evidenciada por un incremento del flujo del 7.27 %,

alcanzando un valor de 11.8 centésimas de pulgada. De manera similar, Janmohammadi et al. (2020) evaluaron contenidos de EVA entre 3 % y 7 %, determinando que la dosificación del 3 % optimiza el desempeño de las mezclas asfálticas, logrando aumentar el flujo Marshall hasta 3.7 mm en comparación con la mezcla tradicional. Las variaciones en los valores de flujo respecto a otros estudios se atribuyen a la forma en que el polímero EVA interactúa con el asfalto y los agregados. A pesar de estas diferencias, los resultados obtenidos se mantienen dentro del rango permitido por la normativa.

En cumplimiento del objetivo específico 03, se verificó que la mezcla modificada con 3 % de polímero EVA alcanzó un 3.80 % de vacíos, frente al 4.40 % de la mezcla convencional, lo que representa una reducción del 13.64 %. Ambas se mantienen dentro del intervalo requerido por el EG-2013 (3 %–5 %). El menor contenido de vacíos en la mezcla modificada indica una estructura más densa y menos permeable, lo que favorece su resistencia a la humedad y mejora su comportamiento en condiciones climáticas adversas.

Según (López, 2024), en su estudio se emplearon contenidos de polímero EVA entre 2.5 % a 4.5 %, concluyéndose que la dosificación del 3 % ofrece un desempeño superior respecto a la mezcla asfáltica tradicional, evidenciado por un aumento del porcentaje de vacíos de aire del 8 %, alcanzando un valor de 4.18. De manera similar, Hervas (2022) evaluó adiciones de EVA desde 1 % hasta 8 % y determinó que la incorporación óptima corresponde también al 3 %, ya que a este contenido se obtienen mejoras significativas, registrándose un porcentaje de vacíos de aire de 2.97 %. En comparación con la mezcla convencional, este valor representa una disminución del 40,12 %, lo que indica una reducción considerable.

Los resultados obtenidos respaldan que un 3 % de adición de polímero EVA es el porcentaje óptimo, al presentar mejoras significativas en propiedades físico-mecánicas. Se registró una reducción del 13.64 % en vacíos de aire, con un valor final de 3.80 %.

En cumplimiento del objetivo específico 04, los resultados del ensayo TSR muestran que la mezcla modificada con 3 % de polímero EVA alcanza una resistencia de 1.24 Mpa, frente a los 0.87 Mpa del asfalto convencional, lo que representa una mejora del 42.14 %. Estos resultados evidencian que la mezcla modificada tiene una mayor capacidad para resistir esfuerzos en condiciones de humedad, mejorando su desempeño a lo largo de la vida útil del pavimento. El ensayo de resistencia a compresión diametral permite evaluar la susceptibilidad de las mezclas asfálticas a las condiciones de saturación por aguas superficiales. Sin embargo, no se han encontrado investigaciones que apliquen este ensayo a mezclas asfálticas en caliente modificadas con polímero EVA.

VI. Conclusiones

Conclusión del objetivo general

En cumplimiento del objetivo general se valida mediante evaluación de dos diseños de mezclas asfálticas en caliente con el método Marshall: uno convencional y otro modificado con polímero EVA en proporciones del 2 % al 5 %. El análisis comparativo evidencia que la adición del polímero mejora las propiedades físico-mecánicas, destacando una mayor estabilidad, menor flujo, reducción de vacíos y mejor resistencia a la tracción bajo condiciones de humedad, como se refleja en los resultados de las tablas 47 y 51.

Conclusión del objetivo específico 1

El estudio de la estabilidad Marshall confirma el cumplimiento del objetivo específico 01. Al comparar los resultados, la mezcla asfáltica modificada con 3 % de polímero EVA alcanzó una estabilidad de 1364.40 kg, superando a la mezcla convencional, que registró 1272.40 kg. Ambas mezclas cumplen con superar el límite mínimo exigido por las especificaciones EG-2013 (831.07 kg). Este aumento del 7.23 % (92.00 kgf) evidencia una mayor capacidad para resistir las cargas del tránsito, una mejor cohesión interna y un comportamiento más favorable frente al ahuellamiento.

