

“Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica en frío incorporando fibra de vidrio – Sihuas, Áncash 2024”

por Felipe Villavicencio Gonzalez

Fecha de entrega: 29-oct-2025 03:41p. m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2797087552

Nombre del archivo: INFORME_DE_TESIS_-_FINAL.docx (1.76M)

Total de palabras: 19323

Total de caracteres: 98490

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**“Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica en frío
incorporando fibra de vidrio – Sihuas, Áncash 2024”**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
CIVIL**

Autor:

Bach. Villanueva Capillo, Jairo Alberto

Asesor:

Ms. Ing. Villavicencio González, Felipe Eleuterio

DNI: 26673663

ORCID: 0000-0002-3500-2378

NUEVO CHIMBOTE – PERÚ

2025

DEDICATORIA

A mi familia, por todo su apoyo incondicional.

El autor

AGRADECIMIENTO

Al Ing. Felipe Villavicencio González por su asesoramiento en la realización de esta investigación.

El autor

3 Índice General

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTO.....	III
ÍNDICE GENERAL.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
RESUMEN.....	X
ABSTRACT.....	XI
1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	13
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	15
1.2.1. Problema general.....	15
1.2.2. Problemas específicos.....	15
1.3. OBJETIVOS.....	15
1.3.1. Objetivo General.....	15
1.3.2. Objetivos Específicos.....	15
1.4. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS.....	15
1.5. JUSTIFICACIÓN.....	16
1.5.1. Justificación Teórica.....	16
1.5.2. Justificación Técnica.....	16
1.5.3. Justificación Económica - Ambiental.....	16
1.6. IMPORTANCIA.....	17
2. MARCO TEÓRICO.....	19
2.1. ANTECEDENTES.....	19
2.1.1. Internacionales.....	19

2.1.2.	Nacionales.....	21
2.2.	MARCO CONCEPTUAL.....	23
2.2.1.	Mezcla Asfáltica en Frío.....	23
2.2.2.	Fibra de Vidrio	40
3.	METODOLOGÍA.....	46
3.1.	ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN.....	46
3.2.	MÉTODO.....	46
3.2.1.	Tipo de Investigación.....	46
3.2.2.	Alcance de Investigación	46
3.3.	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	47
3.4.	POBLACIÓN	48
3.5.	MUESTRA	48
3.6.	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	50
3.6.1.	Variables.....	50
3.6.2.	Matriz de Consistencia	51
3.6.3.	Matriz de Operacionalización de Variables	52
3.7.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	53
3.7.1.	Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos (MTC E 204, ASTM C136/C136M-19).....	53
3.7.2.	Gravedad específica y absorción de agregados (MTC E 205, ASTM C128-22) (MTC E 206, ASTM C127-24).....	54
3.7.3.	Abrasión Los Ángeles (L.A.) al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37,5 mm (1 ½”) (MTC E 207, ASTM C131/C131M-20)	56
3.7.4.	Durabilidad al sulfato de sodio y sulfato de magnesio (MTC E 209, ASTM C88/C88M-24).....	57

3.7.5.	¹ Porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso (MTC E 210, ASTM D5821-13).....	58
3.7.6.	Angularidad (MTC E 222, ASTM C1252-23).....	59
3.7.7.	¹ Partículas planas y alargadas (MTC E 223, ASTM D4791-19).....	60
3.7.8.	⁶ Equivalente de arena (MTC E 114, ASTM D2419-22).....	61
3.7.9.	¹ Diseño de mezcla asfáltica en frío.....	63
3.8.	³ TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	66
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	68
4.1.	RESULTADOS.....	68
4.1.1.	Caracterización de los ¹ Agregados Pétreos para el Diseño de Mezcla Asfáltica.....	68
4.1.2.	¹ Diseño de Mezcla Asfáltica en Frío con Emulsión.....	70
4.1.2.1.	Gradación de la mezcla.....	70
4.1.3.	Incorporación de fibra de vidrio a ¹ la mezcla asfáltica en frío.....	79
4.1.4.	¹ Comparación de los valores de estabilidad y flujo de la mezcla convencional y modificada con fibra ³ de vidrio.....	80
4.1.5.	³ Prueba de Hipótesis.....	82
4.2.	DISCUSIÓN.....	85
5.	²⁰ CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	90
5.1.	CONCLUSIONES.....	90
5.2.	RECOMENDACIONES.....	91
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93

Índice de Tablas

Tabla 1	¹⁶ Requisitos de los agregados pétreos para pavimento asfáltico en frío	25
Tabla 2	Gradaciones para mezclas densas en frío	31
Tabla 3	Tipos de mezcla en función del tipo y espesor compacto de la capa.....	31
Tabla 4	¹ Parámetros para diseño de mezcla densa en frío con emulsión asfáltica	40
Tabla 5	Muestras para el grupo de control	49
Tabla 6	Muestras para el grupo experimental.....	50
Tabla 7	⁶⁹ Matriz de consistencia	⁵¹
Tabla 8	Matriz de operacionalización de variables	³⁰ ⁵²
Tabla 9	Gravedad específica y absorción del agregado grueso.....	69
Tabla 10	Gravedad específica y absorción del agregado fino	69
Tabla 11	⁷ Comparación de los ensayos a los agregados con los parámetros del MTC	70
Tabla 12	Prueba de recubrimiento o cobertura.....	72
Tabla 13	Estabilidad de la mezcla en función de la humedad de compactación.....	72
Tabla 14	Cuadro resumen con porcentajes de asfalto residual.....	74
Tabla 15	¹ Propiedades Método Illinois – Marshall Modificado.....	78
Tabla 16	Diseño de mezcla asfáltica en frío con emulsión (patrón)	78
Tabla 17	³⁶ Proporción de fibra de vidrio y agregados para la mezcla.....	79
Tabla 18	¹ Resultados de la mezcla asfáltica en frío con fibra de vidrio	80
Tabla 19	Estabilidad de briquetas con 0.1% de fibra para prueba de hipótesis.....	82

Índice de Figuras

Figura 1 Curvas típicas del diseño de mezcla en frío con emulsión	39
Figura 2 Diagrama de diseño de investigación	48
Figura 3 Composición de las mezclas con fibra de vidrio	50
Figura 4 Análisis granulométrico de los agregados pétreos	54
Figura 5 Saturación de agregados para ensayo de gravedad específica y absorción	56
Figura 6 Esferas metálicas para ensayo de abrasión	57
Figura 7 Muestras para durabilidad al sulfato de magnesio del agregado fino	58
Figura 8 Angularidad del agregado fino	60
Figura 9 Ensayo de partículas planas y alargadas	61
Figura 10 Ensayo de equivalente de arena	62
Figura 11 Curva granulométrica del agregado grueso	68
Figura 12 Curva granulométrica del agregado fino	68
Figura 13 Gradación de los agregados combinados para la mezcla densa en frío	71
Figura 14 Estabilidad vs Humedad de compactación	73
Figura 15 Gráfica de Estabilidad seca y húmeda vs Asfalto Residual	74
Figura 16 Gráfica de Pérdida de estabilidad vs Asfalto Residual	75
Figura 17 Gráfica de Densidad bulk seca vs Asfalto Residual	75
Figura 18 Gráfica de Humedad absorbida vs Asfalto Residual	76
Figura 19 Gráfica de Vacíos totales vs Asfalto Residual	77
Figura 20 Gráfica de Flujo vs Asfalto Residual	77
Figura 21 Comparación de los valores de estabilidad de la mezcla convencional y modificada	80
Figura 22 Comparación de los valores de flujo de la mezcla convencional y modificada.....	81
Figura 23 Comparación de los valores de estabilidad para un flujo de 4.25 mm.....	81

Figura 24 Distribución <i>t</i> de Student para estabilidad ⁷ de briquetas con 0.1% de fibra de vidrio.....	84
--	----

RESUMEN

La presente investigación tuvo el objetivo de evaluar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica en frío al incorporarle fibra de vidrio. Este estudio tuvo un enfoque cuantitativo, alcance correlacional y diseño cuasiexperimental. El desarrollo de la investigación abordo varias etapas, comenzando por evaluar la calidad de los agregados provenientes de la provincia de Sihuas en Áncash. Luego, se realizó el diseño de la mezcla asfáltica en frío, del tipo densa y con emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta como ligante, para esto se usó el Método Illinois que es un derivado del Método Marshall para mezclas en caliente, este método dio como dosificación 48.0% de grava, 52.0% de arena, 7.4% de emulsión asfáltica y 3.6% de agua. Se incorporó 0.1%, 0.2% y 0.3% de fibra de vidrio sustituyéndola por parte del agregado fino. La cantidad de 0.1% de fibra fue la que dio mejores resultados en la mezcla, para un mismo flujo de 4.25 mm la estabilidad aumentó de 1613.3 kg a 1750.7 kg, lo que significa un incremento del 8.5%, esto demostró que al incorporarle fibra de vidrio a la mezcla asfáltica en frío mejoran la estabilidad y flujo.

Palabras clave: Mezcla asfáltica, fibra de vidrio, emulsión asfáltica.

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the mechanical properties of a cold asphalt mixture when fiberglass is added. This study had a quantitative approach, correlational scope, and quasi-experimental design. The research was conducted in several stages, beginning with an evaluation of the quality of aggregates from the province of Sihuas in Áncash. Next, a dense cold asphalt mixture was designed using slow-breaking cationic asphalt emulsion as a binder. The Illinois Method, which is derived from the Marshall Method for hot mixes, was used for this purpose. This method yielded a dosage of 48.0% gravel, 52.0% sand, 7.4% asphalt emulsion, and 3.6% water. 0.1%, 0.2%, and 0.3% fiberglass was incorporated, replacing part of the fine aggregate. The 0.1% fiber content yielded the best results in the mix. For the same 4.25 mm flow, stability increased from 1613.3 kg to 1750.7 kg, representing a 8.5% increase. This demonstrated that adding fiberglass to the cold asphalt mix improves stability and flow.

Keywords: Asphalt mixture, fiberglass, asphalt emulsion.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

I. Introducción

I.1. Descripción del problema

En la construcción y mantenimiento de pavimentos, las mezclas asfálticas en frío se utilizan ampliamente debido a su facilidad de aplicación y reducción de costos energéticos en comparación con las mezclas en caliente. El manual MS-14 del Instituto del Asfalto nos menciona tres ventajas que tiene una mezcla en frío: es versátil, se encuentra disponible varios tipos y grados de asfalto para satisfacer los diferentes requisitos de diferentes agregados y condiciones climáticas; es económico, posibilita lograr altas tasas de producción con una inversión comparativamente baja en equipos y energía pudiendo utilizar agregado disponible localmente; y no contaminante, como no se necesitan secadores para calentar el agregado no se produce humo y la emisión de polvo es bastante baja; además, cuando se utiliza asfalto emulsionado generalmente no se producen humos ni olores desagradables; porque, para usarse en la mezcla no requiere que se caliente (Asphalt Institute, 1997, p. 1). Sin embargo, uno de los principales desafíos de estas mezclas es su rendimiento mecánico, ya sea en cuanto a la durabilidad, resistencia a la fatiga y capacidad para soportar cargas repetitivas y condiciones ambientales adversas. Las mezclas asfálticas en frío suelen mostrar menor resistencia mecánica en comparación con las mezclas en caliente, se puede evidenciar esto en estudios como los de Bulla et al. (2017), realizados en Colombia, los cuales mostraron que una MDC-19 (mezcla densa en caliente) cuenta con mejores características técnicas que una MDF-19 (mezcla densa en frío), ambas elaboradas con los mismos agregados pétreos, en nuestro país según el estudio de Aranguri y Valverde (2018) el cual buscó comparar ambos tipos de mezclas se halló que la estabilidad de la mezcla en caliente es un 24.72% mayor que la mezcla en frío. Esta es una de las razones por la cual el Instituto del Asfalto dice, en su manual MS-14, que el uso de mezclas en frío como capa superficial es adecuada solo para tráfico medio y ligero (Asphalt Institute, 1997, p. 2).

Estas desventajas en las mezclas en frío se deben principalmente a que no son calentadas antes de su aplicación como las mezclas en caliente, al calentar tanto los agregados como el ligante asfáltico, se consigue una mejor adherencia entre ellos, lo que garantiza que los componentes de la mezcla trabajen de forma conjunta ³ para resistir las cargas del tráfico y las condiciones climáticas adversas. Como consecuencia de no ser calentadas, las mezclas en frío pueden desgastarse más rápido y presentar los problemas comunes que vemos en los pavimentos (Gonzales, 2023).

Entonces si se mejorará esta deficiencia y sumadas todas las ventajas que posee sería un buen reemplazo para la mezcla en caliente sobre todo para ser usado en lugares como las zonas altoandinas o selva en donde no hay plantas de asfalto en caliente.

Una posible solución ²² para mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en frío es la incorporación de aditivos que refuercen la cohesión interna y mejoren ¹ su comportamiento frente a las cargas dinámicas. Existen muchas investigaciones en las cuales se han agregado diferentes tipos de aditivos a las mezclas asfálticas para mejorar su desempeño, tales como: PET, caucho, polipropileno, escoria, entre otras más; para este proyecto se optó por usar fibra de vidrio como aditivo, el cual es un material muy liviano y con una gran resistencia mecánica. Las fibras de vidrio han demostrado potencial para mejorar la resistencia a la fisuración, aumentar la durabilidad y ⁴ mejorar la estabilidad de las mezclas asfálticas en caliente en diversas investigaciones, pero su uso en ¹ mezclas asfálticas en frío no ha sido ampliamente estudiado, lo que genera un vacío de conocimiento sobre los efectos específicos de esta incorporación en las propiedades mecánicas de dichas mezclas.

De forma resumida, la problemática se centra en la baja durabilidad y limitada resistencia mecánica ²⁷ de las mezclas asfálticas en frío tradicionales y en cómo la incorporación de fibra de vidrio puede representar una solución viable para mejorar dichas propiedades, generando mezclas más eficientes y resistentes para su uso en pavimentos.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

- ¿Cómo cambian las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica en frío incorporando fibra de vidrio en Sihuas, Áncash 2024?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es el diseño de la mezcla asfáltica en frío convencional?
- ¿Cuáles son los porcentajes de sustitución de fibra de vidrio por el agregado fino en la mezcla asfáltica en frío convencional?
- ¿Cuál es el porcentaje de sustitución de fibra de vidrio que otorgue la estabilidad y flujo más eficiente en la mezcla modificada?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Evaluar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica en frío incorporando fibra de vidrio en Sihuas, Áncash 2024.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Realizar el diseño de la mezcla asfáltica en frío convencional.
- Probar la sustitución de diferentes porcentajes de fibra de vidrio por el agregado fino en la mezcla asfáltica en frío convencional.
- Definir el porcentaje de sustitución de fibra de vidrio que otorgue la estabilidad y flujo más eficiente en la mezcla modificada.

1.4. Formulación de Hipótesis

Las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica en frío mejoran significativamente al incorporar fibra de vidrio.

1.5. Justificación

1.5.1. Justificación Teórica

Lo que se busca con esta investigación es aumentar el conocimiento que se tiene sobre ¹la mezcla asfáltica en frío hecha con emulsión asfáltica y como esta interactúa con la fibra de vidrio. En nuestro país existen varias investigaciones con la inclusión de este material, pero solo en ⁷⁹mezclas asfálticas en caliente, por lo que se pretende llenar ese vacío de conocimiento. Además, se planteó usar materiales provenientes de Sihuas para emular como sería el comportamiento de esta mezcla asfáltica si se fabricara en lugares de la sierra del país con los materiales propios del lugar los cuales se trabajan a partir de pétreos obtenidos en las riberas de los ríos.

1.5.2. Justificación Técnica

Uno de los principales problemas de la mezcla en frío es su baja resistencia por lo que en esta investigación se busca mitigar esa deficiencia al agregarle fibra de vidrio.

1.5.3. Justificación Económica - ¹Ambiental

La mezcla asfáltica en frío no requiere de maquinaria, equipo o un proceso complejo para su fabricación como con las mezclas en caliente, tampoco requiere de un gasto energético, estas ventajas la hacen una buena alternativa económica para su aplicación en ciertas obras donde sería poco viable usar mezclas en caliente. ¹La fibra de vidrio es un material de bajo costo y sumando sus propiedades técnicas es una buena opción como refuerzo.

En cuanto a lo ambiental la mezcla en frío al ser preparada sin calentarse se ahorra en consumo de energía y no emite gases contaminantes. También, la mezcla hecha con emulsión es una mejor opción en el aspecto ambiental ¹⁰en comparación con la mezcla en frío hecha con asfalto diluido, este tipo de asfalto usa disolventes como nafta que al evaporarse llegan a contaminar el medio ambiente.

1.6. Importancia

La demanda de materiales para carreteras más resistentes y respetuosos con el medio ambiente, adaptados al clima actual, en el que la preservación del medio ambiente y la eficiencia energética se están convirtiendo en preocupaciones prioritarias, es lo que ha impulsado este estudio. El objetivo de este estudio es utilizar ¹ fibra de vidrio, un material barato y ¹ fácilmente disponible, para mejorar el rendimiento mecánico ¹ de las mezclas asfálticas en frío. Además, ¹ se pretende avanzar en ¹ el conocimiento ¹ de un área aún por descubrir, como ¹ es la de las mezclas asfálticas en frío, que reciben menos atención en nuestro país que las mezclas en caliente.

A nivel técnico, la investigación busca una alternativa viable que incremente la estabilidad, la resistencia al flujo y la durabilidad ³ de las mezclas en frío, sin comprometer su facilidad ³ de aplicación ni su bajo impacto ambiental. La incorporación de fibra de vidrio representa una opción que puede fortalecer la estructura interna del material, reduciendo el deterioro prematuro y extendiendo ³⁸ la vida útil de los pavimentos.

