

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL: INGENIERÍA CIVIL



Tesis

Influencia de la incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% en las propiedades físicas-mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente - Abancay, 2025

Asesor:

Ph.D Vásquez Ramírez, Abbon Alex

Autores:

Pedraza Pampañaupa, Rusmilda

Valenzuela Hidalgo, Marilia Alessandra

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil

Abancay – Apurímac – Perú

2025



Universidad Tecnológica de los Andes

Transformando vidas

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

Acta N°: 079

En la ciudad de Abancay, a los dieciocho días del mes de **diciembre del 2025**, siendo las **8:30 am** horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° **1052-2025- EPIC-FI-UTEA-SA** de fecha **10 de diciembre del 2025**, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería:

Presidente :	Mag. Huanca Astoquillca, Luis
Dictaminante :	Dr. Alarcón Camacho, Erick
Replicante :	Dra. Vera Teves, Rosa Marina

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

Tesis Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

Influencia de la incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% en las propiedades físicas-mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente – Abancay, 2025

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br: Pedraza Pampañaupa, Rusmilda

Br. Valenzuela Hidalgo, Marilia Alessandra

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

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

Por: Mayoría
(Unanimidad o Mayoría) (*)

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
Pedraza Pampañaupa, Rusmilda	Aprobada
Valenzuela Hidalgo, Marilia Alessandra	Aprobada

Siendo las **10:40am** horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Mag. Huanca Astoquillca, Luis

Dictaminante: Dr. Alarcón Camacho, Erick

Replicante: Dra. Vera Teves, Rosa Marina

(.....)
(.....)
(.....)




20% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Fuentes principales

- 15%  Fuentes de Internet
- 5%  Publicaciones
- 17%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

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

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

Metadatos complementarios

Datos de los autores		
Apellidos y nombres	:	Pedraza Pampañuapa, Rusmilda Valenzuela Hidalgo, Marilia Alessandra
Tipo de documento de identidad	:	DNI
Número de Documento de identidad	:	75474103 71057240
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0002-5163-3046 https://orcid.org/0009-0007-6378-0197
Datos del asesor		
Apellidos y nombres	:	Ph.D Vásquez Ramírez, Abbon Alex
Tipo de documento de identidad	:	DNI
Número de documento de identidad	:	06532658
URL ORCID	:	https://orcid.org/0000-0001-7299-5367
Datos de la investigación		
Facultad	:	Ingeniería
Escuela Profesional	:	Ingeniería Civil
Línea de la investigación	:	Gestión de la infraestructura para el desarrollo sostenible
Rango de años en que se realizó la investigación	:	Agosto 2024 – Julio 2025
Fuente de financiamiento	:	Autofinanciado
Porcentaje de similitud	:	20 %
URL de OCDE	:	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.00

Dedicatoria

Entrego este trabajo a Dios, fuente de mi inspiración y apoyo en cada etapa de este camino. En los tiempos más duros, él me sostuvo con su amor y me enseñó que todo es posible con fe y perseverancia. A mis padres, Aurelio y Felicitas, por su amor de siempre, su apoyo en todo momento y por mostrarme con su vida el valor del esfuerzo.

A mis hermanos, Yaneth y Josué, por su cariño y compañía incondicional, por ser parte fundamental de este logro.

A mis abuelitos maternos, Víctor y Laureana, por su amor y ejemplo de esfuerzo y humildad. Y a mis abuelitos paternos, Cirilo, por su alegría que siempre recuerdo con cariño, también a mi abuelita Mercedes, quienes me acompañan desde el cielo y sé que se sienten orgullosos de mis pasos.

Rusmilda Pedraza Pampañaupa.

A Dios, por ser la guía en este recorrido y la fuerza en los momentos de dificultad.

A mi madre Marla, pilar inquebrantable de mi vida.

Su amor infinito y su esfuerzo incesante son la fuerza que me trajo hasta aquí.

A mi padre Iván, por enseñarme que lo verdaderamente valioso no se compra, se vive.

A mi hermana Tesalia, por ser mi ejemplo, mi impulso constante y mi mejor amiga.

A mi hermano Alessandro, mi estrella en el cielo, que ilumina cada paso que doy.

A mi tío Efraín, por brindarme afecto, incluso en medio de sus propias batallas.

Y a mis fieles compañeros de cuatro patas:

Beethoven, Braulio, Wanda, Yaya, Asrael, Molly, Lulu, Barbie, Queka, Kitty y Chelsea, por llenar mis días de amor, compañía y alegría.

Este logro lleva un pedacito de cada uno de ustedes.

Marilia Alessandra Valenzuela Hidalgo.

Agradecimientos

Quiero empezar agradeciendo a Dios, por su amor y por darme la fuerza necesaria en los momentos complicados. Sé que, sin su presencia y apoyo, no habría llegado hasta aquí.

Con especial cariño, a mis padres Aurelio y Felicitas, por acompañarme y motivarme siempre, por sus consejos llenos de sabiduría y por ser mi mayor ejemplo de esfuerzo y dedicación. Gracias por su amor incondicional, su comprensión y por sostenerme en cada paso.

A mis hermanos, Yaneth y Josué, por acompañarme siempre, por su cariño y por darme ánimo cuando más lo necesitaba. Su presencia ha sido muy importante para mí durante este proceso.

Y de manera especial, agradezco al ingeniero Abbon Alex Vásquez Ramírez, por su orientación, paciencia y tiempo brindado como asesor de tesis. Su apoyo fue clave para la culminación de esta tesis.

Rusmilda Pedraza Pampañaupa.

A Dios, por darme fuerza en los momentos difíciles y recordarme que todo llega a su tiempo.