Conclusión del objetivo específico 2

El análisis del flujo en mezclas asfálticas permite confirmar el cumplimiento del objetivo 02. La mezcla tradicional presentó un valor de 13.25 centésimas de pulgada, mientras que la modificada con 3 % de EVA registró 12.90, representando una reducción del 2.64 %. Ambas se encuentran dentro del rango exigido por las especificaciones EG-2013 (8–14 centésimas de pulgada). Esta leve disminución en el flujo refleja una mezcla más estable y menos susceptible a la deformación, lo que contribuye a un mejor rendimiento del pavimento ante cargas de tránsito.

Conclusión del objetivo específico 3

Los resultados obtenidos validan el cumplimiento del objetivo 03 relacionado con el % de vacíos en mezclas asfálticas modificadas con polímero EVA. Tanto las mezclas convencionales como modificada se mantuvieron dentro del rango permitido por el Manual EG-2013 (3 % – 5 %). La mezcla tradicional presentó un 4.4 % de vacíos, mientras que la modificada con EVA alcanzó un 3.8 %, representando una reducción del 13.64 %. Esta disminución indica menor permeabilidad y, por tanto, mejor comportamiento frente a la humedad.

Adicionalmente, el valor del V.M.A. fue de 16.91 % en la mezcla convencional y de 16.02 % en la modificada, lo cual sugiere una mejor adaptación del cemento asfáltico a las cargas del tránsito a largo plazo, representando una ventaja estructural para la mezcla con EVA.

Conclusión del objetivo específico 4

Los resultados obtenidos en el ensayo TSR confirman que la mezcla modificada con 3 % de polímero EVA presenta una resistencia de 1.24 MPa frente a los 0.87 MPa del asfalto convencional, reflejando una mejora del 42.14 %. Esto evidencia una mejor adherencia y cohesión interna, aumentando su capacidad para resistir tensiones en condiciones de humedad, lo cual valida el objetivo 04 de esta investigación.

VII. Recomendaciones

Recomendación de la conclusión general

Se sugiere considerar el presente estudio como referencia para futuras investigaciones sobre mezclas asfálticas modificadas con distintos porcentajes de polímero EVA en función del peso del cemento asfáltico, orientadas a mejorar el desempeño mecánico del pavimento.

Recomendación de la conclusión específica 1

Se recomienda la sustitución parcial del cemento asfáltico por polímero EVA al 3% del peso del ligante, debido al incremento de la estabilidad Marshall y del desempeño mecánico de la mezcla.

Recomendación de la conclusión específica 2

Se recomienda realizar una investigación de mezclas asfálticas modificadas con polímero EVA, utilizando los métodos Marshall y Superpave, para determinar si el polímero EVA actúa como un aditivo efectivo en la reducción del flujo en estas mezclas, basándose en los resultados positivos observados en estudios previos en la disminución de este parámetro.

Recomendación de la conclusión específica 3

Es fundamental mantener la temperatura adecuada de los componentes (agregados, ligante y polímero) durante la preparación, asegurar una mezcla uniforme y continua, y compactar de inmediato para evitar la formación de vacíos dentro de las probetas.

Recomendación de la conclusión específica 4

Se aconseja llevar a cabo un análisis de la resistencia de las mezclas asfálticas compactadas al deterioro provocado por la humedad, conforme a la norma MTC E-522, con la finalidad de evaluar su rendimiento frente a esta condición de fallo habitual en la pavimentación actual.

VIII. Referencias

- Alarcon, D. D., & Cardenas, Q. M. (2021). *Mezcla asfáltica modificada con polimeros SBS para la optimizacion de las propiedades de la mezcla asfáltica*[Tesis Pregrado,Universidad Ricardo Palma]. Lima - Peru. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14138/4698>
- Alfaidi, H., Baaj, H., El-Hakim, M., & Hamid, A. (2020). Evaluacion de geopolimeros a base de cenizas volantes como modificadores de ligantes asfálticos.[Avances en la ciencia y la ingenieria. doi:<https://doi.org/10.1155/2020/2398693>
- Aucasi, P. A., & Escobar, F. J. (2020). *Diseño de mezclas asfálticas incorporando polimeros EVA para pavimento de la carretera 3N en el distrito de Amarilis, Huanuco-2020.* [Tesis de Pegrado,Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio, Huanuco - Peru. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/66302>
- Balbin, C. M., & Enriquez, L. R. (2020). *Influencia de la mezcla asfáltica modificada con polímeros en zonas cálidas de Perú.* [Tesis de Pregrado,Universidad Ricardo Palma]. Repositorio, Lima - Peru. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14138/3672>
- Ballesteros, E. A., Benavides, J. L., & Barbosa, X. A. (2019). *Estudio de mezclas asfálticas densas con adición de materiales alternativos.*[Tesis de Pregrado, Universidad Catolica de Colombia]. Repositorio, Bogota, Colombia. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/0332b1b3-17dd-4edd-8c57-5effa6f5ebfd/content>
- Bravo, A. R. (2018). *Ecuacion de correlacion del porcentaje de cemento asfáltico a partir de la variacion del porcentaje de agregados.*[Tesis Pregrado, Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga]. Repositorio, Ayacucho - Peru. Obtenido de <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/2777>
- Caceres, T. K. (2024). *Evaluación de las propiedades mecánicas y físicas de las mezclas asfálticas usando conchas de abanico triturado como filler.*[Tesis de