Asimismo, ³⁸ esta investigación puede servir como guía para diseñar mezclas en frío emulsionadas mediante el Método Illinois y los resultados pueden ayudar a futuras tesis e investigaciones que den como fin la aplicación extendida de este tipo de mezcla en obras viales y una adopción generalizada por parte de la comunidad dedicada a la construcción.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacionales

Lara y Suquillo (2024) en su tesis de titulación realizada en Ecuador, tuvieron como objetivo evaluar las cualidades físico-mecánicas de la mezcla asfáltica en frío al incorporar agregado reciclado y fibras de vidrio; con esto buscaron determinar si puede ser aplicada en tareas regulares de bacheo o en rehabilitación de vías. La mezcla asfáltica en frío, para esta investigación, se creó incrementando gradualmente los porcentajes de fibras de vidrio hasta llegar al 1,25%; además de usar material fresado, agregados naturales y asfalto diluido RC-250. La mezcla modificada dio buenos resultados; las fibras de vidrio hicieron que las briquetas de asfalto mejoraran sus propiedades Marshall (estabilidad y flujo), con una estabilidad de 1986.15 lb con respecto a la mínima de 1800 lb y un flujo dentro del rango límite de 30 a 55 pulgadas sobre cien para una dosificación de 2.78% de RC-250 y 0.5 % de fibras de vidrio.

Bonilla (2024) en su estudio realizado en Ecuador, tuvo como meta examinar el comportamiento de una mezcla asfáltica elaborada en caliente a la cual se le adicionó fibra de vidrio. Inicialmente, se realizó una secuencia de ensayos sobre los agregados pétreos para determinar qué tan idóneos eran para la producción de briquetas asfálticas. La cantidad óptima de ligante asfáltico resultó ser del 6,45%. Comparando los resultados obtenidos para porcentajes del 5, 7.5, 10, 15 y 25%, se encontró la proporción ideal de fibra de vidrio; el 5% mostró las mejores cualidades. Ya finalizadas todas las etapas de la investigación, los resultados demostraron que el concreto asfáltico al que se le agregó fibra de vidrio vio reducida su estabilidad en un 11,05% con respecto al concreto asfáltico normal. El resto de sus características, a excepción de los vacíos rellenos de asfalto, que superaban en un 5.5% los criterios Marshall, cumplían todos los parámetros.

Eguino y Miranda (2023) en su tesis realizada en Bolivia, se propusieron crear un micropavimento añadiéndole fibra de vidrio con el objetivo de evitar el agrietamiento por reflexión y aumentar la cohesividad a la superficie de apoyo. Para ello, siguieron los criterios de la edición de 2010 de la ISSA - A143, comenzando por ¹ la evaluación y caracterización de los materiales que se utilizarían en el diseño del micropavimento. Sólo dos de las cuatro mezclas (M1, M2, M3 y M4) se incluyeron en el diseño debido a las limitaciones del proyecto y a las modificaciones del material, estas fueron M2 y M4. Utilizando el ensayo ⁴² de rueda cargada (LWT) y el ensayo de ⁴² abrasión en húmedo (WTAT) junto con los criterios de intersección y área equivalente, se calculó la dosificación ideal del ⁴² contenido de asfalto para el diseño de micropavimentos convencionales. Los resultados arrojaron valores de 14% y 11% de emulsión para las mezclas M2 y M4, respectivamente. A partir de estos resultados, se utilizó el criterio de intersecciones para calcular la proporción ideal ³⁶ de fibra de vidrio (FV), obteniéndose porcentajes de 0,13 y 0,19% para las muestras M2 y M4, respectivamente. Finalmente, se comprobó que la adición de fibra daba lugar a mayores pérdidas por abrasión en húmedo; sin embargo, no había diferencias apreciables en la exudación de asfalto. El micropavimento presentaba un buen comportamiento en términos de compactación y desplazamiento. Por su mayor rentabilidad, debido a su menor contenido de emulsión, la mezcla M4+FV fue la opción más práctica.

Quimbita (2023) en su estudio en el campo de las mezclas de asfalto utilizó ²³ agregado pétreo de la cantera Herrera de la ciudad de Latacunga para elaborar tres briquetas de mezcla en frío para cada porcentaje de 3, 6, 9, 12 y 15% de adición de caucho; esto lo hizo mediante el método Marshall para obtener parámetros que le permitieran posteriormente diseñar un pavimento flexible. Al realizar los ensayos en las briquetas, ¹ los valores de estabilidad/flujo de las muestras modificadas, no superaban los valores obtenidos en las muestras sin adición de

caucho, concluyéndose que agregar dicho material ²⁵ a la mezcla no mejora las propiedades mecánicas.

Rodríguez y Sandoval (2022), en su investigación desarrollada en Colombia, centraron su estudio en evaluar el desempeño de una ¹⁰ mezcla asfáltica en frío que utilizó como ligante una emulsión asfáltica de rompimiento lento, incorporando diferentes proporciones de cemento de alta resistencia (2%, 4%, 6%, 8% y 10%) dentro del material de relleno. La metodología empleada fue cuantitativa de tipo experimental. Una vez diseñada la mezcla estándar, se determinó que la proporción ideal de emulsión era del 7%, se prepararon 7 briquetas para cada porcentaje de cemento las cuales se ensayaron en el equipo Marshall. Para un 10% de cemento, la estabilidad y flujo fueron 15.07 kN y 3.94 mm respectivamente; estos valores dieron la mayor relación estabilidad/flujo que fue de 3.83 kN/mm.

2.1.2. Nacionales

El objetivo de la tesis de García (2023) fue conocer ¹ las características físicas y mecánicas de la combinación de mezcla en caliente con fibra de vidrio. Se realizó utilizando un diseño experimental, aplicado, explicativo y con un enfoque cuantitativo. Para este caso la técnica de estudio fue mediante la observación utilizando como instrumentos guías o fichas de observación. La población y la muestra fueron las mismas e incluyó un total de 24 briquetas. Para evaluar los datos, se aplicó estadística descriptiva. Para las pruebas de viscosidad, densidad, porcentaje de vacíos y estabilidad, las proporciones en las que se agregó la fibra de vidrio oscilaron entre 3% y 6%. Se concluyó que una ¹³ adición de fibra de vidrio del 4% produce los mejores resultados en términos de cualidades mecánicas y físicas de la mezcla asfáltica.

Paitán y Rojas (2023) realizaron una tesis en la que trataron de averiguar cómo afecta ¹ el polvo de sílice a una mezcla asfáltica en frío tomando dicho aditivo de las canteras Pachacayo y San Lorenzo en Huancayo. Emplearon el nivel explicativo, diseño experimental e investigación aplicada; los porcentajes utilizados comenzaron desde el 1% y fueron

aumentando en 0.25% hasta llegar al 2%. La técnica de muestreo fue no probabilística. Se elaboraron 33 briquetas utilizando el método Illinois y de ellas 18 se hicieron para la muestra estándar y 15 para la muestra con sílice. Se dosificó la muestra estándar en proporciones de 8.5% de emulsión asfáltica, 3.25% de agua, 31.1% de árido grueso y 60.4% de árido fino para la cual dio 6 kn en estabilidad, flujo de 26.5 mm, y densidad de 2.29 gr/cm³. Para la muestra con sílice, la cantidad ideal de este aditivo fue de 1.70%, con una estabilidad de 5.47 kn, flujo de 18.2 mm, y densidad de 2.20 gr/cm³. Se determinó que existe una mejora positiva en la mezcla asfáltica, aunque la estabilidad de la mezcla que contiene sílice se redujo en un mínimo de 8.83%, el flujo mejoró al reducirse en 45.6% aumentado la resistencia flexible.

Con el fin de investigar las variaciones en la estabilidad y el flujo de una mezcla asfáltica fría, Rodríguez (2023) añadió fibras de polietileno a la mezcla. Este trabajo empleó un diseño experimental y tuvo un alcance explicativo. Se determinó que la proporción ideal de fibra de polietileno era del 0.5 %. Tras la adición, la fluidez aumentó de 3.5 a 4.3 mm y la estabilidad pasó de 13402.77 a 13871.43 N. Según los resultados, la fibra de polietileno mejora la resistencia a la fluidez y la estabilidad.

Gavino (2022) en su estudio realizado en Huancayo, tuvo como objetivo conocer el grado de variación de la resistencia mecánica de una mezcla asfáltica en frío a la cual le adicionó poliestireno expandido. El estudio tuvo un diseño experimental. Dos tipos diferentes de mezclas constituyeron el tamaño de la muestra, una con un diseño tradicional y la otra con inclusión de poliestireno. El poliestireno fue añadido en proporciones de 0.01%, 0.02%, 0.03% y 0.04% del total de la mezcla. Se realizaron tres pruebas para cada porcentaje, para un total de doce muestras. Según los resultados, 2.28 resultó ser el valor de la densidad Bulk promedio (G) de la mezcla asfáltica convencional, pero las mezclas que contenían poliestireno al 0.04%, 0.03%, 0.02% y 0.01% tenían valores G de 2.17, 2.18, 2.19 y 2.23, respectivamente. La estabilidad (kg-f) media de la mezcla convencional fue de 929.00, pero las medias de las

modificadas con poliestireno fueron de 1235.00, 1160.67, 1315.33 y 1471.00. En cuanto al flujo, la media para la mezcla tradicional fue de 10.10 y las modificadas fueron 11.63, 11.27, 8.20 y 7.20. ¹ Como resultado, se determinó que la adición de poliestireno expandido provoca una variación considerable de la resistencia mecánica.

Ponce (2021) en su tesis de titulación buscó conocer el impacto que tendría el uso de fibras de vidrio al ser consideradas como aditivo ¹ dentro del diseño de mezclas asfálticas ¹ en caliente para reparar pavimentos flexibles y proporcionar un remedio a los problemas con el asfalto y, por extensión, la capa asfáltica. Este estudio utilizó un diseño experimental y un enfoque cuantitativo con un nivel descriptivo-explicativo. Como técnica se usó la observación experimental realizada mediante ensayos de laboratorio y como instrumentos las guías de observación y formatos de recolección de resultados. Se mostraron mejoras ²² en la mezcla en caliente para la rehabilitación de pavimentos flexibles, en la que se produjeron ocho briquetas: dos sin ninguna adición de fibra y seis con porcentajes del 1%, 3% y 5% ¹ de fibras de vidrio añadidas. ¹ Al hacer una comparación entre el asfalto modificado con el asfalto desprovisto de ¹ fibras de vidrio, se observaron resultados favorables. Basándose en los resultados, se determinó ¹ que el asfalto modificado que contiene un 3% de fibras de vidrio presenta una estabilidad y un comportamiento de flujo superiores, con valores respectivos de 1122 kg y 3.43 mm.

⁵ 2.2. Marco conceptual

2.2.1. Mezcla Asfáltica en Frío

La combinación de asfalto emulsionado o diluido con agregado mineral, ambos sin calentar, se le conoce como mezcla asfáltica en frío (Asphalt Institute, 1997, p. 1).

Son combinaciones, según Ramos y Muñiz (2013), formadas por ¹ uno o más áridos pétreos combinados con agua y una emulsión asfáltica. Como el asfalto es menos viscoso en esta forma de emulsión, la mezcla es más trabajable y sencilla de compactar. Cuando se ha evaporado suficiente agua la emulsión rompe y la mezcla en frío empieza a adquirir buena

resistencia. Estas mezclas se producen sin calentar los áridos utilizando asfaltos líquidos (p. 50).

Para esta investigación se tendrá en cuenta la definición hecha por el Instituto del Asfalto ya que es la más antigua y define de manera sencilla y práctica lo que una mezcla asfáltica en frío es.

2.2.1.1. Componentes

a. Agregados Pétreos. Según Guevara et al. (2010) la definición que nos dan orientada a las mezclas asfálticas y pavimentos es que son materiales provenientes de la desintegración mineral utilizado como partículas o piezas graduadas en ²⁷ un pavimento de mezcla asfáltica en caliente o en frío. También recibe los nombres de material granular o agregado mineral. Las arenas y gravas son los agregados utilizados en las capas de bases o subbases granulares, así como en las mezclas asfálticas y es lo que les proporcionan resistencia, estabilidad y durabilidad a dichas estructuras al formar la base o el esqueleto (p. 35).

También pueden definirse como los áridos que se mezclan con diferentes tipos de asfalto para crear mezclas con distintos fines. Estos áridos constituyen el 90% o más del peso de las mezclas y tienen un gran impacto en las cualidades del producto final. Los áridos más utilizados son la arena, el relleno mineral, la grava triturada o natural, la piedra partida y la escoria (Asphalt Institute, 1986, p. 56).

Según el MTC (2015), existen dos tipos de áridos pétreos: el ¹ **agregado fino**, que se compone de arena triturada o de ¹ una mezcla de esta con arena natural y su tamaño está comprendido ³⁷ entre los tamices de 4,75 mm y 75 μ m (Nº 4 y Nº 200), y el **agregado grueso**, ⁴⁵ **que** se obtiene triturando roca, grava o una combinación de ambas, este no debe pasar el tamiz de 4,75 mm (Nº 4). Además, se menciona el **polvo mineral o relleno**, que suele proceder de la trituración de áridos o ser usado directamente de artículos comerciales como la cal hidratada o el cemento portland, que debe pasar el tamiz de 75 μ m (Nº 200).

El **Manual de Carreteras - Especificaciones Técnicas Generales para Construcción** del MTC indica que se deben realizar ensayos a los agregados pétreos antes de ser usados en la mezcla asfáltica con el motivo de garantizar una buena calidad del producto final, estos ensayos y sus procedimientos se explican de manera detallada en el **Manual de Ensayo de Materiales del MTC (2017)**.

Tabla 1

Requisitos de los agregados pétreos para pavimento asfáltico en frío

Ensayo		Requerimiento					
		Bajo tránsito		Tránsito medio		Alto tránsito	
		Agregado grueso	Agregado fino	Agregado grueso	Agregado fino	Agregado grueso	Agregado fino
Desgaste Los Ángeles	MTC E 207	25% max. (rodadura)	35% max. (intermedia)	25% max. (rodadura)	35% max. (intermedio y base)	25% max. (rodadura)	35% max. (intermedio y base)
Durabilidad	MTC E 209	12% max.	12% max.	12% max.	12% max.	12% max.	12% max.
		18% max.	18% max.	18% max.	18% max.	18% max.	18% max.
Partículas fracturadas mecánicamente % mínimo 1 cara/2 caras	MTC E 210	75/- (rodadura)	60/- (intermedia)	75/60 (rodadura)	75/- (intermedia)	85/70 (rodadura)	75/- (intermedia)
				60/- (base)	60/- (base)		
Angularidad	MTC E 222		40% mín. (rodadura)	45% mín. (rodadura)	40% mín. (intermedia)	45% mín. (rodadura)	40% mín. (intermedia)
			35% mín. (intermedia)	35% mín. (base)		35% mín. (base)	
Partículas planas y alargadas	MTC E 223	10% max.		10% max.		10% max.	
Equivalente de arena	MTC E 114		50% mín.		50% mín.		50% mín.

Nota. Adaptado de *Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción* (p. 294), por MTC, 2015.

- Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos

La granulometría de los agregados se realiza pasando agregado seco, previamente pesado, por un conjunto de tamices que van desde un tamaño de abertura grande hasta uno de

tamaño más fino, esto se hace con el fin de determinar la forma en cómo se distribuyen el tamaño de sus partículas. Se puede encontrar el procedimiento completo en la sección MTC E 204.

- **Gravedad específica y absorción de agregados**

Este ensayo se explica en la sección MTC E 205 y E 206. Su finalidad es hallar las gravedades específicas: seca, saturada con superficie seca y aparente de los agregados gruesos y finos; además, de calcular el porcentaje de absorción, estos valores se obtienen mediante un procedimiento de saturación de las muestras durante 24 horas (MTC, 2017, p. 287).

- **Abrasión Los Ángeles (L.A.) al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37,5 mm (1 ½")**

El ensayo de abrasión en la máquina de Los Ángeles es un indicador del deterioro de los áridos minerales, según la sección MTC E 207. Los agregados se someten a un deterioro progresivo, impacto y aplastamiento en un tambor giratorio de acero el cual lleva dentro una cierta cantidad de bolas de acero, estas esferas se encargan de degradar los agregados durante un número preestablecido de rotaciones. Posteriormente, el material se saca del tambor y se tamiza para determinar el % de pérdida por deterioro (MTC, 2017, p. 290).

- **Durabilidad al sulfato de sodio y sulfato de magnesio**

En la Sección MTC E 209 se describe este método para disgregar agregados gruesos y finos exponiéndolos a soluciones saturadas de sulfato de magnesio o de sodio. Durante un período de 16 a 18 horas la muestra de agregado se sumerge en las soluciones y luego se seca en el horno, este proceso se vuelve a hacer el número de veces requeridos. Con esto se obtiene información de los cambios que tendrán los agregados al estar expuestos a la intemperie (MTC, 2017, p. 302).

- **18** **Porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso**

Según la Sección MTC E 210, el ensayo para calcular el porcentaje de caras fracturadas en el agregado grueso, es un método que se utiliza para definir la cantidad de partículas que presentan superficies fracturadas en el material de un agregado. Este ensayo es importante en mezclas asfálticas ya que las partículas fracturadas proporcionan una mejor adherencia con el asfalto (MTC, 2017, p. 309).