A mi madre Marla, por ser mi soporte, mi guía y el mayor ejemplo de entrega.

A mi padre Iván, por su respaldo constante y la confianza plena depositada en mí.

A mi hermana Tesalia, por impulsarme con su cariño y celebrar mis logros como suyos.

A mi hermano Alessandro, cuya memoria vive en mí y me da fuerzas cada día.

A mis compañeros de vida peludos: Beethoven, Braulio, Wanda, Yaya, Asrael, Molly, Lulu, Barbie, Queka, Kitty y Chelsea, por su compañía fiel y amor incondicional.

Y al ingeniero Abbon Alex Vásquez Ramírez, por su orientación, dedicación y paciencia durante el desarrollo de esta tesis.

Este logro también es de todos los que nunca me dejaron sola.

Marilia Alessandra Valenzuela Hidalgo.

Resumen

El principal objetivo de esta tesis fue de analizar la influencia del efecto de la incorporación de polvo de hierro fundido, en proporciones del 17 %, 20 % y 23 %, sobre las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas elaboradas en caliente. El polvo de hierro fundido, obtenido como residuo del corte de metales, se utilizó como aditivo, sustituyendo parcialmente al agregado fino, con el propósito de optimizar el comportamiento estructural de la mezcla.

La formulación de la mezcla se llevó a cabo utilizando el método Marshall, según lo estipulado en la norma E 504 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). Se examinaron diversas propiedades como los parámetros volumétricos, la resistencia a la deformación, la resistencia a la tracción indirecta, la resistencia al daño inducido por humedad y la resistencia al desgaste, aplicando las normas técnicas vigentes. Para la recopilación de información se utilizaron fichas específicas y se realizó con una metodología de investigación descriptiva-correlacional, con un nivel explicativo y un diseño experimental.

Los resultados obtenidos demostraron que las mezclas modificadas con 17 % y 20 % de polvo de hierro fundido se mantuvieron dentro de los rangos establecidos por las normativas vigentes, mostrando mejoras significativas en sus propiedades físicas y mecánicas. Por el contrario, la dosificación del 23 % no cumplió con todos los parámetros exigidos. Se concluyó que el uso del polvo de hierro fundido, en proporciones adecuadas, representa una alternativa viable y sostenible para optimizar las propiedades de las mezclas asfálticas elaboradas en caliente.

Palabras claves: polvo de hierro fundido, mezcla asfáltica en caliente, propiedades físicas, propiedades mecánicas.

Abstract

The main objective of this thesis was to analyze the effect of incorporating cast iron powder, in proportions of 17%, 20%, and 23%, on the physical and mechanical properties of hot mix asphalt. The cast iron powder, obtained as a by-product of metal cutting, was used as an additive, partially replacing the fine aggregate, with the purpose of optimizing the structural performance of the mixture.

The mix design was carried out using the Marshall method, as stipulated in Standard E 504 of the Ministry of Transport and Communications (MTC). Various properties were evaluated, including volumetric parameters, resistance to deformation, indirect tensile strength, resistance to moisture-induced damage, and abrasion resistance, in accordance with current technical standards. Data collection was conducted using specific data sheets and followed a descriptive-correlational research methodology, with an explanatory level and an experimental design.

The findings showed that the mixtures modified with 17% and 20% cast iron powder remained within the ranges established by current standards, exhibiting significant improvements in their physical-mechanical properties. In contrast, the 23% dosage did not meet all the required parameters. It is concluded that the use of cast iron powder, in suitable proportions, represents a viable and sustainable alternative to optimize the properties of hot mix asphalt.

Key words: cast iron powder, hot mix asphalt, physical properties, mechanical properties.

ÍNDICE

Portada	i
Acta de sustentación	ii
Reporte de similitud	iii
Metadatos complementarios	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	x
Índice	xi
Índice de tablas	xiv
Índice de figuras	xiii
Índice de anexos	xx
I. Introducción	21
II. Planteamiento del problema	24
2.1. Descripción y formulación del problema	24
1.1.1 Problema general.....	25
1.1.2 Problemas específicos	26
1.2 Objetivos	26
1.2.1 Objetivo general.....	26
1.2.2 Objetivos específicos	26

1.3	Justificación e importancia	27
1.4	Hipótesis.....	28
1.4.1	Hipótesis general	28
1.4.2	Hipótesis específicas	28
2.5.	Variables.....	28
2.5.1	Variable 1 (independiente).....	28
2.5.2	Variable 2 (dependiente).....	29
III.	Marco teórico.....	32
3.1.	Antecedentes.....	32
3.1.1	A nivel internacional	32
3.1.2	A nivel nacional	33
3.1.3	A nivel local	39
3.2.	Bases teóricas.....	39
3.2.1	Polvo de hierro fundido	39
3.2.2	Propiedades físicas de la MAC	41
3.2.3	Propiedades mecánicas de la MAC	44
3.3	Definición de términos.....	65
IV.	Metodología.....	68
4.1.	Tipo y nivel de investigación.....	68
4.2.	Ámbito temporal y espacial.....	69
4.3.	Población y muestra	69
4.4.	Instrumentos	73
4.5.	Procedimientos	73
4.6.	Análisis de datos.....	74
4.7.	Consideraciones éticas	74