- grado, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo*]. Repositorio Institucional, Chiclayo. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12423/8017>
- Carranza, M. d. (2020). *Efecto del Polímero Etileno Vinil Acetato en la Estabilidad del Concreto Asfáltico*. [Tesis Pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional, Trujillo. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/44641>
- Clavijo, C. C., & Sánchez, R. C. (2021). *Comparación de las propiedades físico-mecánicas, químicas y reológicas del cemento asfáltico con adición de distintos materiales*. [Tesis Pregrado, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña]. Repositorio, Ocaña, Colombia. Obtenido de <https://repositorioinstitucional.ufpso.edu.co/xmlui/bitstream/handle/>
- Condori, O. P. (2020). *Universo, población y muestra*. [Curso Taller]. doi:<https://www.aacademica.org/cporfirio/18>
- Del Rio, P. (2018). La Hipotesis en la Investigación. [Revista de Educación Scielo, Vol.16]. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-76962018000100122
- Diab, A., You, Z., Adhikari, S., You, L., Li, X., & El-Shafie, M. (2020). Investigación de los Mecanismos del Caucho, Estireno – Butadieno (SBR) y Etileno Vinil Acetato (EVA) en el Ligante Asfáltico Basándose en Pruebas Reológicas y Relacionadas con la Fatiga. [Revista de Construction and Building Materials, Vol.262]. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120744>
- Duana, A., & Hernandez, M. (2020). Técnicas e instrumentos de recolección de datos. *Boletín Científico de las Ciencias Económico Administrativas del ICEA*.
- Enriquez, L. F., & Balbin, C. M. (2020). *Influencia de la mezcla asfáltica modificada con polímeros en zonas calidas de Perú*. [Tesis pregrado, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio Institucional, Lima - Perú. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14138/3672>

- Gargate, A. F., & Huamani, S. J. (2018). *Análisis comparativo de mezclas asfálticas con polímeros y tradicional para optimizar propiedades mecánicas en pavimento flexible. [Tesis de Pegrado,Universidad Cesar Vallejo]*. Repositorio institucional, Lima, Peru. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/34891>
- Glosario de terminos de uso frecuente en infraestructura vial. (2018). Lima: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Hernandez, S. R., & Mendoza, T. P. (2018). *Metodologia de la Investigacion: Las rutas cuantitativa,cualitativa y mixta* (Primera Edicion ed.). mexico: Mcgraw-hill / Interamericana Editores,S.A. doi:Google indexó www.biblioteca.cij.gob.mx
- Hervas, M. J. (2022). *Evaluacion de las propiedades fisico-mecanicas y costo de produccion de las mezclas asfalticas modificados con polimeros EVA Y SBR en la ciudad cusco. [Tesis de Pegrado,Universidad Andina del Cusco]*. Repositorio institucional, Cusco. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12557/5135>
- Huillcapoma, M., & Figueroa, H. J. (2022). *Propiedades de la mezcla asfáltica y su incidencia en el ahuellamiento.[Tesis de pregrado,Universidad Ricardo Palma]*. Repositorio Institucional, Lima. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14138/5788>
- Janmohammadi, O., Safa, E., Zarei, M., & Zarei, A. (2020). Efectos Simultáneos del Etileno Vinil Acetato (EVA) y la fibra de Vidrio Sobre las Propiedades de la Mezcla Asfáltica en Caliente (HMA). [Revista de Ciencias Aplicadas SN,Vol.2]. doi:<https://doi.org/10.1007/s42452-020-2977-8>
- Lopez, V. V. (2024). *Analisis de una Mezcla Asfaltica con Incorporacion de Polimero de Etileno Vinil Acetato (EVA). [Tesis de Pregrado,Universidad Señor de Sipan]*. Repositorio Institucional, Pimentel-Chiclayo. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12802/13692>
- Maldonado, P. A., Cedeño, c. J., & Vizcaino, Z. I. (2023). Metodologia de la investigacion cientifica.[Revista,Vol 7]. *Ciencia latina internacional*.