- **Angularidad**

La angularidad es un **51** ensayo del agregado fino y de acuerdo con lo escrito en la sección MTC E 222 es **1** un procedimiento utilizado para medir el porcentaje de vacíos presentes en una muestra de agregado fino. **35** Este ensayo se enfoca en determinar la forma y textura superficial de las partículas del agregado, evaluando su angularidad y rugosidad. Las partículas más angulares y rugosas tienden a crear mayores vacíos en comparación con las partículas redondeadas y lisas. El resultado del ensayo es un indicador indirecto de la forma del agregado, lo cual es crucial para la compactación y adherencia en mezclas de asfalto (MTC, 2017, p. 354).

- **Partículas planas y alargadas**

Este ensayo se describe en la sección MTC E 223. Es **1** un procedimiento utilizado para determinar el porcentaje de partículas que tienen una relación desproporcionada entre sus dimensiones, es decir, partículas que son excesivamente planas o alargadas. Este tipo de partículas pueden afectar negativamente a la mezcla, ya que tienden a romperse más fácilmente bajo carga y pueden dificultar la compactación (MTC, 2017, p. 356).

- **6** **Equivalente de arena**

El ensayo tiene por objeto calcular qué proporción de una muestra puede considerarse arena separándola de las partículas finas o polvos mediante una solución química. La sección MTC E 114 establece que el propósito de la prueba es determinar la cantidad relativa de

materiales finos, como arcillas o limos, presentes en una muestra de agregado fino. Estos materiales finos pueden afectar negativamente ¹ las propiedades de las mezclas asfálticas, disminuyendo la durabilidad y la resistencia. El ensayo permite evaluar la pureza del agregado, ya que un alto contenido de partículas finas plásticas, como las arcillas, pueden comprometer la calidad del material (MTC, 2017, p. 89).

Para elaborar mezclas asfálticas en frío se puede usar como materiales bituminosos a los asfaltos diluidos o las emulsiones asfálticas, para esta investigación se usó ¹¹ emulsión asfáltica como ligante de la mezcla.

b. Emulsión Asfáltica. Los tres componentes principales de esta sustancia bituminosa son el agente emulsionante, el agua y el asfalto. El agua y el asfalto son difíciles de mezclar por sí solos, por esa razón se agrega un tercer componente que es el agente emulsivo el cual se encarga uniformizar la distribución del asfalto en el agua, es debido a esto que la emulsión tiene una consistencia líquida aun a temperatura ambiente y puede ser usada en mezclas asfálticas en frío (Asphalt Institute, 2008, p. 5).

Las emulsiones pueden clasificarse como **catiónicas, aniónicas o no iónicas** en función de las cargas eléctricas alrededor de las partículas de asfalto. Estos grupos tienen cargas positivas, negativas y nulas, respectivamente. La rapidez con la que las partículas de asfalto se unen para restaurar el volumen ² de cemento asfáltico es otra de las clasificaciones de la emulsión, estas se denominan: ⁶⁵ de rotura rápida (RS), de rotura media (MS), de rotura lenta (SS) y de rotura rápida QS (QS). El término “rotura” describe el proceso de separación del agua del asfalto (Asphalt Institute, 2008, p. 6).

¹ **2.2.1.2. Tipos de Mezcla Asfáltica en Frío.** Según la composición granulométrica las mezclas en frío pueden ser:

a. Mezcla Asfáltica Densa en Frío (M.D.F.). Con un porcentaje de huecos inferior al 10 %, las mezclas en frío densas son materiales constantes y homogéneos compuestos por

pétreos con tamaños nominales que oscilan entre los tamices ASTM de 1 ½” (37,5 mm) y 3/8” (9,5 mm). Debido a su alta composición de áridos finos, deben recubrirse con emulsiones asfálticas de fraguado lento. Se emplean con frecuencia como capas de refuerzo o como capas de rodadura en nuevas construcciones cuando no se requiere una gran resistencia estructural. Otro uso común es la reparación de baches (López, 2012).

b. Mezcla Asfáltica Abierta en Frío (M.A.F.). Las mezclas asfálticas de tipo abierto están compuestas principalmente por agregados gruesos, lo que genera un elevado contenido de vacíos de aire (18-25%). Esta característica facilita el drenaje del agua de lluvia, permitiendo su paso vertical a través de la capa superficial del pavimento hasta alcanzar la base, desde donde se desplaza lateralmente hacia los bordes. En comparación con las mezclas densas, estas mezclas son más livianas y permiten cubrir una mayor área de pavimentación. Su uso mejora notablemente la evacuación del agua durante lluvias, lo que contribuye a reducir salpicaduras y rociado, minimizar el riesgo de deslizamiento por superficies mojadas y aumentar la visibilidad tanto del pavimento como de la señalización vial bajo condiciones lluviosas (Namaa et al., 2021).

De los dos tipos mencionados la mezcla densa es la que se usó en esta investigación debido a sus características y su uso en carpetas asfálticas y reparación de baches.

2.2.1.3. Propiedades Mecánicas de la Mezcla Asfáltica. Las dos propiedades mecánicas a evaluar en esta investigación son la estabilidad y flujo. Estos son términos usados en la metodología Marshall para el diseño de mezclas asfálticas.

a. Estabilidad. Según la norma ASTM (2022) la mayor carga de resistencia alcanzada durante una secuencia de carga con una velocidad de deformación constante se conoce como estabilidad. También puede describirse como la carga alcanzada en el punto en el que la velocidad de aumento de la carga empieza a disminuir. El tipo, el grado y la cantidad de asfalto, así como la cantidad y el tipo de árido, afectan a la estabilidad de una mezcla (p. 2).

b. Flujo. Según la norma ASTM (2022), durante la prueba de estabilidad, se mide la cantidad en que se deforma la mezcla asfáltica, a esta deformación se le denomina flujo. Aunque existen límites aceptables para el flujo, no existe un valor de flujo que se pueda considerar ideal. La mezcla es considerada demasiado plástica o inestable ¹ si el flujo con el contenido óptimo de asfalto elegido ¹ está por encima del límite superior, y demasiado frágil si está por debajo del límite inferior (p. 2).

2.2.1.4. ¹ Diseño de Mezcla Asfáltica en Frío. No existe ¹ un método de diseño de mezcla en frío con emulsión mundialmente aceptado; dos procedimientos de diseño de mezclas asfálticas emulsionadas más comunes son (1) ¹ el Método de Illinois que está basado en una modificación ¹⁷ del Método Marshall usado en ¹⁰ mezclas en caliente y una prueba de durabilidad en ¹ humedad y (2) ¹ el método del Asphalt Institute basado en un procedimiento Hveem modificado ¹ más una prueba de módulo resiliente. Para esta investigación se usará ¹ el método de Illinois ya que está basado en el método Marshall y este último es el más común para diseñar mezclas de asfalto en nuestro país, el procedimiento se describe ⁴ en el manual MS-14 del Instituto del Asfalto de la siguiente manera:

a. Elección de la Gradación de la Mezcla

Luego de terminar con los ensayos de calidad de los agregados, en base a la granulometría del agregado combinado (grueso y fino), elegimos la gradación que tendrá la mezcla de acuerdo a la Tabla 2 proporcionada por el MTC ¹ para mezclas densas en frío.

Tabla 2

Gradaciones para mezclas densas en frío

TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA		
Normal	Alternativo	MDF - 1	MDF - 2	MDF - 3
7.5 mm	1 1/2"	100	100	100
25.0 mm	1"	80 - 95	100	100
19.0 mm	3/4"	100	80 - 95	100
12.5 mm	1/2"	62 - 77	100	100
9.5 mm	3/8"	100	60 - 75	100
4.75 mm	Nº 4	45 - 60	47 - 62	50 - 65
2.36 mm	Nº 8	35 - 50	35 - 50	35 - 50
300 µm	Nº 50	13 - 23	13 - 23	13 - 23
75 µm	Nº 200	3 - 8	3 - 8	3 - 8

Nota. Tomado de Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (p. 296), por MTC, 2015.

La franja por utilizar dependerá del tipo y del espesor que vaya a tener la capa compactada de acuerdo a la Tabla 3.

Tabla 3

Tipos de mezcla en función del tipo y espesor compacto de la capa

Tipo de capa	Espesor compacto (mm)	Tipo de mezcla
Rodadura	50 - 75	MDF - 2
	40 - 50	MDF - 3
Intermedia	≥ 50	MDF - 2
Base	≥ 75	MDF - 1
Bacheo	50 - 75	MDF - 2
	≥ 75	MDF - 1

Nota. Tomado de Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (p. 296), por MTC, 2015.

Una vez elegida la gradación se debe establecer la proporción de agregados teniendo en cuenta que la gráfica de la granulometría del agregado combinado debe ser uniforme y estar dentro de los parámetros establecidos por la gradación, no debe haber ¹ saltos bruscos de la parte superior de un tamiz a la inferior del tamiz adyacente y viceversa, la curva granulométrica debe verse lo más paralela posible a las curvas de la gradación (MTC, 2015).

b. Determinación del Porcentaje Óptimo Teórico de Emulsión. Se debe establecer un valor provisional de porcentaje de emulsión que nos servirá para realizar la mezcla y completar las siguientes fases del diseño antes de hallar el porcentaje óptimo real de emulsión, este valor se calcula a partir de la granulometría del agregado combinado usando la siguiente fórmula dada por el manual MS-14:

$$E = (0.05A + 0.1B + 0.5C) \times 0.7$$

Donde las variables A, B y C se obtienen del análisis granulométrico, ⁴ A es el porcentaje de agregado retenido en el tamiz N° 8, B es el porcentaje que pasa el tamiz N° 8 y se retiene en el tamiz N° 200 y C es el porcentaje que pasa el tamiz N° 200 (Asphalt Institute, 1997, p. 107).

c. Prueba de Recubrimiento o Cobertura. Al diseñar combinaciones de asfalto mezclado en frío que utilizan emulsión asfáltica, la prueba de recubrimiento es un paso esencial. Su objetivo principal es evaluar la capacidad de la emulsión para recubrir y adherirse completamente a los áridos, lo cual es necesario para garantizar la cohesión y la longevidad de la mezcla. La prueba se hace de la siguiente manera, primero se selecciona una cantidad específica de agregados pétreos, los cuales deben estar limpios y secos; también, se prepara la emulsión asfáltica cuya cantidad se calculó con la fórmula del paso anterior. Luego, se mezcla la emulsión asfáltica con los agregados, asegurando una distribución uniforme de la emulsión sobre los agregados. Se preparan, generalmente, cuatro muestras de este tipo a las cuales se les va agregando diferentes cantidades de agua. Se evalúa visualmente la extensión del

recubrimiento de la emulsión sobre los agregados buscando que los agregados estén completamente cubiertos, sin áreas expuestas que puedan afectar la cohesión de la mezcla. Finalmente, debemos observar si la emulsión cubre completamente los agregados, de ser así, se considera que la mezcla tiene un buen potencial de cohesión y durabilidad; pero, si el recubrimiento es incompleto o irregular, puede indicar problemas con la cantidad de agua, la compatibilidad entre los materiales o la granulometría de los agregados (Asphalt Institute, 1997, p. 107).

El MTC indica que el recubrimiento mínimo debe ser del 75% pero en la práctica es recomendable tratar que el recubrimiento este entre un 90 y 95%.

⁷⁴ A medida que aumenta gradualmente la cantidad de agua suministrada (agua de premezcla), las mezclas de emulsión asfáltica de rotura lenta suelen mostrar un mayor recubrimiento. Llega un momento en que hay suficiente agua disponible para obtener la mejor dispersión posible ⁵ del asfalto y un aumento adicional de agua no mejora la calidad del recubrimiento. Este es el valor que se debe elegir como porcentaje de agua de premezcla, cualquier mezcla posterior en el proceso de diseño debe realizarse utilizando este valor (Asphalt Institute, 1997, p. 109).

d. Contenido Óptimo de Humedad de Compactación. Se selecciona una muestra de agregado combinado que debe pesar 1100 g en estado seco el cual es un peso óptimo para llenar el molde de una briqueta, se mezcla los pétreos y el agua de premezcla de forma manual o mecánica hasta que la humedad esté completamente dispersada por todo el agregado, luego se vierte el asfalto emulsionado y se mezcla todo hasta quedar uniforme. La humedad total de ¹ la mezcla es la suma de la humedad del agua, de la emulsión y la que aportan los agregados, pero no es lo mismo a la humedad de compactación, esta última es la humedad al momento en el que se compacta en el molde y debe ser diferente en cada grupo de muestras para encontrar cual nos dará la estabilidad máxima. Para lograr esto se debe airear la mezcla antes de

compactarla y eliminar el agua hasta llegar a la humedad de compactación prevista, generalmente cinco diferentes porcentajes de humedad con una diferencia de 1% son suficientes para elaborar una gráfica, se puede hacer más porcentajes para mejorar la precisión (Asphalt Institute, 1997, pp. 111-113). Las fórmulas para calcular las cantidades ¹⁵ de los componentes de la mezcla se muestran a continuación:

- Peso del agua a agregar:

$$W_{agua\ añadida} = \frac{W_{seco} \times P_a}{100}$$

¹¹ Donde:

Wagua añadida : Peso del agua a agregar en gramos.

Wseco ¹¹ : Peso del agregado seco en gramos.

Pa ² : Porcentaje de agua de premezcla.

- Peso de la emulsión a agregar:

$$W_{emulsión} = \frac{W_{seco} \times E}{100}$$

Donde:

Wemulsión : Peso de la emulsión a agregar en gramos.

Wseco ¹¹ : Peso del agregado seco en gramos.

E : Porcentaje óptimo teórico de emulsión.

- ¹¹ Peso de la humedad a perder antes de compactar:

$$W_{agua\ a\ perder} = \frac{W_{mezcla\ seca} \times (P_t - P_c)}{100}$$

$$W_{mezcla\ seca} = W_{seco} + \frac{E \times C}{100}$$

Donde:

¹¹ Wagua a perder: Peso de la emulsión a agregar en gramos.

Pt ¹¹ : Porcentaje de humedad total de mezclado.

Pc	¹⁰ : Porcentaje de humedad al momento de compactar.
Wseco	¹¹ : Peso del agregado seco en gramos.
E	¹ : Porcentaje óptimo teórico de emulsión.
C	³ : Porcentaje de residuo asfáltico de la emulsión.

La cantidad de emulsión y agregados siempre se mantiene constante. Para cada valor de humedad de compactación se deben realizar tres muestras (briquetas), cada muestra se elabora y compacta siguiendo el procedimiento de la norma ASTM – D6926 con un equipo Marshall. Después de terminar cada muestra, se deja curar dentro del molde por 24 horas, se extrae del molde y se deja curar por otras 72 horas más, el proceso de curado permite que el agua de la emulsión se evapore y deje el asfalto residual en la mezcla. Al finalizar el curado se ensaya la estabilidad en la prensa Marshall.

Se realiza el gráfico de Estabilidad vs ¹ Humedad de compactación. El contenido ¹⁰ óptimo de humedad de compactación corresponde al punto donde se alcanza la máxima estabilidad, esto significa que el porcentaje de agua en ese punto es el ideal para lograr la mejor compactación de la mezcla asfáltica (Asphalt Institute, 1997, p. 113).

⁶ e. *Variación del Contenido de Asfalto Residual.* En esta parte del diseño ⁷³ lo que se busca es determinar la cantidad adecuada de emulsión asfáltica ³⁵ que proporcionará suficiente asfalto residual (el asfalto que queda después de que el agua de la emulsión se evapora) para asegurar una mezcla cohesionada y duradera. Este contenido debe ser ajustado para lograr un equilibrio entre ³⁵ la adherencia de los agregados y la flexibilidad de la mezcla. Primero, se elaboran diferentes mezclas con variaciones del valor teórico de asfalto residual, generalmente se varían en 1% hasta tener cinco combinaciones, se deben realizar ¹¹ seis briquetas para cada contenido de asfalto residual, tres de ellas se ensayarán en seco y las otras tres se someterán a ¹¹ un ensayo de inmersión y saturación al vacío antes de ensayarse su estabilidad, por lo que, en total se deben elaborar 30 briquetas. La cantidad de agregado y la humedad total de la mezcla

se debe mantener constante, lo único que cambia es la cantidad de emulsión agregada, por ende, se debe ir reduciendo el agua agregada a medida que la emulsión aumenta para mantener la misma humedad, si es necesario se debe airear la mezcla para eliminar el agua y llegar a la ⁴¹ humedad óptima de compactación. La compactación y curado de las briquetas siguen el mismo procedimiento mencionado anteriormente

Ya curadas las briquetas se calcula la gravedad específica bulk de las mismas, el método utilizado para esto se explica en la norma ASTM D2726, luego, por cada contenido de asfalto residual, elegimos tres muestras para ensayar su estabilidad y flujo siguiendo los pasos detallados en la ASTM D6927, las tres muestras que quedan se preparan para el ensayo de inmersión y saturación al vacío que consiste en colocar cada muestra por separado en una máquina de succión de vacíos cubierta de agua hasta el tope, se aplica una presión ²¹ de 100 mm de Hg durante una hora, luego se libera lentamente el vacío y se deja la muestra en el agua por otra hora; finalizado esto, se retira la muestra y se ensaya su estabilidad y flujo (Asphalt Institute, 1997, pp. 116-119). El MS-14 nos proporciona las siguientes fórmulas para obtener los valores de pérdida de estabilidad, densidad bulk seca, humedad absorbida y vacíos totales, los cuales serán necesarios para elaborar las gráficas de diseño.

- **Pérdida de estabilidad**

$$\% \text{ Pérdida de Estabilidad} = \frac{\frac{S_1 + S_2 + S_3}{3} - \frac{S_4 + S_5 + S_6}{3}}{\frac{S_1 + S_2 + S_3}{3}} \times 100$$

Donde:

S1,2,3,4,5,6 = Estabilidad corregida (kg).