V. Resultados y discusión	76
5.1. Resultados.....	76
5.1.1. Recolección de datos.....	76
5.1.2 Procesamientos de datos.....	95
5.2 Discusión.....	113
5.2.1 Discusión del objetivo general a partir de los resultados	113
5.2.2 Discusión de los objetivos específicos a partir de los resultados.....	113
5.2.3 Prueba de hipótesis	120
VI. Conclusiones.....	153
6.1. Conclusión del objetivo general	153
6.2. Conclusiones de los objetivos específicos.....	153
6.2.1. Conclusión del objetivo específico 1.....	153
6.2.2. Conclusión del objetivo específico 2.....	153
6.2.3. Conclusión del objetivo específico 3.....	154
6.2.4. Conclusión del objetivo específico 4.....	154
6.2.5. Conclusión del objetivo específico 5.....	154
VII. Recomendaciones	155
VIII. Referencias.....	157
IX. Anexos.....	164

Índice de tablas

Tabla 1	Operacionalización de variables.....	31
Tabla 2	Número de probetas utilizadas con el fin de determinar el contenido óptimo de asfalto (grupo 1)	72
Tabla 3	Número de probetas utilizadas en los ensayos (grupo 2).....	73
Tabla 4	Granulometría del polvo de hierro fundido.....	77
Tabla 5	Características técnicas del asfalto tipo PEN 60/70.....	78
Tabla 6	Características técnicas del agregado grueso.....	80
Tabla 7	Distribución granulométrica del agregado grueso con tamaño máximo de 3/4".....	81
Tabla 8	Criterios de aceptación de las características del agregado grueso.....	82
Tabla 9	Características del agregado fino.....	84
Tabla 10	Distribución granulométrica del agregado fino.....	85
Tabla 11	Criterios de aceptación de las características del agregado fino.....	86
Tabla 12	Distribución de agregados basado en la MAC - 1.	87
Tabla 13	Combinación proyectada según la clasificación de MAC - 1.....	88
Tabla 14	Dosificación empleada en porcentajes para el diseño convencional.....	90
Tabla 15	Resultados obtenidos del diseño de la mezcla asfáltica convencional mediante el método Marshall.....	90
Tabla 16	Parámetros y valores obtenidos del ensayo Marshall en la MAC convencional.....	93
Tabla 17	Dosificación aplicada para la preparación de las probetas modificadas con polvo de hierro fundido.....	94
Tabla 18	Valores determinados mediante el ensayo Marshall (PU, VA y VMA) – sin incorporación de polvo de hierro fundido (patrón).....	96
Tabla 19	Valores determinados mediante el ensayo Marshall (PU, VA y VMA) – con incorporación de 17% de polvo de hierro fundido.....	97
Tabla 20	Valores determinados mediante el ensayo Marshall (PU, VA y VMA) – con incorporación de 20% de polvo de hierro fundido.....	98

Tabla 21 Valores determinados mediante el ensayo Marshall (PU, VA y VMA) – con incorporación de 23% de polvo de hierro fundido.....	98
Tabla 22 Resumen de los valores determinados mediante el ensayo Marshall (PU, VA y VMA) y sus variaciones	99
Tabla 23 Resultados obtenidos del ensayo Marshall (estabilidad, flujo y rigidez) – sin incorporación de polvo hierro fundido (patrón)	102
Tabla 24 Resultados obtenidos del ensayo Marshall (estabilidad, flujo y rigidez) – con incorporación del 17% de polvo de hierro fundido.....	103
Tabla 25 Resultados obtenidos del ensayo Marshall (estabilidad, flujo y rigidez) – con incorporación de 20% de polvo de hierro fundido.....	104
Tabla 26 Resultados obtenidos del ensayo Marshall (estabilidad, flujo y rigidez) – con incorporación del 23% de polvo de hierro fundido.....	105
Tabla 27 Resumen de resultados obtenidos del ensayo Marshall (estabilidad, flujo y rigidez) y sus variaciones	106
Tabla 28 Resumen de valores obtenidos mediante el ensayo Lottman (ITS).....	109
Tabla 29 Resumen de resultados obtenidos del ensayo Lottman (TSR) y sus variaciones.....	111
Tabla 30 Resumen de resultados obtenidos del ensayo Cántabro (desgaste) y sus variaciones.....	112
Tabla 31 Resultados del peso PU (gr/cm ³).....	122
Tabla 32 Prueba de Shapiro Wilk aplicado al PU	122
Tabla 33 Estadísticos de homogeneidad de varianzas.....	123
Tabla 34 Estadísticos descriptivos del PU.....	123
Tabla 35 Resultados del ANOVA aplicado al PU.....	124
Tabla 36 Resultados de la prueba Tukey aplicado al PU	124
Tabla 37 Resultados de los VA (%)	125
Tabla 38 Prueba de Shapiro-Wilk aplicado a los VA.....	125
Tabla 39 Estadísticos de homogeneidad de varianzas.....	126
Tabla 40 Estadísticos descriptivos de los VA.....	126

Tabla 41	Resultados del ANOVA aplicado a los VA.....	127
Tabla 42	Resultados de la prueba Tukey aplicado a los VA..	127
Tabla 43	Resultados de VMA (%)	128
Tabla 44	Prueba de Shapiro-Wilk aplicado a los VMA.....	128
Tabla 45	Estadísticos de homogeneidad de varianzas.....	129
Tabla 46	Estadísticos descriptivos de los VMA.....	130
Tabla 47	Resultados del ANOVA aplicado a los VMA.....	130
Tabla 48	Resultados de la prueba Tukey aplicado a los VMA.....	131
Tabla 49	Resultados de la estabilidad (kg)..	132
Tabla 50	Prueba de Shapiro-Wilk aplicado a la estabilidad.....	133
Tabla 51	Estadísticos de homogeneidad de varianzas.....	133
Tabla 52	Estadísticos descriptivos de la estabilidad.....	134
Tabla 53	Resultados del ANOVA para estabilidad.....	134
Tabla 54	Resultados de la prueba Tukey aplicado a la estabilidad.....	135
Tabla 55	Resultados del flujo (mm)	136
Tabla 56	Prueba Shapiro-Wilk aplicado al flujo.....	136
Tabla 57	Estadísticos de homogeneidad de varianzas.....	137
Tabla 58	Estadísticos descriptivos del flujo.....	137
Tabla 59	Resultados del ANOVA aplicado al flujo.....	137
Tabla 60	Resultados de la prueba Tukey aplicado al flujo.....	138
Tabla 61	Resultados de la ITS-húmedo (kPa)	140
Tabla 62	Prueba de Shapiro-Wilk aplicado a la ITS-húmedo.....	140
Tabla 63	Estadísticos de homogeneidad de varianzas.....	141
Tabla 64	Estadísticos descriptivos de la ITS-húmedo.....	141
Tabla 65	Resultados del ANOVA para la ITS-húmedo.....	142
Tabla 66	Prueba de Tukey aplicado a la ITS-húmedo.....	142