- Menendez, A. J. (2016). *Ingeniería de Pavimentos* (5ta Edición ed.). Lima, Perú: Instituto de la Construcción y Gerencia - ICG.
- Meza, C. L., & Palomino, A. K. (2021). *Mezcla asfáltica modificada con polímeros para el mejoramiento del pavimento asfáltico en zona de selva. [Tesis de Pregrado, Universidad Ricardo Palma]*. Repositorio, Lima - Perú. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14138/4769>
- Ministerio de transportes y comunicaciones. (2013). *Especificaciones técnicas generales para construcción-EG [Manual de carreteras]*. Lima, Perú.
- Ministerio de transportes y Comunicaciones. (2024). *Plan Estratégico Sectorial Multianual 2024 - 2030*. Lima, Perú.
- Miraya, I. S., & Nahuala, C. H. (2019). *Pasos para elaborar la investigación y la redacción de la tesis universitaria*. Lima: Editorial San Marcos E I R L.
- Orozco, T. M. (2019). *Efecto de promotores de adherencia en las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas en caliente. [Tesis Pregrado, Universidad del Norte]*. Repositorio, Barranquilla. Obtenido de <https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/10128/1140828177.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ponce, S. F., & Villa, C. C. (2020). *Análisis comparativo de características y propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica en caliente adicionada con fibras de polipropileno respecto a una mezcla asfáltica en caliente convencional, empleando los agregados de la cantera. [tesis de pregrado]*. Universidad Católica de Santa María, Arequipa. Obtenido de <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/10429>
- Praveen, K., Bv, K. K., Manjunata, S., & PB, G. (2024). Investigación experimental sobre el rendimiento de formación de surcos de las mezclas bituminosas modificadas con polímeros (PMB). [Ingeniería Civil y Arquitectura, Vol 12 Edición 2]. *ARRB Group Limited*. Obtenido de <https://doi.org/10.13189/cea.2024.120241>

- Reales, C. L., Robalino, M. G., Peñafiel, L. A., Cárdenas, M. J., & Cantuña, V. P. (2022). El Muestreo Intencional No Probabilístico como herramienta de la investigación científica en carreras de Ciencias de la Salud. *Revista Universidad y Sociedad*, 14(S5), 681-691., 70.
- Renego, D. (2022). España suspende en la conservación de las carreteras y estado del pavimento. *ABC.ES*. Obtenido de https://www.abc.es/motor/reportajes/abci-espana-suspende-conservacion-carreteras-y-estado-pavimento-201901230217_noticia.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.abc.es%2Fmotor%2Freportajes%2Fabci-espana-suspende-conservacion-carreteras-y-estado-pavimento-201901230217_
- Repsol. (2023). <https://www.repsol.com/es/productos-y-servicios/quimica/productos/eva/index.cshtml>.
- Santos, V. D., & Estrada, G. E. (2021). *Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas de una mezcla asfáltica modificada con nanosilice respecto a una mezcla asfáltica betutec PG 70-28.* [Tesis Pregrado, Universidad Andina de Cusco]. Cusco - Peru: Repositorio. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12557/5006>
- Setyawan, A., Sistra, M., Sarwono, D., & Zulfadly, D. a. (2019). Propiedades Físicas y Mecánicas del Aglutinante Modificado con Etileno Vinil Acetato (EVA). [Revista Serie de Conferencias del IOP Sobre Ciencia e Ingeniería de Materiales, Vol.578]. doi:10.1088/1757-899X/578/1/012080
- Villa, R. P. (2022). *Incidencia de la mineralogía de los agregados en las mezclas asfálticas en caliente.* [Tesis de Pregrado, Universidad Peruana los Andes]. Huancayo - Peru. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12848/4552>