- **Densidad Bulk**

$$G = \frac{D}{F - E}$$

Donde:

G = Densidad Bulk (Gravedad Específica Bulk).

D = Peso de la muestra en el aire (g).

E = Peso de la muestra en agua (g).

F = Peso de la muestra en condición de saturada superficialmente seca (SSS) (g).

- Densidad Bulk Seca

$$G_d = G \times \frac{100 + A}{100 + A + K}$$

Donde:

G_d = Densidad Bulk Seca (Gravedad Especifica Bulk Seca).

G = Densidad Bulk (Gravedad Especifica Bulk).

A = Asfalto residual como porcentaje del **peso de agregado seco**.

K = **Contenido de humedad (%)**.

- Contenido de humedad

$$K = \frac{(H - I) - (F - D)}{I} \times (100 + A)$$

Donde:

K = Contenido de humedad (%).

H = **Peso de la muestra** fallada (g).

I = **Peso de la muestra seca** (g).

F = **Peso de la muestra** en condición de **saturada** superficialmente seca (SSS) (g).

D = **Peso de** la muestra en el aire (g).

A = **Asfalto residual como porcentaje del peso de agregado seco**.

- Humedad absorbida

$$Humedad\ Absorbida = \frac{K_4 + K_5 + K_6}{3} - \frac{K_1 + K_2 + K_3}{3}$$

Donde:

K_{1,2,3,4,5,6} = Contenido de humedad (%).

- Vacíos totales

$$V = \left[\left(\frac{100 + A + K}{G} - \frac{100}{C} - \frac{A}{B} \right) / (100 + A + K) \right] \times 100$$

Donde:

V = Vacíos totales (%).

1 K = Contenido de humedad (%).

G = Densidad Bulk (Gravedad Específica Bulk).

A = Asfalto residual como porcentaje del peso de agregado seco.

B = Gravedad específica del asfalto.

C = Gravedad específica aparente del agregado combinado.

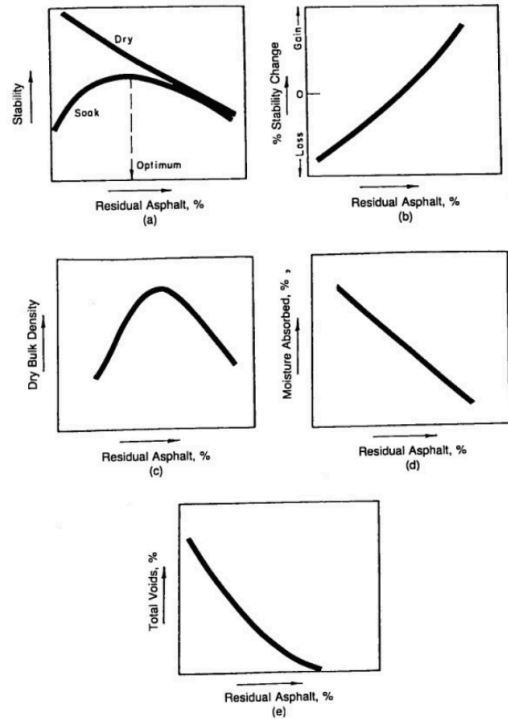
Obtenidos todos los resultados se deben elaborar los siguientes gráficos:

- **26** Estabilidad seca y húmeda vs % Asfalto residual.
- % Pérdida de estabilidad vs % Asfalto residual.
- Densidad bulk seca vs % Asfalto residual.
- % Humedad absorbida vs % Asfalto residual.
- % Vacíos totales vs % Asfalto residual.
- Flujo vs % Asfalto residual.

El gráfico de flujo versus asfalto residual no es un requerimiento del manual MS-14 pero se elaboró para fines de esta investigación. Las curvas típicas se muestran en la Figura 1.

Figura 1

Curvas típicas del ¹diseño de mezcla en frío con emulsión



Nota. Tomado ¹¹de *Asphalt Cold Mix Manual (MS-14)* (p. 122), por *Asphalt Institute*, 1997.

¹**f. Determinación del contenido óptimo de asfalto residual.** Para determinarlo se debe ¹⁹partir del criterio de que el óptimo asfalto residual es aquel que dé la máxima estabilidad húmeda, esto con el fin de proporcionar una resistencia adecuada a la carga del tráfico durante las estaciones lluviosas. ¹El porcentaje de pérdida de estabilidad no debe ser excesivo, si lo es,

es un indicativo de que la mezcla se verá muy afectada ante la presencia de humedad y podría llegar a desintegrarse en los meses de lluvia. El total ²⁵ de vacíos de la mezcla debe estar dentro de un ⁶ rango aceptable ya que demasiados huecos podrían ocasionar una deformación permanente excesiva y una mayor absorción de humedad, así como la exudación del asfalto residual si tiene un ⁶ contenido de vacíos bajo. La cantidad de absorción de humedad de la mezcla no debe ser demasiada ya que esto podría incrementar la posibilidad de desprendimiento de los agregados o debilitar la unión de los mismos con el asfalto residual (Asphalt Institute, 1997, p. 120). Teniendo en cuenta estos criterios y los parámetros que nos da el MTC ⁶ en la Tabla 4 elegimos el óptimo de asfalto residual.

Tabla 4

Parámetros para ¹ diseño de mezcla densa en frío con emulsión asfáltica

Características de diseño	Parámetros	
	Min.	Máx.
Estabilidad, lb (kg) a 22.2°C	500 (227)	-
% Pérdida de estabilidad	-	50
% Humedad absorbida	-	4
% Vacíos totales	2	8
% Recubrimiento	75	-

⁵⁶ Nota. Adaptado de *Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción* (p. 299), por MTC, 2015.

2.2.2. Fibra de Vidrio

La ¹ fibra de vidrio, según Irving (2010), es un material compuesto de diminutos filamentos de vidrio. Este material se fabrica forzando ⁴⁷ vidrio fundido a través de una secuencia de pequeños agujeros, que, cuando se solidifica, produce un elemento lo suficientemente flexible como para ser utilizado como fibra (p. 31).

Del Río (1999) nos dice que las fibras están compuestas principalmente de sílice, que se combina con varios óxidos, como la alúmina y los óxidos de elementos alcalinos y alcalinotérreos. Se producen mediante la fusión de estos materiales, los cuales pasan por una hilera y luego son sometidos a un proceso de estirado. (p. 113).

2.2.2.1. Tipos de Fibra de Vidrio. Según Del Río (1999) son:

Tipo E. Es el más utilizado, económico y duradero. Mínima absorción de humedad.

Tipo A. En comparación con la fibra de tipo E, es menos resistente, tiene un módulo inferior y un mayor contenido en álcalis.

Tipo C. Se emplea en las capas externas de estructuras anticorrosivas y su resistencia se sitúa entre las de las fibras E y A.

Tipo R. Su ³¹resistencia a la tracción y su módulo elástico son significativamente superiores a los de otras variedades de fibra de vidrio, por lo que resulta ideal para su uso en construcciones con elevadas cualidades mecánicas, especialmente en la industria aeronáutica.

Tipo D. Se utiliza mucho en la fabricación de materiales de comunicaciones electrónicas por sus elevadas características dieléctricas. Los radares y las ventanas electromagnéticas se fabrican con fibra de vidrio D.

Tipo AR. Al ser resistente a los álcalis del cemento, se utiliza para reforzar los morteros de cemento (GRC).

2.2.2.2. Características de la Fibra de Vidrio. Del Río (1999) considera:

Resistencia Mecánica. Tiene una resistencia a la tracción comparada a la del acero.

Propiedades Eléctricas. Incluso a espesores inferiores, funciona muy bien como aislante eléctrico.

No se quema. Dado que la fibra de vidrio es un mineral, es intrínsecamente incombustible. No propaga llamas ni libera toxinas o humo cuando se calienta.

Estabilidad Dimensional. Tiene un bajo coeficiente de dilatación y no ⁷²es muy sensible a los cambios de humedad y temperatura.

No se descompone. No se deteriora ni sufre cambios con el tiempo.

Baja Conductividad Térmica. Al ser un sólido no metálico su conductividad del calor es reducida.

Resistencia a los Agentes Químicos. Esto la hace muy útil para ser combinada con otros materiales y sustancias para crear compuestos.

³⁸**2.2.2.3. Usos de la fibra de vidrio.** Según Irving (2010) la fibra se puede usar en:

Ingeniería civil y construcción

- Como refuerzos ⁵de concreto y asfalto para aumentar las propiedades de resistencia a la tracción, a la flexión y a las grietas en ambos materiales.
- Debido a su resistencia al agua y a la corrosión, se emplean en laminados o revestimientos de paneles, techos y fachadas.
- Se fabrican tuberías y tanques de plástico reforzado con fibra de vidrio que son perfectos para líquidos corrosivos.
- Se puede llegar a usar fibra de vidrio en componentes estructurales como puentes, barandillas y estructuras ligeras gracias a su bajo peso y gran durabilidad.

Industria automotriz y transporte

- Gracias a su resistencia y ligereza se puede usar fibra en las carrocerías y piezas de automóviles, motocicletas, autobuses y barcos; este material puede llegar a reducir el peso y aumentar la eficiencia.
- También es útil para fabricar los paneles, asientos y cubiertas que se encuentran en trenes, aviones y barcos.

Industria y manufactura

- ⁷⁷Se utiliza en la producción de piezas de plástico o compuestos.

- Como aislamiento térmico y acústico en maquinarias, edificios y hornos; con fibras tejidas o similares a la lana.
- En filtros industriales debido a su resistencia química y térmica.

Electricidad y electrónica

- Como aislante eléctrico debido a que no es un material conductor.
- Las placas de circuito impreso están compuestas de resina epoxi reforzada con fibra de vidrio.
- También se usa en aspas de aerogeneradores gracias a su alta relación resistencia-peso y durabilidad frente al clima.

Uso doméstico y artesanal

- Tablas de surf, cascos, muebles y piscinas prefabricadas.
- Se utiliza en kits de reparación doméstica; por ejemplo, para arreglar techos, botes o automóviles.

2.2.2.4. Tipos de presentaciones comerciales de fibra de vidrio

La fibra de vidrio comercialmente se puede adquirir en distintas presentaciones de acuerdo a la aplicación que se les pretenda dar, según Huamán (2015) pueden ser:

Roving. El hilo continuo o filamento fabricado con fibras de vidrio se presenta en forma de hebras largas y continuas dispuestas en haces denominados "rovings". Esta presentación permite obtener un refuerzo de alta resistencia a la tracción, que se utiliza con frecuencia en la fabricación de automóviles, barcos, laminados estructurales y materiales compuestos. Suelen pesar entre 20 y 25 kg y se venden en enormes bobinas o rollos.

Chopped strands. Las fibras de vidrio cortadas son filamentos que se han cortado a longitudes precisas, que suelen oscilar entre 3 y 25 milímetros. Debido a que se dispersa rápidamente dentro del material, aumentando su resistencia y estabilidad, este tipo de fibra es

una de las más utilizadas en combinaciones de concreto y asfalto. Se comercializa en bolsas o sacos sellados de entre 10 y 25 kilogramos.

Mat. Son fibras que están dispersas al azar y unidas por una resina o aglutinante formando una especie de manta o estera de fibra de vidrio. Este formato proporciona un refuerzo isotrópico, es decir, una resistencia uniforme en todas las direcciones. Se emplean principalmente en la producción de piezas moldeadas, paneles, láminas y tanques. Se comercializan en rollos o láminas de diferentes anchuras, que suelen oscilar entre 1 y 2 metros.

Woven roving. Al igual que una tela, los tejidos de fibra de vidrio de este tipo están hechos de fibras entrelazadas de forma organizada. Este formato se utiliza en la construcción, el refuerzo estructural y la producción de revestimientos o componentes industriales debido a su gran resistencia mecánica y estabilidad dimensional. Se presenta en rollos de aproximadamente un metro de ancho y su peso varía en función de la densidad del tejido.

Mallas de fibra de vidrio. Están fabricadas con filamentos entrelazados y tienen aberturas regulares. Se utilizan principalmente en la construcción para evitar la formación de fisuras y para reforzar revoques, morteros e impermeabilizaciones. Este tipo de fibra se presenta en rollos de varias longitudes, normalmente ⁷⁶de 1 metro de ancho por 50 metros de largo.

Milled fibers. Las microfibras son partículas o filamentos increíblemente cortos que se producen mediante molienda, también son conocidas como polvo de fibra de vidrio. Se usa cuando se necesita un acabado fino y uniforme; sirven como refuerzo para resinas, adhesivos o compuestos. Dependiendo del tamaño de las partículas y del uso previsto, suelen comercializarse en bolsas o sacos con un peso de entre 10 y 25 kg.

23
CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3. Metodología

3.1. Enfoque de Investigación

Esta es una investigación CUANTITATIVA, Hernández et al. (2014) define a este enfoque como un proceso de recopilación de información para probar hipótesis haciendo uso de mediciones numéricas y herramientas estadísticas, este tipo de enfoque tiene la característica de ser secuencial y probatorio, es objetivo y la recolección de datos se basa en la medición; tomando en cuenta esto, se puede considerar a esta investigación como cuantitativa ya que se estableció relaciones numéricas entre la cantidad de fibra de vidrio empleada con los valores de estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica en frío, todo esto manteniendo un proceso secuencial que partió desde plantear el problema hasta analizar los datos y extraer conclusiones.

3.2. Método

3.2.1. Tipo de Investigación

Es una investigación APLICADA, porque se propuso evaluar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica en frío agregándole fibra de vidrio, con el fin de determinar su viabilidad técnica para mejorar el desempeño de pavimentos flexibles frente a las cargas impuestas por los vehículos. Esta investigación utilizó principios y teorías ya existentes sobre mezclas asfálticas en frío y refuerzos con fibras, pero buscó adaptarlos y aplicarlos en un contexto real, aportando resultados que puedan ser usados en proyectos de infraestructura vial.

3.2.2. Alcance de Investigación

Tiene un alcance CORRELACIONAL, según Hernández et al. (2014) los estudios correlacionales buscan medir el grado en que las variables cambian juntas, es decir, cómo una variable está relacionada con otra. Teniendo en cuenta dicha definición, esta investigación trató de indagar en los cambios que puedan llegar a producirse en las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en frío (variable dependiente) al incorporarle fibra de vidrio (variable independiente).

3.3. ⁶² Diseño de la Investigación

Según Hernández et al. (2014) una investigación experimental se caracteriza por modificar intencionadamente la variable o variables independientes para analizar sus efectos sobre las dependientes, este tipo de diseño se puede subdividir en tres tipos: preexperimental, experimental "puro" y cuasiexperimental.

Los cuasiexperimentos se diferencian por tener una validez interna reducida, esto debido a que los grupos no se establecen de manera aleatoria, sino que ya están conformados antes del experimento, la razón y la manera como se integraron es independiente de la parte experimental (Campbell y Stanley, 1966). Teniendo en cuenta este concepto, este estudio se clasifica como un diseño **CUASIEXPERIMENTAL** por las siguientes razones, se usó fibra de vidrio (variable independiente) en diferentes cantidades comenzando con 0.1% y reemplazándola por una parte del agregado fino, al ver como afectaba a los resultados de estabilidad y flujo (variable dependiente) se pretendió aumentar o disminuir la fibra hasta encontrar un valor óptimo que mejore las propiedades mencionadas. Como la sustitución de fibra por arena generó variaciones en la dosificación de las briquetas imposibilitó seleccionar grupos de manera aleatoria ya que cada grupo de briquetas debía tener su propia dosificación (con una cantidad diferente de fibra de vidrio); además, los niveles de manipulación de la variable independiente no fueron definidos en su totalidad desde el inicio, sino que se ajustaron progresivamente en función de los resultados obtenidos en las primeras briquetas; por lo tanto, no se tuvo una equivalencia inicial en los grupos, lo que redujo su validez interna. Estas condiciones impiden considerar el diseño como experimental "puro", aunque se hayan mantenido condiciones controladas de laboratorio y utilizado un grupo de control.

Figura 2

Diagrama de diseño de investigación

G_1	X_1	0_1
G_2	X_2	0_2
G_3	X_3	0_3
\vdots	\vdots	\vdots
G_k	X_k	0_k
G_c	—	0_c

Donde:

G_k = Grupo experimental.

G_c = Grupo de control.

X = Tratamiento experimental (manipulación de la variable independiente).

— = Ausencia de tratamiento experimental.

0_k = Medición de las muestras de un grupo posterior al tratamiento (posprueba).

3.4. Población

En una investigación la población es un conglomerado de elementos los cuales comparten características similares (Gallardo y Moreno, 1999). En este estudio la población estuvo compuesta por la **mezcla asfáltica densa en frío** elaborada **con emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta (CSS-1H)**, **agregados pétreos provenientes de la cantera Pucarragá en la provincia de Sihuas** y fibra de vidrio tipo E (fibra comercial) en tamaños de 2.5 a 5 cm.

3.5. Muestra

Una muestra es un subconjunto de la población y las técnicas de muestreo son los procedimientos para seleccionar a los elementos que van a ser parte de la muestra, estas técnicas pueden ser probabilísticas y no probabilísticas (Gallardo y Moreno, 1999). La muestra estuvo conformada por 52 **briquetas de mezcla en frío** convencional y 18 briquetas modificadas con

fibra de vidrio. La técnica de muestreo fue no probabilística, se fabricaron briquetas en laboratorio con los materiales y características mencionadas en la población, cada una con su propia dosificación.