Tabla 67	Resultados de la ITS-seco.....	143
Tabla 68	Prueba de Shapiro-Wilk para la ITS-seco.....	143
Tabla 69	Estadísticos de homogeneidad de varianza.....	144
Tabla 70	Estadísticos descriptivos de la ITS-seco.....	145
Tabla 71	Resultados del ANOVA aplicado a la ITS-seco.....	145
Tabla 72	Resultados de la prueba Tukey aplicado a la ITS-seco.....	146
Tabla 73	Resultados de la TSR (%)	147
Tabla 74	Prueba de Shapiro-Wilk aplicado a la TSR.....	148
Tabla 75	Prueba de Kruskal- Wallis aplicado a la TSR.....	148
Tabla 76	Resultados de la prueba de Dunn con valor p ajustado.....	149
Tabla 77	Resultados de la resistencia al desgaste (%).....	150
Tabla 78	Prueba de Shapiro Wilk para la resistencia al desgaste.....	151
Tabla 79	Estadísticos de homogeneidad de varianzas.....	151
Tabla 80	Estadísticos descriptivos de la resistencia al desgaste.....	152
Tabla 81	Resultados del ANOVA para la resistencia al desgaste.....	152
Tabla 82	Prueba de Tukey aplicado a la resistencia al desgaste.....	153

Índice de figuras

Figura 1	Polvo de hierro fundido.....	40
Figura 2	Distribución granulométrica para MAC.....	41
Figura 3	Representación de los VMA en una muestra de mezcla asfáltica	44
Figura 4	Cantidad mínima de VMA.....	44
Figura 5	Coeficientes de corrección para ensayos de estabilidad.....	46
Figura 6	Rotura de una muestra durante el ensayo de tracción indirecta	47
Figura 7	Criterios de aceptación para los agregados gruesos de la MAC	49
Figura 8	Requisitos mínimos para la aprobación del agregado grueso de la MAC	49
Figura 9	Parámetros de calidad aplicables a los agregados gruesos utilizados en la MAC	50
Figura 10	Parámetro mínimo del agregado grueso en la MAC	50
Figura 11	Criterios de aceptación para partículas con caras fracturadas en la MAC	51
Figura 12	Cantidad mínima necesaria del agregado grueso para muestreo	51
Figura 13	Relación de esferas necesarias para la prueba de abrasión.....	54
Figura 14	Representación gráfica de un agregado con una cara fracturada	55
Figura 15	Caras fracturadas	55
Figura 16	Caras no fracturadas	56
Figura 17	Instrumento para medir espesores	57
Figura 18	Instrumento para medir longitudes.....	57
Figura 19	Criterios de aceptación para los agregados finos de la MAC	59
Figura 20	Parámetros de calidad aplicables a los agregados finos utilizados en la MAC....	59
Figura 21	Criterios exigidos para la MAC.....	64
Figura 22	Granulometría del agregado grueso	80
Figura 23	Granulometría del agregado fino	84
Figura 24	Granulometría de combinación de agregados	87

Figura 25 Comportamiento del PU en función al contenido de asfalto.....	90
Figura 26 Comportamiento de los VA en relación con el porcentaje de asfalto.....	90
Figura 27 Variación del VMA respecto al contenido de asfalto.	90
Figura 28 Comportamiento de los VFA según la dosificación de asfalto.....	91
Figura 29 Variación de la estabilidad según el contenido de asfalto..	91
Figura 30 Comportamiento del flujo en función del contenido de asfalto	91
Figura 31 Variación de la rigidez respecto al contenido de asfalto.....	92
Figura 32 Comparación del PU en MAC con y sin incorporación de polvo de hierro fundido	99
Figura 33 Comparación de VA en MAC con y sin incorporación de polvo de hierro fundido	99
Figura 34 Comparación de los valores de VMA entre mezclas convencionales y modificadas con polvo de hierro fundido	100
Figura 35 Comparación de la estabilidad en MAC con y sin incorporación de polvo de hierro fundido	105
Figura 36 Comparación del flujo en MAC con y sin incorporación de polvo de hierro fundido	106
Figura 37 Comparación de la rigidez en MAC con y sin incorporación de polvo de hierro fundido	106
Figura 38 Comparación de la ITS en condiciones húmedas y secas	108
Figura 39 Comparación de la capacidad de la mezcla en la resistencia al daño inducido por humedad (TSR).....	110
Figura 40 Análisis comparativo de la resistencia al desgaste de las mezclas.....	112

Índice de anexos

Anexo 1: Matriz de consistencia.....	164
Anexo 2: Matriz de operacionalización de variables.....	166
Anexo 3: Certificación de calidad del asfalto PEN 60/70.....	169
Anexo 4: Reportes de los ensayos previos en el agregado grueso.....	171
Anexo 5: Reportes de los ensayos previos en el agregado fino.....	211
Anexo 6: Reportes del diseño óptimo de la mezcla.....	247
Anexo 7: Reportes del ensayo Marshall.....	272
Anexo 8: Reportes del ensayo Lottman.....	299
Anexo 9: Reportes del ensayo Cántabro.....	339

I. Introducción

El presente trabajo de tesis tuvo como finalidad evaluar el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente (MAC) modificadas mediante la adición de polvo de hierro fundido, con el fin de analizar el efecto de este aditivo sobre las propiedades fundamentales del pavimento. Esta iniciativa surgió ante la necesidad de mejorar la calidad y durabilidad de las mezclas asfálticas frente al tránsito constante, condiciones climáticas adversas, además de la pérdida progresiva de propiedades mecánicas, reflejada en fisuramientos, ahuellamientos o envejecimiento prematuro.

En esta tesis se propuso utilizar polvo de hierro fundido incorporado como reemplazo parcial del agregado fino en la formulación asfáltica. Se buscó analizar como esta modificación influyó en propiedades como los parámetros volumétricos y las resistencias a la deformación, a la tracción indirecta, al daño inducido por humedad y al desgaste.

El diseño experimental se basó en el método Marshall para la fabricación de las probetas, además, se complementó con la aplicación de ensayos estandarizados como el Marshall, Lottman y Cántabro, realizados según las normas técnicas nacionales del MTC y la Norma Técnica Peruana (NTP), así como las internacionales, incluyendo a la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM), a la Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte (AASHTO) y al Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

La muestra estuvo conformada por 69 probetas de mezcla asfáltica PEN 60/70 de forma cilíndrica, tanto convencionales como modificadas. De estas, 21 probetas se utilizaron para determinar el contenido óptimo de asfalto. Las 48 probetas restantes se dividieron en cuatro grupos experimentales. Un grupo sirvió como patrón, sin incorporación de polvo de hierro fundido, mientras que los otros tres grupos experimentales se prepararon con incorporaciones de polvo de hierro fundido en dosificaciones del 17%, 20% y 23% respectivamente.

La tesis se desarrolló aplicando el procedimiento del método Marshall, utilizado tanto al diseño de la mezcla asfáltica como para la elaboración de las probetas. A partir de este

procedimiento, la mezcla tradicional fue modificada mediante la adición de polvo de hierro fundido en distintas dosificaciones.

Posteriormente, las probetas elaboradas fueron evaluadas mediante el ensayo Marshall, Lottman y Cántabro todos ejecutados conforme a las normas técnicas vigentes.

La metodología empleada fue del tipo de investigación descriptiva-correlacional, de nivel explicativo y de diseño experimental. Los valores obtenidos fueron registrados en fichas técnicas específicas para cada ensayo y posteriormente analizados para identificar los efectos del aditivo en las propiedades de la mezcla asfáltica.

En la presente tesis, se tuvo como limitación que los ensayos experimentales no pudieron realizarse en los laboratorios de la universidad debido a la falta de equipamiento especializado. Para mitigar esta dificultad, se establecieron coordinaciones con laboratorios externos, donde se llevaron a cabo los ensayos Marshall, Lottman y Cántabro siguiendo estrictamente los procedimientos normativos. Asimismo, los ensayos preliminares para la caracterización de los agregados se ejecutaron en las instalaciones de la universidad con el fin de asegurar el control de calidad de los materiales. Esta estrategia permitió garantizar la validez y la confiabilidad de los resultados, aunque implicó mayor tiempo y costo logístico debido al traslado de muestras y equipos.

Finalmente, la tesis se estructura de la siguiente manera:

I: Introducción. Se describe el contexto, la problemática de la investigación, los objetivos principales y la razón que justifica el estudio.

II: Planteamiento del problema. Se aborda la necesidad de mejorar las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente a través de la incorporación de polvo de hierro fundido.

III: Marco teórico. Contiene los fundamentos teóricos y científicos relacionados con las variables del estudio.

IV: Metodología. Se detalla el tipo, nivel y diseño de la investigación, junto con las técnicas y herramientas empleadas.

V: Resultado y discusiones. Se presentan los datos obtenidos en el laboratorio y se

analizan los efectos del polvo de hierro fundido en la MAC.

VI. Conclusiones. Se determinó que la incorporación de polvo de hierro fundido en proporciones del 17% y 20% optimiza las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla.

II. Planteamiento del problema

2.1. Descripción y formulación del problema

A nivel internacional, se han impulsado diversas estrategias orientadas a reducir el impacto ambiental de las infraestructuras viales, priorizando medidas que promueven un transporte más sostenible. Estas acciones comprenden la mejora de las carreteras y la incorporación de tecnologías destinadas a disminuir las emisiones y aumentar la eficiencia energética. Dichas iniciativas no solo buscan minimizar el daño ambiental, sino también incrementar la resistencia y durabilidad de las vías (Agencia Europea de Medio Ambiente [AEMA], 2022).

En este marco, el aprovechamiento de residuos industriales, como el polvo de hierro fundido, ha sido reconocido como una alternativa viable en la ejecución de pavimentos. Esta práctica contribuye a la reducción de residuos, fomenta la economía circular y mejora el desempeño físico y mecánico de los pavimentos (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA], 2023). Asimismo, se ha evidenciado que una carretera en mal estado puede incrementar hasta en un 34% el consumo de combustible, reducir en 25% la vida útil de los vehículos y aumentar en 34% la emisión de gases de efecto invernadero, generando impactos ambientales y riesgos para la salud pública (Ecoasfalt, 2023).