Tabla 5

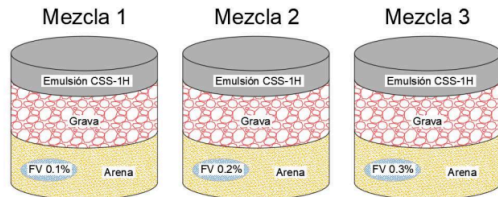
Muestras para el grupo de control

Etapa del diseño	Descripción	Cantidad
Recubrimiento	Mezcla en frío sin compactar	4
Óptima humedad de compactación	Briquetas con 3 a 8% de humedad de compactación, 3 briquetas por porcentaje	18
	3 briquetas por contenido de asfalto residual (2.7 a 6.7%) para ensayar en seco	15
Asfalto residual óptimo	3 briquetas por contenido de asfalto residual (2.7 a 6.7%) para ensayar luego de inmersión y saturación al vacío	15
Total		52

Como se mencionó en el diseño de investigación se planteó hacer las briquetas modificadas con fibra de vidrio comenzando con 0.1% de fibra y sustituyéndola por una parte del agregado fino, al ver como afectaba a los resultados de estabilidad y flujo se pretendió aumentar o disminuir la fibra hasta encontrar un valor óptimo que mejore dichas propiedades. Al final se terminó aplicando 0.1%, 0.2% y 0.3% de fibra de vidrio, 3 briquetas por cada porcentaje.

Figura 3

Composición de las mezclas con fibra de vidrio



Después de realizar los ensayos respectivos se determinó que la cantidad de fibra de vidrio que da mejores resultados es 0.1%, por lo que para la prueba de hipótesis se hicieron 9 briquetas más.

Tabla 6

Muestras para el grupo experimental

% fibra de vidrio	Cantidad
0.1	3+9
0.2	3
0.3	3
Total	18

3.6. Operacionalización de Variables

3.6.1. Variables

Variable Independiente: Fibra de vidrio

Variable Dependiente: Propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en frío

3.6.2. Matriz de Consistencia

Tabla 7

Matriz de consistencia

TÍTULO	PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES
“Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica en frío incorporando fibra de vidrio – Sihuas, Ancash 2024”.	Problema General ¿Cómo cambian las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica en frío incorporando fibra de vidrio en Sihuas, Ancash 2024?	Objetivo Principal Evaluar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica en frío incorporando fibra de vidrio en Sihuas, Ancash 2024.		Variables Independientes Fibra de vidrio.
	Problemas específicos: 64 ¿Cuál es el diseño de la mezcla asfáltica en frío convencional? ¿Cuáles son los porcentajes de sustitución de fibra de vidrio por el agregado fino en la mezcla asfáltica en frío convencional? ¿Cuál es el porcentaje de sustitución de fibra de vidrio que otorgue la estabilidad y flujo más eficiente en la mezcla modificada?	Objetivos Específicos Realizar el diseño de la mezcla asfáltica en frío convencional. Probar la sustitución de diferentes porcentajes de fibra de vidrio por el agregado fino en la mezcla asfáltica en frío convencional. Definir el porcentaje de sustitución de fibra de vidrio que otorgue la estabilidad y flujo más eficiente en la mezcla modificada.	2 Las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica en frío mejoran significativamente al incorporar fibra de vidrio.	Variables Dependientes 1 Propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en frío.

3.6.3. Matriz de Operacionalización de Variables

Tabla 8

Matriz de operacionalización de variables

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	INSTRUMENTOS
1. VD: Propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en frío	Se refieren a las características que determinan su comportamiento bajo carga y condiciones de deformación (Guerrero, 2021).	Ensayos de laboratorio y un disco de mezcla asfáltica en frío mediante el Método Illinois basado en una modificación del Método Marshall.	Características de los agregados	Gravedad específica y absorción	1. Manual de carreteras EG-2013 2. Manual de ensayo de materiales - Instrumentos y equipos de laboratorio - Formatos de recolección de datos - Hojas de cálculo
			Partículas chatas y alargadas	Durabilidad al sulfato de sodio y magnesio Porcentaje de partículas fracturadas Angularidad	1. Manual de carreteras EG-2013 2. Manual de ensayo de materiales - Instrumentos y equipos de laboratorio - Formatos de recolección de datos - Hojas de cálculo
1. VI: Fibra de vidrio	Material hecho a base de filamentos finos de vidrio. Se obtiene al hacer fluir el vidrio fundido a través de una serie de agujeros finos que, al solidificarse, se obtiene el material con suficiente flexibilidad como para ser usado como una fibra (Living, 2010).	Sustituirá a un porcentaje del agregado fino de la mezcla asfáltica, se medirá respecto al peso del agregado seco con una balanza de 0,1 g de precisión.	Parámetros del Método Illinois (Marshall Modificado)	Equivalente de arena	1. Manual de carreteras EG-2013 2. Manual MS - 14 - Equipo de ensayo Marshall - Instrumentos de Laboratorio - Formatos de recolección de datos - Hojas de cálculo
			Dosificación	Estabilidad Flujo	1. Manual de carreteras EG-2013 2. Manual MS - 14 - Equipo de ensayo Marshall - Instrumentos de Laboratorio - Formatos de recolección de datos - Hojas de cálculo

3.7. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Como **técnica** se emplearon ensayos **de** laboratorio. Se realizaron los ensayos mínimos para los agregados **de la mezcla asfáltica en** frío solicitados **en** la norma **Manual de Carreteras – Especificaciones Técnicas Generales para Construcción del MTC**. Estos ensayos se hicieron siguiendo los pasos estandarizados del Manual de Ensayo de Materiales o de las normas ASTM en las que se basan. Se aplicó el procedimiento descrito **en el Manual de Mezcla Asfáltica en Frío** (MS - 14) del Instituto del Asfalto para el diseño **de** la mezcla **en frío con** emulsión asfáltica.

Como instrumentos se usaron equipos y herramientas de laboratorio, así como, **formatos de recolección de datos para cada ensayo** los cuales se muestran en los anexos.

3.7.1. Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos (MTC E 204, ASTM

C136/C136M-19)

Equipos y Materiales

- Serie de tamices con especificación ASTM E11 (1'', 3/4'', 1/2'', 3/8'', N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100, N°200).
- Balanza con precisión de 0.1 g.
- Estufa.
- Recipientes de aluminio.
- Pala dosificadora.

Procedimiento

- Se realizó el cuarteo **de las muestras de agregado grueso y fino**. Se procuró que **el peso de la muestra cuarteada de agregado fino** no baje de 300 g y de agregado grueso, con TMN de 1/2'', no baje de 2000 g que es lo mínimo indicado en la norma.
- Se secaron las muestras en una estufa, anotando el peso antes y después de secar.

- Luego de seleccionar los tamices necesarios y encajarlos de mayor tamaño a menor, se vertieron las muestras y se tamizaron manualmente.
- Se determinó el peso de muestra retenido en cada tamiz con una precisión de 0.1 g.

Figura 4

Análisis granulométrico de los agregados pétreos



3.7.2. **Gravedad específica y absorción de agregados (MTC E 205, ASTM C128-22) (MTC**

E 206, ASTM C127-24)

Equipos y Materiales

- Balanza con precisión de 0.1 g.
- Picnómetro (fiola de 500 ml).
- Molde cónico de metal y pisón.
- Bandeja metálica.
- Embudo
- Cesta o canastilla para sumergir el agregado grueso.
- Contenedor de agua para inmersión de la cesta.
- Tamiz N°4.
- Pala dosificadora.
- Recipientes de aluminio.

- Estufa

Procedimiento (agregado fino)

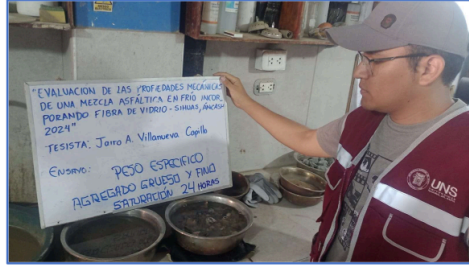
- Se separó una muestra de 1 kg aproximadamente, luego de dejarlo reposar en agua durante 24 horas se decantó el exceso de agua y se colocó en una bandeja para su secado, se secó la muestra aplicando calor hasta observar que las partículas de arena no se peguen unas con otras.
- Luego de esto se colocó la arena en un molde cónico para ser apisonada 25 veces. Se trató de llegar a un punto en el que al retirar el molde el cono de arena deba derrumbarse parcialmente, al pasar esto en la arena se concluyó que adquirió la condición de saturada superficialmente seca (SSS) y sería apta para hallar los pesos requeridos.
- Para hallar las gravedades específicas en base al peso de la muestra se separó 500 g de arena SSS y se llenó en un picnómetro (fiola) con agua, luego de eliminar las burbujas de aire de la arena se llenó el picnómetro con agua hasta la marca calibrada y se pesó
- Se determinó el peso seco al horno de la misma arena usada en la fiola y el peso de la fiola solo con agua, con estos datos se calcularon las gravedades específicas y absorción.

Procedimiento (agregado grueso)

- En cuanto al agregado grueso, se tamizó la muestra por la malla N°4 y lo que quedó se saturó por 24 horas. Se procuró que el peso de esta muestra no baje de 2 kg que es lo que exige la norma para un agregado con TMN de 1/2''.
- Al terminar de saturar, se determinó el peso saturado con superficie seca, sumergido en agua y seco; luego, con estos valores obtenidos y mediante fórmulas se obtuvo los tres tipos de gravedades específicas y absorción.

Figura 5

Saturación de agregados ¹ para ensayo de gravedad específica y absorción



3.7.3. ² Abrasión Los Ángeles (L.A.) al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37,5 mm (1 1/2") (MTC E 207, ASTM C131/C131M-20)

Equipos y Materiales

- Máquina de Los Ángeles.
- Tamices.
- Balanza con precisión de 1 g.
- Esferas ³¹ de acero de 46-48 mm de diámetro y 390-445 g de peso.

Procedimiento

- ³² Se lavó y secó la muestra, luego, se eligió la gradación adecuada que para este estudio fue la B, se separó en los tamaños indicados de 1/2" y 3/8" con pesos de 2500 gramos cada uno.
- Con 11 esferas de acero (gradación B), se colocó la grava ²⁸ en la máquina de Los Ángeles a una velocidad de 30 a 33 rpm por 500 revoluciones.
- Se retiró el material y se separó con el tamiz N°12.
- ³⁴ Se lavó y secó el material retenido en el tamiz y se pesó para calcular el porcentaje de pérdida.

Figura 6

Esferas metálicas para ensayo de abrasión



3.7.4. ¹ **Durabilidad al sulfato de sodio y sulfato de magnesio (MTC E 209, ASTM**

C88/C88M-24)

¹ **Equipos y Materiales**

- Tamices.
- **Balanza de 0.1 g** de precisión.
- Sulfato de magnesio.
- Recipientes.
- Estufa.

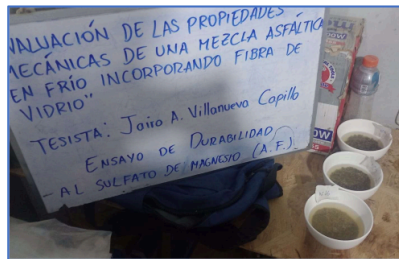
Procedimiento

- Se preparó el agregado fino obteniendo muestras de 100 g como mínimo retenido en los tamices N°4, N°8, N°16, N°30 y N°50.
- Se preparó el agregado grueso con una ¹ muestra que no **pase el tamiz N°4**, ¹⁵ los pesos mínimos **retenidos en cada tamiz** se indican **en la norma**.

- Se lavó y secó los agregados retenidos en los tamices, se separó de acuerdo a su tamaño y se colocaron en recipientes.
- Se preparó la solución de sulfato de magnesio usando 350 g del compuesto por litro de agua.
- Se agregó la solución a cada recipiente con agregado, después de 16 a 18 horas sumergidos, los agregados se retiraron de la solución y se secaron con estufa, luego de enfriar se volvieron a colocar en la solución.
- Se repitió el proceso 5 veces (5 ciclos), al terminar se lavaron las muestras y se secaron, cada una de las muestras se tamizó en los mismos tamices en las que estuvieron retenidas antes de sumergirlas.
- Se registró el peso final y se calculó el porcentaje de pérdida.

Figura 7

Muestras para durabilidad al sulfato de magnesio del agregado fino



3.7.5. Porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso (MTC E 210, ASTM D5821-13)

Equipos y Materiales

- Tamices.
- Balanza de 0.1 g de precisión.

Procedimiento

- Se usó una muestra con un peso total mayor de 500 g como indica la norma para agregado con TMN de 1/2", luego, se lavó y secó para retirar los finos.
- Se tamizó la muestra en tamaños de 1/2" y 3/8", luego, se anotó los pesos retenidos.
- Se inspeccionó cada partícula y se separó las que cumplían con el número requerido de caras fracturadas.
- Se pesó las partículas separadas y en base al peso inicial se calculó el porcentaje de caras fracturadas.

3.7.6. Angularidad (MTC E 222, ASTM C1252-23)

Equipos y Materiales

- Tamices N°8 y N°200.
- Balanza de 0.1 g de precisión.
- Cilindro, embudo y marco metálico para angularidad.

Procedimiento

- Se separó la arena comprendida entre el tamiz N°8 y N°200.
- Se vertió la arena en el embudo dejándola caer sobre el cilindro de volumen conocido hasta que este rebose, luego, se enrasó el cilindro y se pesó la arena retenida.

Figura 8

Angularidad del agregado fino



3.7.7. Partículas planas y alargadas (MTC E 223, ASTM D4791-19)

Equipos y Materiales

- Calibrador proporcional.
- Tamices.
- Balanza de 0.1 g de precisión.

Procedimiento

- Se redujo la muestra por cuarteo hasta llegar a un peso mayor de 2 kg, que es el peso mínimo para una muestra con TMN de 1/2".
- Se tamizó hasta el N°4 y se halló su gradación.
- De cada retenido en el tamiz se escogió 100 partículas y se pesó.
- Se estableció tres categorías para las partículas: 1) planas, 2) alargadas y 3) planas y alargadas.
- Se inspeccionó con el calibrador proporcional cada partícula de las 100 y se colocó en las categorías mediante el siguiente criterio: para ¹⁴prueba de planas la abertura grande

es igual al ancho máximo de la partícula, la partícula es plana si el grosor se puede pasar a través de la abertura pequeña; para prueba de alargadas la abertura grande es igual a la longitud de la partícula, la partícula es larga si el ancho se puede pasar a través de la abertura pequeña.

- Clasificadas las partículas se pesaron y se calculó el porcentaje de planas y alargadas respecto a su peso original.

Figura 9

1 Ensayo de partículas planas y alargadas



3.7.8. Equivalente de arena (MTC E 114, ASTM D2419-22)

Equipos y Materiales

- Equipo para **1** equivalente de arena: cilindro graduado transparente de plástico, tapón de jebe, tubo irrigador, ensamble de sifón, medidor de arena con peso en el extremo y lata de medición **45** 85 ± 5 mL.
- Stock de solución hecha de cloruro de calcio, glicerina, formaldehído y agua destilada.
- Tamiz N°4.
- Embudo.

- Reloj.

Procedimiento

- Se tamizó la arena a través de la malla N°4 hasta obtener un promedio de 1500 g de muestra, se tomó parte de esta muestra y se llenó en la lata de medición.
- Se preparó la solución de trabajo diluyendo 85 ± 5 mL de stock en 3.8 L de agua.
- Colocando la solución por encima de la superficie de trabajo se sifoneó la solución a la probeta y se llenó de líquido hasta la marca de 4 pulgadas.
- Con ayuda de un embudo se vació en la probeta la arena de la lata de medición.
- Se dejó reposar la arena por 10 minutos para saturarla.
- Terminado el tiempo se colocó un tapón en la probeta y se agitó durante 90 ciclos.
- Se llenó la probeta con la solución hasta llegar a la marca máxima de 15 pulgadas.
- Se dejó reposar por 20 minutos y luego se tomó la lectura de finos y arena.

Figura 10

Ensayo de equivalente de arena



3.7.9. ¹⁷ *Diseño de mezcla asfáltica en frío*

a. Determinación del **Porcentaje Óptimo Teórico de Emulsión**

Procedimiento

- Se ²⁰ calculó con la siguiente fórmula:

$$E = (0.05A + 0.1B + 0.5C) \times 0.7$$

Donde:

⁴ A es el porcentaje de agregado retenido en el tamiz N° 8.

B es el porcentaje que pasa el tamiz N° 8 y se retiene en el tamiz N° 200.

C es el porcentaje que pasa el tamiz N° 200.

b. Prueba de recubrimiento o cobertura

¹ Equipos y Materiales

- Balanza de 0.1 g de precisión.
- Cucharon de acero para mezclado.
- Recipientes.

Procedimiento

- Se seleccionó 1100 g de agregado combinado (grueso y fino) seco.
- Se mezcló el agregado combinado con el agua de premezcla la cual fue 2% del peso del agregado seco, luego, se agregó la emulsión, cuya cantidad se calculó con la fórmula anterior, y se mezcló por 1 a 3 minutos asegurando una distribución uniforme de la emulsión sobre los agregados. Se prepararon mezclas con 2, 3, 4 y 5% de agua de premezcla.
- Se evaluó visualmente la extensión del recubrimiento de la emulsión sobre los agregados buscando que los agregados estén completamente cubiertos, sin áreas expuestas que puedan afectar la cohesión de la mezcla.

- Se eligió el agua de premezcla que dio el mejor recubrimiento del agregado sin llegar a saturar la mezcla.

c. Contenido Óptimo de Humedad de Compactación

1 Equipos y Materiales

- Balanza de 0.1 g de precisión.
- Cucharón de acero para mezclado.
- Espátula.
- Equipo Marshall para compactación de briquetas.
- Prensa Marshall.