En el ámbito nacional, distintos estudios han analizado el uso de aditivos en mezclas asfálticas con el propósito de optimizar su desempeño frente a condiciones adversas. Estos materiales, entre los que se incluyen modificadores del asfalto y componentes alternativos, permiten mejorar la durabilidad, la resistencia al agua y el comportamiento frente al tránsito pesado y a temperaturas extremas. Además, facilitan la incorporación de materiales reciclados y contribuyen a la sostenibilidad, al tiempo que reducen los costos de mantenimiento (Revista Costos, 2023).

Sin embargo, la situación de la infraestructura vial en el Perú continúa siendo crítica. De acuerdo con el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, solo el 17.9% de los más de 180 000 km que conforman el Sistema Nacional de Carreteras se encuentra pavimentado. En el caso de las vías departamentales y vecinales, este porcentaje desciende a 16.5% y 10.5%,

respectivamente (Radio Programas del Perú [RPP], 2024). De manera complementaria, la Cámara de Comercio de Lima señala que aproximadamente el 80% de las carreteras del país presenta un estado deficiente, principalmente como consecuencia del tránsito vehicular que supera la capacidad estructural para la cual fueron diseñadas, lo que genera asentamientos, deformaciones, agrietamientos y envejecimiento prematuro (Humpiri, 2015, como se citó en Maylle y Ávila, 2023).

Esta problemática se acentúa en el ámbito local, donde la región Apurímac registra uno de los porcentajes más bajos de pavimentación de la red vial nacional, con apenas un 0.7% (Sociedad de Comercio Exterior del Perú [COMEXPERÚ], 2020). La deficiente infraestructura vial limita la conectividad territorial y dificulta el acceso a servicios básicos como salud y educación, afectando directamente el desarrollo regional.

Ante este escenario, se identifica que las principales causas del problema vial están relacionadas con la limitada pavimentación, el uso de materiales convencionales con bajo desempeño mecánico y la escasa incorporación de tecnologías sostenibles en el diseño de mezclas asfálticas. Como consecuencia, se produce un deterioro acelerado de los pavimentos, acompañado del incremento de los costos de mantenimiento y rehabilitación, mayores tiempos de viaje, aumento del consumo de combustible y elevadas emisiones contaminantes, lo que impacta negativamente en la seguridad vial y en la calidad de vida de la población. El aporte de esta tesis consiste en proponer una alternativa técnica sostenible que permita mejorar la durabilidad y el desempeño de las estructuras viales, optimizar el uso de recursos y valorizar un residuo industrial. En este contexto, la incorporación del polvo de hierro fundido como aditivo en mezclas asfálticas se plantea como una opción técnica y ambientalmente viable para fortalecer la capacidad estructural de los pavimentos y mitigar los efectos negativos del problema identificado.

1.1.1 Problema general

¿Cuál es la influencia de la incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% en las propiedades físicas-mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente - Abancay, 2025?

1.1.2 Problemas específicos

a. ¿En qué proporción mejora la incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% en los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo Marshall?

b. ¿En qué medida mejora la incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% en la resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo Marshall?

c. ¿En qué forma mejora la incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% en la resistencia a la tracción indirecta de la mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo Lottman?

d. ¿De qué manera mejora la incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% en la resistencia al daño inducido por humedad de la mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo Lottman?

e. ¿Cómo mejora la incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% en la resistencia al desgaste de la mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo Cántabro?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Analizar la influencia de la incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% en las propiedades físicas-mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente - Abancay, 2025.

1.2.2 Objetivos específicos

a. Calcular en que proporción mejora la incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% en los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo Marshall.

b. Determinar en qué medida mejora la incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% en la resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo Marshall.

c. Cuantificar en qué forma mejora la incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% en la resistencia a la tracción indirecta de la mezcla asfáltica en caliente, mediante

el ensayo Lottman.

d. Evaluar de qué manera mejora la incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% en la resistencia al daño inducido por humedad de la mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo Lottman.

e. Examinar como mejora la incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% en la resistencia al desgaste de la mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo Cántabro.

1.3 Justificación e importancia

Justificación teórica: La presente tesis se justifica desde el punto de vista teórico porque contribuye al conocimiento aplicado en la ingeniería de pavimentos, al analizar el comportamiento de las mezclas asfálticas frente al deterioro prematuro que se manifiesta mediante agrietamientos, deformaciones y pérdida de capacidad estructural. Asimismo, el estudio amplía el marco conceptual relacionado con el uso de materiales alternativos y residuos industriales en el diseño de mezclas asfálticas, demostrando su influencia sobre las propiedades físicas y mecánicas del material, dentro de los rangos establecidos por las normas técnicas vigentes.

Justificación práctica: Desde una perspectiva práctica, esta tesis resulta relevante porque propone una alternativa técnica viable para mejorar el desempeño de las mezclas asfálticas en condiciones reales de servicio. La incorporación de polvo de hierro fundido como material de desecho industrial permite reducir el deterioro prematuro del pavimento, lo que contribuye a disminuir los costos de mantenimiento y operación, mejorar la seguridad vial y prolongar la vida útil de las vías, especialmente en zonas donde la infraestructura vial es limitada o presenta deficiencias.

Justificación metodológica: La justificación metodológica radica en que la tesis emplea un enfoque experimental, evaluando de manera controlada la incorporación del polvo de hierro fundido en proporciones del 17% y 20% dentro de la mezcla asfáltica. Este procedimiento permite generar evidencia experimental confiable, validada mediante ensayos físicos y mecánicos, aportando un método replicable que puede ser utilizado como referencia

en futuras investigaciones relacionadas con el uso de materiales reciclados en pavimentos.

Justificación social: Desde el enfoque social, la tesis adquiere relevancia al abordar un problema que genera impactos directos en la población, como la inseguridad vial, el incremento de gastos en transporte y la dificultad de acceso a servicios básicos debido al mal estado de las vías. Además, la reutilización del polvo de hierro fundido contribuye a mitigar el impacto ambiental asociado a la acumulación de residuos industriales no degradables, promoviendo soluciones sostenibles que favorecen el bienestar social y el desarrollo de una infraestructura vial más segura y accesible.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis general

La incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% influye mejorando las propiedades físicas-mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente - Abancay, 2025.

1.4.2 Hipótesis específicas

a. La incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% influye mejorando los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo Marshall.

b. La incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% influye mejorando la resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo Marshall.

c. La incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% influye mejorando la resistencia a la tracción indirecta de la mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo Lottman.

d. La incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% influye mejorando la resistencia al daño inducido por humedad de la mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo Lottman.

e. La incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% influye mejorando la resistencia al desgaste de la mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo Cántabro.

2.5. Variables

2.5.1 Variable 1 (independiente)

Incorporación de polvo de hierro fundido.

2.5.2 Variable 2 (dependiente)

Propiedades físicas-mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente.

Tabla 1*Operacionalización de variables*

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Índices	Métrica	Instrumento
Variable independiente Incorporación de polvo de hierro fundido.	Álvarez y Arciniegas (2017) señalan que el polvo de hierro fundido es un material oscuro y granulado obtenido del corte de hierro, mejora la resistencia a la compresión.	Se incorporará polvo de hierro fundido en distintas dosificaciones a la mezcla asfáltica.	Aditivo polvo de hierro fundido	Dosificaciones	* 17% * 20% * 23%	* %	* Ficha de registro de datos.

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Índices	Métrica	Instrumento
Variable Dependiente Propiedades físicas-mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente	Las propiedades físicas corresponden a las características medibles que se pueden determinar sin alterarla y las propiedades mecánicas son aquellas que describen un comportamiento en respuesta cuando se les aplica una fuerza o carga (Asphalt Institute, 1998).	Para poder obtener las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas se realizarán los ensayos Marshall, Lottman y Cántabro.		* Peso unitario (PU).	* Densidad.	* gr/cm ³	* Ficha de registro de datos.
			* Parámetros volumétricos	* Vacíos de aire (VA)	* Porcentaje de vacíos.	* %	* Ficha de registro de datos.
				* Vacíos en el agregado mineral (VMA).	* Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.	* %	
			* Resistencia a la deformación	* Estabilidad.	* Deformación máxima (fuerza).	* kg	* Ficha de registro de datos.
				* Flujo.	* Deformación máxima (longitud).	* mm	
			* Resistencia a la tracción indirecta (ITS)	* Capacidad estructural	* Resistencia a la fisuración.	* kPa	* Ficha de registro de datos.
			* Resistencia al daño inducido por humedad (TSR)	* Deterioro	* Durabilidad frente al agua.	* %	* Ficha de registro de datos
* Resistencia al desgaste	* Pérdida por abrasión.	* Pérdida de masa.	* %	* Ficha de registro de datos			

Nota. La tabla detalla cómo se definirán y medirán cada una de estas variables, incluyendo definiciones conceptuales y operacionales, indicadores, índices, métricas e instrumentos de medición.

III. Marco teórico

3.1. Antecedentes

3.1.1 A nivel internacional

Morcote (2019), en su tesis denominada "*Análisis del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas incorporando escorias de acero*", planteó como objetivo evaluar el desempeño mecánico de las mezclas asfálticas modificadas con escorias de acero. Empleó la metodología de tipo aplicada, nivel explicativo, diseño experimental y enfoque cuantitativo. La población estuvo compuesta por mezclas asfálticas elaboradas en caliente, tanto alteradas como no alteradas, utilizando escorias de acero. La muestra empleada para este estudio comprendió 92 probetas, de las cuales 36 se utilizaron para determinar la proporción ideal de asfalto en tres porcentajes: 4.5%, 5% y 5.5%, y los 60 restantes se utilizaron para evaluar la densidad, estabilidad, flujo, rigidez y TSR; considerando una mezcla sin reemplazo de escoria de acero y dos con niveles de reemplazo de agregado con escoria de acero: 50% y 100%. Los resultados obtenidos en la mezcla asfáltica patrón mostraron en el TSR un 91.3%, mientras que con 50% un 90.6% y al 100% un TSR del 89.9%. Finalmente, concluyó que la incorporación de escoria de acero redujo los valores del TSR; sin embargo, estos permanecieron alineados con los valores determinados por las normas.

Polania (2021), en su tesis titulada "*Utilización de desechos industriales en la elaboración de mezclas asfálticas destinadas a obras de infraestructura vial*", estableció como objetivo diseñar un plan orientado a la reutilización de residuos industriales en la fabricación de mezclas asfálticas. Empleó la metodología de tipo aplicada, nivel explicativo, diseño experimental y enfoque cuantitativo. La tesis tomó como población a mezclas asfálticas convencionales y a mezclas modificadas con ceniza volante en reemplazo de la llenante mineral. La muestra estuvo compuesta por 42 probetas distribuidas de la siguiente manera: 16 probetas destinadas al ensayo Marshall, de las cuales se preparó una probeta compactada a 50 golpes y otra a 75 golpes efectuados en cada porcentaje de reemplazo de ceniza volante, considerando el patrón, 15%, 30%, 45%, 60%, 75%, 90% y 100%, lo que permitió determinar la estabilidad, densidad y flujo para cada modificación; otras 16 probetas fueron utilizadas en

el ensayo de ahuellamiento con las mismas condiciones de compactación y porcentajes de reemplazo; finalmente, 10 probetas adicionales se emplearon para definir la cantidad óptima de asfalto, y se elaboraron dos muestras con cada porcentaje (4.5%, 5%, 5.5%, 6% y 6.5%). Los resultados indicaron que con la inclusión del 20% de ceniza volante la mezcla presentó una estabilidad de 1580.56 kg, mientras que con 25% de ceniza volante la estabilidad fue de 1516.32 kg. Finalmente, concluyó que cuando el material reemplazado superó el 45% se evidenció una disminución en la estabilidad, lo que sugirió que adiciones superiores al 45% de ceniza volante afectan negativamente el comportamiento mecánico de la mezcla.