55 Procedimiento

- Se seleccionó una muestra de agregado combinado de 1100 g de peso en estado seco.
- Se mezcló el agregado y el agua de premezcla de forma manual hasta que la humedad estuvo completamente dispersada en todo el agregado, luego, se vertió la emulsión y se mezcló durante 1 a 3 minutos hasta uniformizar la mezcla.
- Se aireó la mezcla antes de compactarla para eliminar el agua y llegar a la humedad de compactación prevista.
- Para realizar la compactación se colocó el molde de la biqueta en el pedestal de compactación Marshall, luego, se colocó un disco de 7 papel no absorbente dentro del molde y se vertió la mezcla, se golpeó con la espátula 15 veces en el perímetro y 10 veces en el interior, se colocó otro disco de papel encima y se procedió a compactar.
- 2 Con el martillo se aplicó 50 golpes por cara de la biqueta. Se hicieron tres briquetas por cada contenido de humedad.
- Después de 24 horas en el molde, se extrajo la biqueta y se dejó curar por otras 72 horas, terminado este periodo se ensayo su estabilidad en la prensa Marshall.

- Con los datos obtenidos se graficó ¹ la curva de Estabilidad vs Humedad de compactación de la cual se obtuvo, para una estabilidad máxima, la óptima ²⁶ humedad de compactación.

d. Variación del Contenido de Asfalto Residual

¹ Equipos y Materiales

- Balanza de 0.1 g de precisión.
- Cucharón de acero para mezclado.
- Espátula.
- Equipo Marshall para compactación de briquetas.
- Prensa Marshall.
- Medidor de flujo
- Bomba de vacío con desecador y manómetro.

Procedimiento

- De manera similar al procedimiento anterior se elaboraron y curaron las briquetas. En esta etapa se fue variando en 1% la cantidad de asfalto residual con un total de cinco porcentajes y seis briquetas para cada porcentaje, reduciendo el agua añadida a medida que la cantidad de emulsión aumenta para mantener siempre el mismo contenido de humedad de la mezcla.
- Después del curado se halló ¹ la gravedad específica bulk de todas las briquetas.
- Por cada contenido de asfalto residual, tres de las briquetas se ensayaron en seco en la prensa Marshall para obtener su estabilidad y flujo. Las otras tres se sometieron a un proceso de inmersión y saturación al vacío, usando la bomba de vacíos se aplicó a las briquetas en agua una presión ²¹ de 100 mm de Hg durante una hora y luego se dejó reposar sin presión otra hora más, al terminar se ensayaron las muestras en la prensa Marshall.
- Se secaron las briquetas falladas para calcular su contenido de humedad.

- Con los datos obtenidos se elaboraron las gráficas correspondientes y se definió ¹ el porcentaje óptimo de asfalto residual.

3.8. Técnicas de Análisis de Resultados

Para evaluar objetivamente el comportamiento ¹ de la mezcla asfáltica en frío con y sin la inclusión de fibra de vidrio, se examinaron los resultados experimentales utilizando herramientas estadísticas y computacionales. Esto se logró utilizando Microsoft Excel para organizar los datos en ³ tablas y gráficos comparativos que facilitaron la comprensión visual de los patrones observados, así como para realizar los cálculos de diseño y determinar los valores óptimos de estabilidad y fluidez.

En primer lugar, ⁶⁸ se determinaron los valores medios y la desviación estándar del grupo de muestra seleccionado mediante la aplicación de técnicas analíticas descriptivas. Para confirmar que existían diferencias estadísticamente significativas ⁵⁰ entre las mezclas convencionales y las mezclas modificadas con fibra de vidrio, ⁵ se llevó a cabo un análisis estadístico inferencial utilizando la prueba t de Student con un nivel de confianza del 95 %. Esta prueba permitió validar la hipótesis planteada y determinar si la incorporación de la fibra produce un efecto real en las características mecánicas del asfalto mezclado en frío.

Finalmente, los resultados fueron presentados mediante gráficos y tablas comparativas, lo que permitió una interpretación clara de los efectos del refuerzo con fibra de vidrio sobre la estabilidad y el flujo.

32
CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. Resultados y Discusión

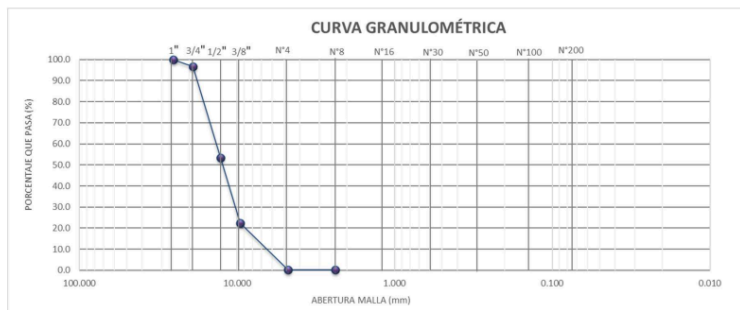
4.1. Resultados

4.1.1. Caracterización de los Agregados Pétreos para el Diseño de Mezcla Asfáltica

- Análisis granulométrico de los agregados

Figura 11

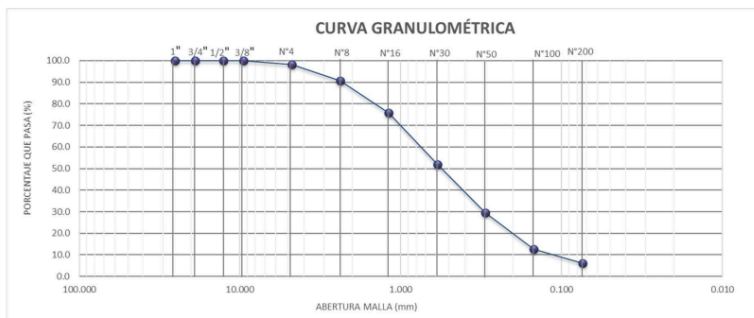
Curva granulométrica del agregado grueso



En la Figura 11 se muestra la curva granulométrica del agregado grueso obtenido de la Cantera Pucarragá en Sihuas; tuvo un 99.8% de grava, 0.1% de arena y 0.1% de finos. Tuvo un TMN de 1/2" y una humedad de 0.29%.

Figura 12

Curva granulométrica del agregado fino



En la Figura 12 se muestra la curva granulométrica del agregado fino obtenido de la Cantera Pucarragá en Sihuas; tuvo un 1.9% de grava, 92.0% de arena y 6.2% de finos. Tuvo una humedad de 0.66%.

57 - Gravedad específica y absorción de los agregados

Tabla 9

Gravedad específica y absorción del agregado grueso

Descripción	M1	M2	12 Promedio
Densidad Relativa (Gravedad específica OD)	2.61	2.59	2.60
Densidad Relativa (Gravedad específica SSD)	2.64	2.62	2.63
Densidad Relativa Aparente (Gravedad específica)	2.69	2.67	2.68
Absorción (%)	1.3	1.0	1.2

7
Tabla 10

Gravedad específica y absorción del agregado fino

Descripción	M1	M2	12 Promedio
Densidad Relativa (Gravedad específica) (OD)	2.69	2.70	2.69
Densidad Relativa (Gravedad específica) (SSD)	2.71	2.71	2.71
Densidad Relativa Aparente (Gravedad específica)	2.74	2.74	2.74
% Absorción	0.7	0.6	0.6

También se calculó las gravedades específicas ⁴¹ de la combinación de los agregados, esto se hizo en base a la proporción de arena y grava usada para elaborar las briquetas y las gravedades específicas de ambos agregados; de los tres valores calculados, el más importante es la gravedad específica aparente ya que se usa como dato en el diseño, este tuvo un valor de 2.71.

Según el MS-14, para capas superficiales, la mezcla asfáltica en frío suele ser adecuada para tránsito ligero y medio (Asphalt Institute, 1997, p. 2). Teniendo en cuenta esto se

compararon ¹ los resultados de los ensayos realizados a los agregados con los parámetros establecidos por el MTC para tránsito medio.

Tabla 11

² Comparación de los ensayos a los agregados con los parámetros del MTC

Ensayos		Resultados obtenidos	Requerimiento MTC Tránsito medio
Desgaste Los Ángeles	⁴ MTC E 207	23%	25% max. (rodadura)
Durabilidad al sulfato de magnesio	Agregado grueso MTC E 209	0.7%	18% ³⁷ max.
	Agregado fino	4.6%	18% max.
Partículas fracturadas	1 cara MTC E 210	100.0%	75% min. (rodadura)
	2 caras	96.2%	60% min. (rodadura)
Angularidad	MTC E 222	45.1%	45% min. (rodadura)
Partículas planas y alargadas	MTC E 223	0.8%	10% max.
Equivalente de arena	MTC E 114	66%	50% min.

Se puede observar que todos los resultados de los ensayos realizados cumplen con lo establecido en la norma "Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción" del MTC.

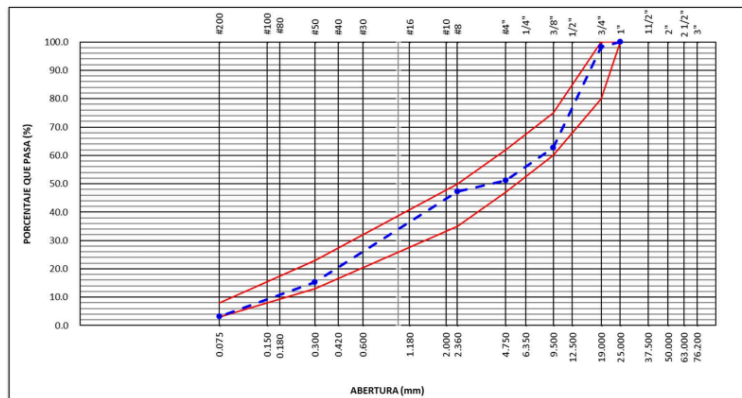
¹⁰ 4.1.2. Diseño de Mezcla Asfáltica en Frío con Emulsión

4.1.2.1. Gradación de la mezcla. La gradación ¹ de la combinación de agregados se evaluó respecto a los límites de la Tabla 2 para una mezcla densa en frío. Se eligió la gradación MDF-2 ya que, según la Tabla 3, es la adecuada para mezclas usadas en capas de rodadura, así

como para la reparación de baches y es la que mejor se adapta a la granulometría del agregado combinado usado para esta investigación.

Figura 13

8 Gradación de los agregados combinados para la mezcla densa en frío



Lo ideal es que la curva tienda a ser paralela a los límites, ²⁶ se puede observar en la Figura 13 que la granulometría de los agregados combinados tiene puntos en los que la gráfica está muy cerca de los límites, aunque no sea lo ideal, sigue siendo aceptable para elaborar la mezcla mientras se encuentre dentro del rango. En cuanto a la proporción de agregados se estableció **48% de grava y 52% de arena** como valores óptimos para elaborar el diseño.

4.1.2.2. Porcentaje teórico de emulsión asfáltica. Usando la fórmula, mencionada en el capítulo 2, se calculó **6.1%** como la cantidad de emulsión asfáltica teórica.

4.1.2.3. Prueba de recubrimiento o cobertura. Para este ensayo se probó distintos contenidos de agua añadida o agua de premezcla y se observó cual producía un mayor recubrimiento en el agregado.

Tabla 12

Prueba de recubrimiento o cobertura

Agua Añadida (%)	Emulsión (%)	Asfalto Residual (%)	Humedad de Mezcla (%)	Cobertura (%) (24 Horas)	Observación
2.0	6.1	3.7	4.8	75	Regular
3.0	6.1	3.7	5.7	85	Óptimo
4.0	6.1	3.7	6.7	95	Óptimo
5.0	6.1	3.7	7.7	100	Saturado

Se puede ver en la Tabla 12 que 3% y 4% de agua de premezcla dan recubrimientos óptimos; pero se eligió **4%** para el diseño ya que lo mejor es tomar la cantidad de agua más próxima a la saturación para que haya una mejor distribución de la emulsión en los agregados. Esta cantidad de agua de premezcla nos dio una humedad total en la mezcla de **6.7%** que es la suma de las humedades del agua de premezcla, agua de los agregados y agua de la emulsión.

4.1.2.4. Contenido Óptimo de Agua en la Compactación. Se obtuvo el contenido óptimo de agua de compactación comparando diferentes valores de humedad de la mezcla al momento de compactarse con la estabilidad que generaba.

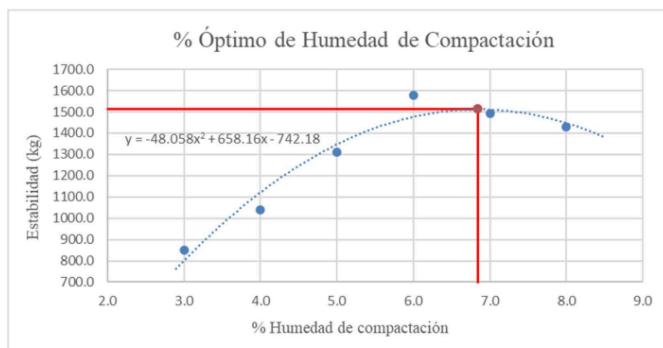
Tabla 13

Estabilidad de la mezcla en función de la humedad de compactación

Humedad (%)	Estabilidad (kg)
8.0	1430.6
7.0	1493.6
6.0	1578.1
5.0	1310.3
4.0	1041.3
3.0	848.9

Figura 14

Estabilidad vs Humedad de compactación



De la Figura 14 podemos observar que la estabilidad incrementó conforme aumentó la humedad de compactación hasta llegar a un punto en el que la estabilidad comenzó a descender, esto nos da a entender que valores muy bajos o muy elevados de humedad de compactación nos da estabilidades bajas. Se halló la estabilidad máxima la cual tuvo un valor de **1511.2 kg**, dicho valor correspondió al óptimo de humedad de compactación que fue **6.8%**.

4.1.2.5. Variación del Contenido de Asfalto Residual. Para hallar el valor óptimo de asfalto residual y por ende el valor óptimo de emulsión asfáltica se fabricaron briquetas con distintos porcentajes de asfalto residual, teniendo en cuenta que el óptimo teórico de emulsión asfáltica fue 6.1% y que el porcentaje de residuo asfáltico de la emulsión según la ficha técnica del producto fue 60.5% se calculó un asfalto residual teórico de 3.7%; este valor se fue variando en 1% hasta tener los porcentajes de 2.7, 3.7, 4.7, 5.7 y 6.7% de asfalto residual. Con esto se elaboraron 30 briquetas, 15 ensayadas en seco y 15 ensayadas luego de la inmersión y saturación en una bomba de vacíos, esto hacia un total de 6 briquetas por contenido de asfalto residual. Luego de ensayarlas se elaboraron gráficas a partir de los resultados obtenidos, los datos se muestran en la Tabla 14.

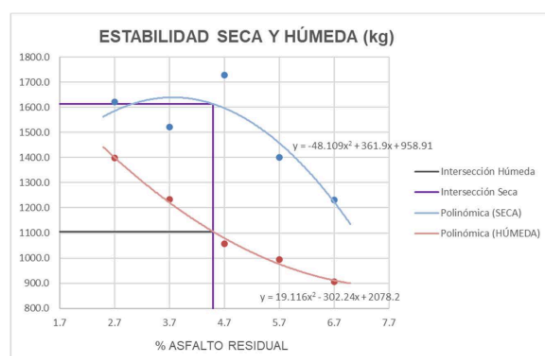
Tabla 14

Cuadro resumen con porcentajes de asfalto residual

% Asfalto residual	2.7	3.7	4.7	5.7	6.7
Estabilidad seca (kg)	1622.3	1521.4	1729.1	1400.7	1231.0
Estabilidad húmeda (kg)	1399.3	1233.4	1057.5	994.5	906.0
% Pérdida de estabilidad	13.7	18.9	38.8	29.0	26.4
Densidad bulk seca	2.141	2.139	2.150	2.107	2.094
% Humedad absorbida	1.6	3.8	3.9	2.6	1.7
% Vacíos totales	8.1	7.6	6.7	7.1	6.9
Flujo (mm)	4.03	3.49	5.09	5.11	7.67

Figura 15

Gráfica de Estabilidad seca y húmeda vs Asfalto Residual

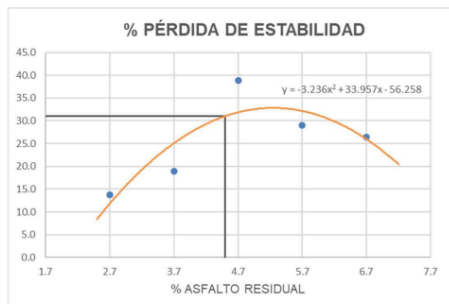


En la **Figura 15** se puede apreciar que conforme aumentó el asfalto residual la curva de estabilidad seca subió hasta llegar a un punto máximo donde comenzó a descender. En cambio, la curva de estabilidad húmeda solo descendió, esto se debió a la exposición a la humedad y saturación al vacío a las que fueron sometidas las muestras antes del ensayo de estabilidad/flujo. Ya se mencionó anteriormente, que uno de los criterios para elegir el óptimo de asfalto residual es que este dé la máxima estabilidad húmeda posible, se eligió como asfalto residual óptimo **4.5%** el cual da una estabilidad seca y húmeda de **1613.3 kg** y **1105.2 kg**.

respectivamente; este valor óptimo no da el máximo valor de estabilidad en húmedo según la gráfica debido a las limitaciones que dan las siguientes gráficas.

Figura 16

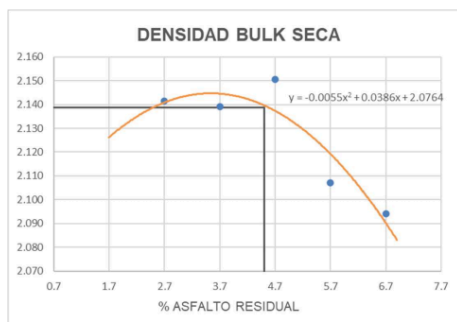
Gráfica de **Pérdida de estabilidad vs Asfalto Residual**



La pérdida de estabilidad mostró un pico en aproximadamente 5% de asfalto residual. La pérdida debe ser como máximo 50% según la norma EG-2013, entonces, cualquier valor que se elija de la gráfica estará dentro de ese límite. Lo mejor es elegir una pérdida lo mínima posible, ya que cuanto mas elevada es la pérdida más susceptible a la humedad se vuelve la mezcla. Con 4.5% como valor óptimo de asfalto residual da una pérdida de 31.0%.

Figura 17

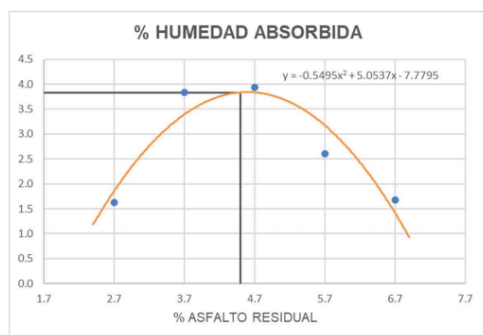
Gráfica de **Densidad bulk seca vs Asfalto Residual**



En la Figura 17 se aprecia que la densidad bulk seca llegó a un punto máximo luego bajó conforme aumentó el asfalto residual, esto se debe a que a menor cantidad de asfalto se generan muchos vacíos reduciendo la densidad; si hay demasiado asfalto, como este tiene menor densidad que los agregados, la densidad general de la mezcla se ve reducida. Para un valor óptimo de **4.5%** de asfalto residual la densidad bulk seca es **2.139** la cual esta próxima al valor máximo.

Figura 18

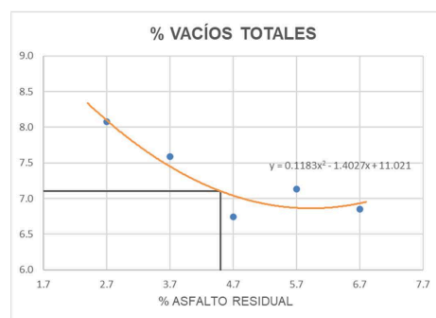
Gráfica de Humedad absorbida vs Asfalto Residual



Lo mejor para la mezcla es que no absorba mucha agua ya que podría causar desprendimiento del agregado, la norma EG-2013 da un valor máximo de 4% para la humedad absorbida. De la Figura 18, para un asfalto residual de **4.5%** la humedad absorbida es **3.8%** la cual está muy cerca del límite puesto por la norma. Se pudo haber elegido valores más bajos de absorción, pero eso habría comprometido otras propiedades ya vistas como la estabilidad en húmedo, pérdida de estabilidad y la densidad; por eso, se optó por este valor que sigue estando dentro de los límites.

Figura 19

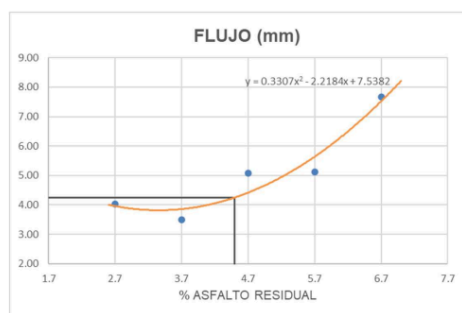
Gráfica de Vacíos totales vs Asfalto Residual



En la Figura 19 los vacíos totales disminuyen conforme aumenta la cantidad de asfalto residual, cuanto más asfalto tiene una mezcla más se llenan los vacíos de aire, pero la mezcla se puede volver inestable. Para un valor de **4.5%** de asfalto residual se obtuvo **7.1%** de vacíos totales.

Figura 20

Gráfica de Flujo vs Asfalto Residual



El flujo aumentó conforme lo hizo el asfalto residual, como se ve en la Figura 20. Para un **4.5%** de asfalto residual se obtuvo **4.25 mm** de flujo. El flujo no es una propiedad que esta metodología de diseño tome en cuenta, pero se consideró para los objetivos de investigación.

En la Tabla 15 se muestra los valores de las propiedades para un 4.5% de asfalto residual óptimo junto con los parámetros que da el MTC en la norma EG-2013.

Tabla 15

Propiedades Método Illinois – Marshall Modificado

Propiedades	-0.3 %	Óptimo	+0.3 %	Parámetros MTC, EG-2013
Nº de golpes por cara		50		
% Asfalto residual	4.2	4.5	4.8	
% Emulsión asfáltica	6.9	7.4	7.9	
Densidad bulk seca	2.142	2.139	2.135	
% Humedad absorbida	3.8	3.8	3.8	4% max.
% Vacíos totales	7.2	7.1	7.0	2 - 8%
Estabilidad seca (kg)	1630.2	1613.3	1587.6	
Estabilidad húmeda (kg)	1146.0	1105.2	1067.9	500 lb (227 kg) min.
% Pérdida de estabilidad	29.3	31.0	32.2	50% max.
Flujo (mm)	4.05	4.25	4.51	

Finalmente, en la Tabla 16 se muestra el diseño de la mezcla patrón con los porcentajes en función del peso del agregado combinado.

Tabla 16

Diseño de mezcla asfáltica en frío con emulsión (patrón)

Descripción	Cantidad
Grava	48.0%
Arena	52.0%
Emulsión	7.4%
Agua de premezcla	3.6%

La cantidad de agua de premezcla, que inicialmente tenía 4%, se cambió a 3.6% ya que se debió ajustar a la cantidad de agua de compactación y al agua de la emulsión óptima encontrada, se pueden ver los cálculos en los anexos. Los porcentajes de emulsión y agua de premezcla son en base al peso del agregado combinado seco.

4.1.3. Incorporación ²² de fibra de vidrio a la mezcla asfáltica en frío

La incorporación de fibra de vidrio se hizo mediante la sustitución de una parte del agregado fino. Los porcentajes de fibra no se establecieron de manera predeterminada, sino que, se comenzó usando 0.1% de fibra y se pretendió aumentar o disminuir dicho valor de acuerdo a como cambiaba la estabilidad y flujo, al final se usó 0.1%, 0.2% y 0.3%. En la Tabla 17 se muestran las proporciones de los agregados para la mezcla con la sustitución parcial de arena por fibra.

Tabla 17

Proporción de fibra de vidrio y agregados para la mezcla

Proporción original:	Grava: 48.0%	Arena: 52.0%
Fibra de vidrio	Grava	Arena
0.1%	48.0%	51.9%
0.2%	48.0%	51.8%
0.3%	48.0%	51.7%

Al variar la arena también cambió la granulometría original de la combinación de agregados; pero, al ser poca la variación, las curvas granulométricas se mantuvieron dentro de los límites de la gradación establecidos por la norma, estos datos y gráficos se muestran con mayor detalle en los anexos.

En la Tabla 18 se muestran los resultados de las propiedades de la mezcla en frío con fibra de vidrio comparándolas con los valores de la mezcla patrón.

Tabla 18

Resultados de ¹ la mezcla asfáltica en frío con fibra de vidrio

Propiedades	Patrón	F-0.1%	F-0.2%	F-0.3%
Nº de golpes por cara	50	50	50	50
% Asfalto residual	4.5	4.5	4.5	4.5
% Emulsión asfáltica	7.4	7.4	7.4	7.4
Densidad bulk seca	2.139	2.145	2.140	2.123
% Vacíos totales	7.1	7.0	7.1	7.4
Estabilidad (kg)	1613.3	2008.9	1867.6	1677.3
Flujo (mm)	4.25	6.98	7.13	6.15

Las briquetas con fibra solo se ensayaron en estado seco y no en estado seco y húmedo como en el diseño; las propiedades de humedad absorbida, estabilidad húmeda y pérdida de estabilidad solo son necesarias para hallar ⁷ el contenido óptimo de asfalto residual en el diseño.

4.1.4. ¹ Comparación de los valores de estabilidad y flujo de la mezcla convencional y modificada con fibra de vidrio

Figura 21

²⁹ Comparación de los valores de estabilidad de la mezcla convencional y modificada

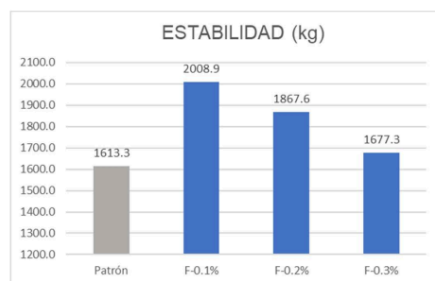
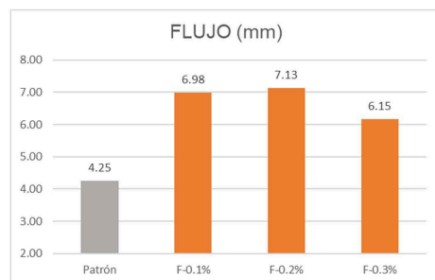


Figura 22

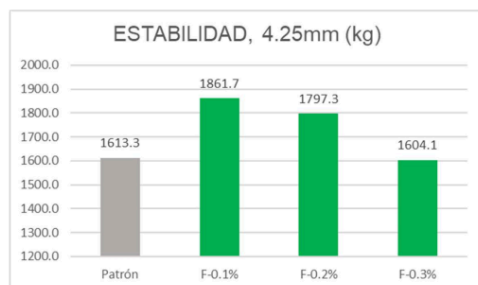
Comparación de los valores de flujo de la mezcla convencional y modificada



De las gráficas podemos observar que las estabilidades de las mezclas con fibra superaron a la mezcla convencional (patrón), esto es lo que se buscaba con la investigación, excepto, por el flujo, que tuvo valores superiores para las mezclas con fibra. Lo ideal, al agregar la fibra, es que la estabilidad aumente mientras que el flujo disminuya o se mantenga; por esa razón, se optó por comparar los resultados de estabilidad para un mismo flujo. En la Figura 23 se muestran los valores de estabilidad para un flujo de 4.25 mm, que es el valor de flujo de la mezcla patrón.

Figura 23

Comparación de los valores de estabilidad para un flujo de 4.25 mm



Se puede observar que las mezclas con 0.1% y 0.2% de fibra dieron resultados mayores de estabilidad en comparación con la mezcla patrón, siendo la de 0.1% que logró dar el mejor resultado con 1861.7 kg de estabilidad.

4.1.5. Prueba de Hipótesis

Hipótesis nula

H₀: Las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica en frío no mejoran significativamente al incorporar fibra de vidrio.

Hipótesis alternativa

H₁: Las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica en frío mejoran significativamente al incorporar fibra de vidrio.

$$H_0: \bar{X} \leq \mu$$

$$H_1: \bar{X} > \mu$$

Para la prueba de hipótesis se tuvieron 12 briquetas con 0.1% de fibra de vidrio a las cuales se les midió la estabilidad para un flujo de 4.25 mm. El valor de la mezcla patrón (sin fibra) fue de 1613.3 kg.

Tabla 19

Estabilidad de briquetas con 0.1% de fibra para prueba de hipótesis

Muestra	Estabilidad (kg)
M1	1632.3
M2	2091.5
M3	1861.4
M4	1689.5
M5	1613.3
M6	1794.9
M7	1857.6
M8	1616.2
M9	1693.2
M10	1987.5
M11	1544.0
M12	1627.0

23

Para la prueba de hipótesis se usó la Prueba t de Student con un valor de significancia

de $\alpha = 0.05$. Para calcular el valor t se usó la siguiente fórmula:

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{S}{\sqrt{n}}}$$

Donde:

\bar{X} = Media muestral

μ = Media de referencia

S = Desviación estándar

n = Número de unidades muestrales

Por la naturaleza de la hipótesis la gráfica de la curva normal tendrá solo una región de rechazo (una cola), debido a que, lo que se busca es que ¹los valores de estabilidad de la mezcla asfáltica con fibra sean mayores que los de la mezcla patrón. Los valores calculados se muestran a continuación:

$$\bar{X} = 1750.7 \text{ kg}$$

$$\mu = 1613.3 \text{ kg}$$

$$S = 168.9 \text{ kg}$$

$$n = 12$$

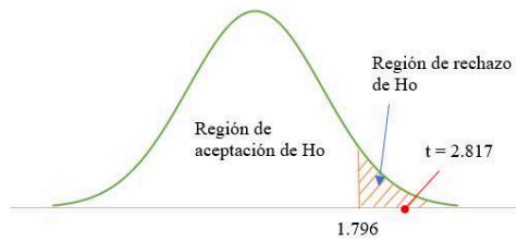
$$GL = 11$$

$$t = 2.817$$

$$t_{\text{critico}} = 1.796 \text{ (valor hallado en tablas)}$$

Figura 24

Distribución *t* de Student para estabilidad de briquetas con 0.1% de fibra de vidrio



El valor de *t* cae en la zona de rechazo de la hipótesis nula, por lo tanto, esta no se acepta. Se acepta la hipótesis alternativa.

4.2. Discusión

- Análisis e interpretación de los resultados

De acuerdo a la prueba de hipótesis mediante el método t de Student se aceptó la hipótesis planteada al principio la cual afirma que las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica en frío mejoran significativamente al incorporar fibra de vidrio. Para un flujo de 4.25 mm, la estabilidad de la mezcla convencional (patrón), de 1613.3 kg, pasa a un promedio de 1750.7 kg al incorporarle 0.1% de fibra de vidrio, esto supone un incremento del 8.5% en la estabilidad.

Tanto la mejora de la estabilidad como del flujo, puede atribuirse a que la fibra de vidrio proporcionó una mejor distribución de esfuerzos y una mayor cohesión interna entre los agregados. La fibra de vidrio es un material usado en muchos ámbitos como la construcción y la arquitectura, industria automotriz o fabricación de objetos que usamos de manera cotidiana; esto por su versatilidad al combinar ligereza, resistencia mecánica y resistencia química, estas características influyeron en la mejora de la mezcla en frío. Las fibras de vidrio actuaron como un refuerzo entre los agregados, limitando la movilidad de estos bajo carga y distribuyendo mejor los esfuerzos dentro de la mezcla, como resultado se redujo las deformaciones y otorgó mayor estabilidad. Además, la fibra, al ser un material que no absorbe agua, no afectó a la dosificación, trabajabilidad y compactación de las briquetas.

- Comparación con otras investigaciones

En investigaciones extranjeras como las de Lara y Suquillo (2024) se trató de mejorar una mezcla asfáltica en frío mediante la inclusión de agregado reciclado y fibra de vidrio, la mezcla tenía como ligante asfalto diluido RC-250 y se logró mejorar la estabilidad de 1800 lb (816.5 kg) a 1986.15 lb (900.9 kg) con 2.78% de RC-250 y 0.5 % de fibra de vidrio; de igual forma, en la presente investigación se mejoró la estabilidad de 1613.3 kg a 1861.7 kg para un porcentaje de fibra de vidrio de 0.1%, la única diferencia fue el ligante asfáltico usado el cual

fue emulsión y tuvo un valor óptimo de 7.4%. Por otro lado, Bonilla (2024) en su estudio para examinar una mezcla asfáltica en caliente con adición de fibra de vidrio encontró que la estabilidad se redujo un 11.05% para un porcentaje de fibra de 5%, el cual fue el mejor resultado, esto pudo deberse a que se usó porcentajes de 5, 7.5, 10, 15 y 25%, los cuales son cantidades considerables de fibra que pudieron afectar la mezcla; en la investigación actual se encontró que con 0.1 y 0.2% de fibra mejoraba la estabilidad, pero al llegar a 0.3% la estabilidad comenzaba a descender. En la práctica, mientras se realizaban los ensayos de las briquetas, se pudo observar que cantidades de fibra mayores de 0.5% comenzaban a tener un volumen excesivo pudiendo llegar a afectar la trabajabilidad y adherencia de los agregados.

La investigación de Eguino y Miranda (2023) se centró en elaborar un micropavimento con emulsión al que se incorporó fibra de vidrio, el objetivo fue evitar el agrietamiento y aumentar la cohesividad a la superficie de apoyo, obtuvieron valores óptimos de fibra de 0.13 y 0.19%; aunque la presente investigación estuvo enfocada en hacer mezclas en frío para carpetas asfálticas o reparación de baches y no para micropavimentos, se puede ver que las cantidades de fibra de vidrio óptimas de ambos estudios son más coincidentes ya que en esta se obtuvo 0.1% de fibra como mejor valor; además, otro aspecto en común, es que ambas mezclas fueron hechas en frío con emulsión asfáltica.

También se hicieron estudios de mezcla en frío con la incorporación de otros aditivos como la de Rodríguez y Sandoval (2022) en la que añadieron cemento de alta resistencia a su mezcla asfáltica con emulsión, la cantidad óptima de emulsión fue de 7% y al incorporarle varias cantidades de cemento hallaron que la mejor era 10%, esta cantidad de cemento dio valores de estabilidad y flujo de 15.07 kN (1536.71 kg) y 3.94 mm respectivamente, en comparación con la investigación actual, los resultados son similares, la emulsión óptima fue 7.4% y la estabilidad y flujo fue 1861.7 kg y 4.25 mm respectivamente. Por otro parte, Quimbita (2023) en su investigación de mezclas en frío no llegó a mejorar la estabilidad y el

flujo usando porcentajes de 3, 6, 9, 12 y 15% de adición de caucho ya que los valores obtenidos no superaban a la mezcla original sin caucho, esto hace que sus resultados no coincidan con los obtenidos en esta investigación.

En investigaciones nacionales, García (2023) combinó ¹mezcla asfáltica en caliente con fibra de vidrio para evaluar la viscosidad, densidad, porcentaje de vacíos y estabilidad; concluyó que 4% de fibra produce mejores resultados en la mezcla. Ponce (2021) también usó fibra de vidrio como aditivo para una mezcla asfáltica en caliente, los mejores resultados obtenidos fueron al añadir 3% ¹de fibra de vidrio, obtuvo una estabilidad de 1122 kg y un flujo de 3.43 mm. Comparando estos resultados con la actual investigación, se puede observar que, a pesar de que los tipos de mezcla sean distintos, una en caliente y otra en frío, la adición de ⁵⁰fibra de vidrio en ambas mezclas puede mejorar la estabilidad y el flujo. La diferencia está en la cantidad de fibra usada, para mezclas en caliente se necesitó 3% y 4% de fibra, en cambio, para la mezcla en frío de esta investigación solo fue necesario 0.1%; estas cantidades son considerablemente diferentes.

En cuanto a investigaciones ¹⁹de mezclas asfálticas en frío, Gavino (2022) en su estudio de mezcla en frío agregó poliestireno expandido para conocer la variación de la resistencia mecánica, encontró que ¹la estabilidad de la mezcla convencional fue de 929 kg y aumentó a 1471 kg al agregarle 0.01% de poliestireno, ¹el flujo de la mezcla convencional fue 10.1 mm y disminuyó a 7.2 mm para la misma cantidad de poliestireno; ambas propiedades mejoraron al agregarle dicho material. En la presente investigación también se lograron resultados positivos en la estabilidad y flujo al añadir fibra de vidrio, la diferencia estuvo en que la fibra de vidrio óptima fue de 0.1% y el poliestireno expandido óptimo fue de 0.01%, estas cantidades son muy diferentes y puede deberse a que el poliestireno tiene mucho más volumen por lo que se requirió menor cantidad. Paitán y Rojas (2023) estudiaron el efecto de adicionar polvo de sílice en una mezcla asfáltica en frío, concluyeron que el polvo de sílice reduce la estabilidad de la mezcla

en 8.83% pero mejora el flujo reduciéndolo un 45.6%; por otra parte, Rodríguez (2023), en su investigación de mezcla en frío con fibras de polietileno determinó que el óptimo de fibra ¹ para mejorar la estabilidad y el flujo fue de 0.5%, similar a la cantidad óptima encontrada en esta investigación la cual fue de 0.1%.

- Limitaciones

Un punto importante es la falta de parámetros para el flujo y la relación estabilidad/flujo ¹ en el diseño de mezcla en frío, esto limita tener un mayor control de los resultados del diseño, cantidades muy bajas o muy elevadas de la relación E/F no implican que la mezcla vaya a tener el mejor comportamiento, es necesario que este valor sea equilibrado y eso solo se puede evaluar con parámetros. La norma EG-2013 establece límites de la relación E/F para mezclas asfálticas en caliente cuyo valor es 1700 – 4000 kg/cm, si comparamos con los resultados obtenidos, para 1861.7 kg de estabilidad y 4.25 mm de flujo tendríamos una relación E/F de 4380 kg/cm, este valor sobrepasa un poco el límite dado para mezcla en caliente, con este resultado podríamos decir que la mezcla llegaría a tener un comportamiento rígido; pero, cabe mencionar que los parámetros para mezclas en caliente suelen ser más exigentes en comparación con los ² de mezclas en frío.

Aparte de la estabilidad y el flujo existen otras propiedades mecánicas como el módulo resiliente, fatiga, etc; las cuales no fueron objeto de esta investigación, por lo que agregarle fibra de vidrio a la mezcla no garantiza que estas propiedades den resultados positivos como con la estabilidad y flujo, se tendrían que hacer otros estudios para comprobarlo y tener una perspectiva más completa del uso de la fibra de vidrio como aditivo.

32
CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

- Se acepta la hipótesis planteada debido a que los resultados de la investigación demuestran que al incorporar fibra de vidrio mejoran las propiedades mecánicas (estabilidad y flujo) de la mezcla asfáltica en frío para la zona de estudio.
- El diseño de la mezcla asfáltica en frío convencional, del tipo densa y con emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta, tuvo las siguientes proporciones: 48.0% de grava, 52.0% de arena, 7.4% de emulsión asfáltica y 3.6% de agua.
- Se planteó probar la sustitución de diferentes porcentajes de fibra de vidrio por una parte del agregado fino en la mezcla asfáltica en frío convencional, al final se usó 0.1%, 0.2% y 0.3% de fibra de vidrio.
- La incorporación de 0.1% de fibra de vidrio, al sustituirla por parte del agregado fino, fue la que dio mejores resultados en la mezcla modificada. Para un mismo flujo de 4.25 mm, la estabilidad de la mezcla convencional fue de 1613.3 kg y de la mezcla modificada con fibra fue de 1750.7 kg, esto representa un aumento del 8.5% en el valor de la estabilidad al incorporar fibra de vidrio.

5.2. Recomendaciones

- Esta investigación solo se enfocó en estudiar ¹ la estabilidad y flujo como propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en frío, pero existen más que pueden ser objeto de estudio para futuras investigaciones, con eso se podría tener una visión más completa del uso de fibra de vidrio como aditivo en este tipo de mezcla asfáltica.
- Para los nuevos investigadores, probar diferentes tipos de agregados, de diferentes canteras, para realizar el diseño de mezcla y combinarlo con fibra de vidrio, agregados diferentes pueden interactuar de diferente manera con la emulsión asfáltica y con la fibra dando otro tipo de resultados.
- Para futuras investigaciones, probar más porcentajes de fibra de vidrio con el mayor número de briquetas posible para reducir el error; también, considerar agregar la fibra en diferentes tamaños, la fibra comercial generalmente viene cortada en hilos de 5 cm, se puede probar tamaños más cortos o más largos y ver cómo reacciona con la mezcla.
- ⁷⁸ La mezcla asfáltica en frío con emulsión es un material muy infravalorado y poco investigado en nuestro país, por lo que merece la pena estudiarlo agregándole otro tipo de fibras u otros materiales que pueden darle un mejor desempeño, así como, explorar la incorporación de agregados o aditivos reciclados, con el fin de optimizar costos y promover prácticas sostenibles en la construcción vial.

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

6. Referencias Bibliográficas

- American Society for Testing and Materials. (2022). *Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures* (ASTM D6927-22) [Método de prueba estándar para estabilidad Marshall y flujo de mezclas de asfalto]. <https://store.astm.org/d6927-22.html>
- Aranguri Linares, J. J. y Valverde Villacorta, H. A. (2018). *Análisis comparativo del comportamiento estructural de mezclas asfálticas en caliente y mezclas asfálticas emulsionadas en los pavimentos* [Tesis de pregrado, Universidad Privada Antenor Orrego]. Repositorio Institucional de la Universidad Privada Antenor Orrego.
- Asphalt Institute. (1986). *Manual del asfalto* (Trad. M. Velázquez). Urmo Ediciones.
- Asphalt Institute. (1997). *Asphalt Cold Mix Manual (MS-14)* [Manual de mezcla asfáltica en frío (MS-14)]. <https://www.asphaltinstitute.org/>
- Asphalt Institute. (2008). *Basic Asphalt Emulsion Manual (MS-19)* [Manual Básico de Emulsión Asfáltica (MS-19)]. <https://www.asphaltinstitute.org/>
- Bonilla Bravo, E. N. (2024). *Análisis del comportamiento del hormigón asfáltico mezclado con fibra de vidrio, utilizando el ensayo Marshall* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio Institucional de la Universidad Técnica de Ambato.
- Bulla García, Y. A., Rodríguez Álvarez, A. T. y Higuera Sandoval, C. H. (2017). Análisis comparativo de una mezcla densa en caliente MDC-19 y una mezcla densa en frío MDF-19. *Ingenio Magno*, 8(1), 20-42.
- Campbell, D. T. y Stanley, J. C. (1966). *Experimental and quasi-experimental designs for research* [Diseños experimentales y cuasi-experimentales para la investigación]. Rand McNally & Company.

- Del Río Merino, M. (1999). *Elaboración y aplicaciones constructivas de paneles prefabricados de escayola aligerada y reforzada con fibras de vidrio E y otros aditivos* [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica De Madrid]. Archivo Digital UPM.
- Eguino Lima, J. L. y Miranda Choque, I. (2023). *Diseño de micropavimento con fibra de vidrio para mantenimiento vial* [Proyecto de grado, Universidad Mayor de San Andrés]. Repositorio Institucional de la Universidad Mayor de San Andrés.
- Gallardo de Parada, Y. y Moreno Garzón, A. (1999). Módulo 3: Recolección de la información. En Instituto Colombiano para el Fomento de la Educación Superior (Ed.), *Serie: Aprender a investigar*. (3ª ed.). Arfo Editores.
- García Jibaja, D. E. (2023). *Propiedades físicas y mecánicas en mezclas de asfalto en caliente incorporando fibra de vidrio, Trujillo* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional de la Universidad César Vallejo.
- Gavino Galdós, H. (2022). *Resistencia mecánica de mezcla asfálticas en frío con adición de poliestireno expandido, Huancayo, Junín, 2021* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana Los Andes]. Repositorio Institucional de la Universidad Peruana Los Andes.
- Gonzales, P. (27 de setiembre de 2023). *¿Qué es mejor asfalto en caliente o el asfalto en frío?*. Avanasfalto. <https://www.avanasfalto.pe/post/qu%C3%A9-es-mejor-asfalto-en-caliente-o-el-asfalto-en-fr%C3%ADo>
- Guevara Palma, M., Méndez Delgado, H. y Pimentel Gómez, J. (2010). *Diseño de mezclas asfálticas densas en frío basado en el Método Marshall Modificado de la Universidad De Illinois* [Tesis de pregrado, Universidad de El Salvador]. Repositorio Institucional de la Universidad de El Salvador.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado C. y Baptista Lucio, M. (2014). *Metodología de la investigación*. (6ª ed.). McGraw-Hill.

- Huamán Quispe, A. (2015). *Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibra de vidrio* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Cajamarca.
- Irving Valladares, J. L. (2010). *Evaluación de composites de cemento-fibra de vidrio* [Trabajo de Grado, Universidad de San Carlos de Guatemala].
http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3145_C.pdf
- Lara Vasconez, F. S. y Suquillo Hoyos, A. B. (2024). *Estudio de una mezcla asfáltica en frío con material reciclado e incorporando fibras de vidrio para actividades de mantenimiento vial en el Distrito Metropolitano de Quito* [Trabajo de titulación, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana.
- López Prieto, C. P. (2012). *Estado de la práctica de las mezclas asfálticas en frío para capas estructurales usando materiales nuevos* [Tesis de maestría, Universidad de los Andes]. Repositorio Institucional de la Universidad de los Andes.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2015). *Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción*.
https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_10%20EG%202013.pdf
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2017). *Manual de ensayo de materiales*.
<https://www.gob.pe/institucion/mtc/normas-legales/4442276-18-2016-mtc-14>
- Namaa, M., Qasim, Z. y Ibrahim, K. (2021). *Study of the Properties of Open Graded Asphalt Mixtures With the addition of SBS* [Estudio de las propiedades de mezclas asfálticas de granulometría abierta con adición de SBS].
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1090/1/012002/meta>

- Paitán Iparraguirre, M. I. y Rojas Quijano, A. A. (2023). *Influencia del polvo de sílice en la mezcla asfáltica en frío de la cantera Pachacayo y San Lorenzo Huancayo-2022* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional de la Universidad César Vallejo.
- Ponce Quispe, A. J. (2021). *Aplicación de fibras de vidrio en el diseño de mezcla asfáltica en caliente para rehabilitar pavimentos flexibles en Juliaca, 2021* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional de la Universidad César Vallejo.
- Quimbita Loma, E. G. (2023). *Evaluación del efecto de la adición de caucho vulcanizado triturado en mezclas asfálticas en frío* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio Institucional de la Universidad Técnica de Ambato.
- Ramos García, B. L. y Muñoz Pérez, C. I. (2013). *Propuesta de diseño de mezcla asfáltica en frío de graduación densa como alternativa para el mantenimiento de pavimentos flexibles* [Tesis de pregrado, Universidad Centroamericana].
<https://es.scribd.com/document/657778851/Diseno-de-Mezclas-Asfalticas-en-Frio>
- Rodríguez Cardozo, J. X. y Sandoval Chaparro, M. E. (2022). *Estudio de una mezcla asfáltica fría con adición de cemento* [Trabajo de Grado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional de la Universidad Católica de Colombia.
- Rodríguez Oré, E. (2023). *Evaluación En Fibras De Polietileno Botellas De Plástico Reciclado En La Estabilidad Y Fluencia En Mezcla Asfáltica En Frío – 2022* [Trabajo de Grado, Universidad Peruana Los Andes]. Repositorio Institucional de la Universidad Peruana Los Andes.

“Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla
asfáltica en frío incorporando fibra de vidrio – Sihuas, Áncash
2024”

INFORME DE ORIGINALIDAD

23%	22%	4%	10%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net	8%
	Fuente de Internet	
2	es.scribd.com	1%
	Fuente de Internet	
3	repositorio.uns.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
4	repositorio.uncp.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
5	repositorio.upla.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
6	repositorio.udh.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
7	repositorio.ucv.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
8	pt.scribd.com	1%
	Fuente de Internet	
9	Submitted to Universidad Jose Carlos Mariategui	<1%
	Trabajo del estudiante	
10	www.dspace.uce.edu.ec	<1%
	Fuente de Internet	

11	qdoc.tips Fuente de Internet	<1 %
12	repositorio.unj.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
13	repositorio.unc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
14	Submitted to Universidad Anahuac México Sur Trabajo del estudiante	<1 %
15	repositorio.uandina.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
16	Submitted to Universidad Continental Trabajo del estudiante	<1 %
17	dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
18	Submitted to Universidad de Huanuco Trabajo del estudiante	<1 %
19	repositorio.uniandes.edu.co Fuente de Internet	<1 %
20	www.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
21	www.repositorio.usac.edu.gt Fuente de Internet	<1 %
22	Submitted to Universidad Privada del Norte Trabajo del estudiante	<1 %
23	repositorio.uta.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
24	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1 %

25	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
26	ri.ues.edu.sv Fuente de Internet	<1 %
27	es.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
28	Submitted to uncedu Trabajo del estudiante	<1 %
29	Submitted to Universidad Ricardo Palma Trabajo del estudiante	<1 %
30	Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru Trabajo del estudiante	<1 %
31	oa.upm.es Fuente de Internet	<1 %
32	repositorio.upagu.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
33	Submitted to Universidad Católica Boliviana "San Pablo" Trabajo del estudiante	<1 %
34	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	<1 %
35	repositorio.ug.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
36	repositorio.urp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
37	www.yumpu.com Fuente de Internet	<1 %
38	repositorio.utea.edu.pe	

Fuente de Internet

<1 %

39 polux.unipiloto.edu.co:8080

Fuente de Internet

<1 %

40 repositorio.unheval.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

41 idoc.pub

Fuente de Internet

<1 %

42 repositorio.umsa.bo

Fuente de Internet

<1 %

43 Submitted to Pontificia Universidad Catolica del Peru

Trabajo del estudiante

<1 %

44 repositorio.unsch.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

45 documentop.com

Fuente de Internet

<1 %

46 repositorio.continental.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

47 Submitted to Universidad de Guayaquil

Trabajo del estudiante

<1 %

48 repositorio.uladech.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

49 Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez

Trabajo del estudiante

<1 %

50 dspace.ucuenca.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

51 doku.pub

Fuente de Internet

<1 %

52	pt.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
53	1library.co Fuente de Internet	<1 %
54	alicia.concytec.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
55	congresopsicologiacolombia.com Fuente de Internet	<1 %
56	upc.aws.openrepository.com Fuente de Internet	<1 %
57	Submitted to Universidad Pontificia Bolivariana Trabajo del estudiante	<1 %
58	repositorio.uniscjsa.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
59	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	<1 %
60	Submitted to Universidad Militar Nueva Granada Trabajo del estudiante	<1 %
61	red.uao.edu.co Fuente de Internet	<1 %
62	repositorio.autonomadeica.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
63	Submitted to Universidad San Francisco de Quito Trabajo del estudiante	<1 %
64	core.ac.uk Fuente de Internet	<1 %

65	dspace.ucacue.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
66	mail.polodelconocimiento.com Fuente de Internet	<1 %
67	repositorio.ujcm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
68	www.revespcardiol.org Fuente de Internet	<1 %
69	Submitted to Universidad San Ignacio de Loyola Trabajo del estudiante	<1 %
70	repositorio.uceva.edu.co:8080 Fuente de Internet	<1 %
71	repositorio.upao.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
72	www.aprendosexo.com Fuente de Internet	<1 %
73	3lib.net Fuente de Internet	<1 %
74	LAURA LAGUNA CRUAÑES. "Reformulación de galletas de masa corta: cambios en reología, textura y propiedades sensoriales", Universitat Politecnica de Valencia, 2013 Publicación	<1 %
75	docplayer.es Fuente de Internet	<1 %
76	ekonomi.ikipgribojonegoro.ac.id Fuente de Internet	<1 %
77	exactitudeconsultancy.com Fuente de Internet	

<1 %

78

repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080

Fuente de Internet

<1 %

79

repositorio.uss.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

80

www.ordenjuridico.gob.mx

Fuente de Internet

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias

< 10 words

Excluir bibliografía

Activo