3.1.2 A nivel nacional

Calva (2020), a través de su tesis titulada *“Estudio del flujo y estabilidad de mezclas asfálticas con adición de escoria de acero”*, planteó como objetivo analizar la fluencia y la estabilidad de la mezcla asfáltica que incluyó escoria de acero como componente. Empleó la metodología de tipo aplicada, nivel explicativo, diseño experimental y enfoque cuantitativo. Su población de estudio estuvo conformada por mezclas asfálticas elaboradas en caliente tanto con inclusión de escoria de acero como sin ella. Tomó como muestra 180 probetas, distribuidas de la siguiente manera: se elaboraron 36 probetas patrón (sin escoria de acero) y se trabajó con cuatro dosificaciones de escoria de acero (15%, 25%, 50% y 75% en relación con el agregado grueso). Para cada porcentaje de adición se fabricaron 36 probetas, distribuidas en tres categorías de tránsito (liviano, medio y pesado), utilizando 12 probetas por cada grupo. Sus resultados obtenidos se detallaron a continuación: la muestra patrón registró una fluidez de 13.59 mm, un nivel de estabilidad de 1385.79 kg y una rigidez de 3306.1 kg/cm. Con el 15% de escoria de acero, el flujo se mantuvo, la estabilidad fue de 1833.45 kg y la rigidez alcanzó 5336.8 kg/cm. Con el 25%, el flujo no varió, la estabilidad fue de 2033.31 kg y la rigidez de 5867.9 kg/cm. Al 50%, el flujo se mantuvo, la estabilidad fue de 2480.97 kg y la rigidez de 3004.9 kg/cm. Finalmente, con el 75% de escoria, el flujo permaneció constante, la estabilidad fue también de 2480.97 kg y la rigidez alcanzó 7912.1 kg/cm. Se concluyó que el valor del flujo se mantuvo constante tanto en la muestra patrón como en las combinaciones que incorporaron escoria de acero. En cuanto al nivel de

estabilidad, los valores aumentaron proporcionalmente al incremento del contenido de escoria. Sin embargo, únicamente la mezcla patrón y la adicionada con 50% de escoria cumplieron con el parámetro requerido de rigidez.

Ávila y Velasco (2021), en su trabajo de tesis titulada *“Análisis experimental del uso de distintos aditivos en una mezcla asfáltica tipo MDC-19”*, establecieron como objetivo analizar el efecto de diversos aditivos sobre las características mecánicas de la mezcla asfáltica. Empleó la metodología de tipo aplicada, nivel explicativo, diseño experimental y enfoque cuantitativo. La población de estudio estuvo integrada por mezclas asfálticas modificadas (con cal hidratada, fibra de coco, fibra de polipropileno y grano de caucho reciclado) y por una mezcla patrón sin aditivos. La muestra estuvo compuesta por un total de 60 probetas modificadas, de las cuales 12 contenían un 1.5% de cal hidratada, 12 un 0.3% de fibra de coco, 12 un 0.3% de fibra de polipropileno y 12 un 0.5% de grano de caucho reciclado, mientras que las 12 probetas restantes se utilizaron para establecer la dosificación óptima de asfalto. Los resultados mostraron que la muestra patrón presentó una resistencia a la tracción húmeda (RTH) de 1312.77 kPa, una resistencia a la tracción seca (RTS) de 1612.81 kPa y una resistencia a la tracción (TSR) de 81.46%; al adicionar 1.5% de cal hidratada, alcanzó una RTH de 1377.93 kPa, RTS de 1401.68 kPa y TSR de 98.41%; con la incorporación de 0.3% de fibra de coco, los valores fueron RTH de 1062.00 kPa, RTS de 1266.49 kPa y TSR de 84.18%; al emplear 0.3% de fibra de polipropileno se alcanzó una RTH de 1134.87 kPa, RTS de 1387.13 kPa y TSR de 82.21%; y finalmente, con la incorporación de 0.5% de grano de caucho reciclado se obtuvo una RTH igual a 1244.55 kPa, RTS de 1343.49 kPa y TSR de 92.67%. Llegando a la conclusión que la incorporación de 1.5% de cal hidratada incrementó considerablemente la resistencia a la humedad en la mezcla asfáltica, alcanzando una TSR más alta (98.41%); el caucho reciclado también mostró un buen desempeño (92.67%), mientras que las fibras de coco y polipropileno ofrecieron mejoras moderadas, aunque dentro del rango aceptable.

Delgado (2021), en su trabajo de tesis denominado *“Análisis del impacto de la adición de escoria de acero y fibra de bagazo en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas”*

– *Chiclayo, 2021*”, planteó como objetivo evaluar cómo la adición de escoria de acero y fibras provenientes del bagazo de caña de azúcar afectan las características mecánicas de la mezcla asfáltica. Empleó la metodología de tipo aplicada, nivel explicativo, diseño cuasi experimental y enfoque cuantitativo. La población del estudio estuvo integrada por la totalidad de las mezclas asfálticas en caliente elaboradas empleando escoria de acero y fibras provenientes del bagazo de caña. La muestra incluyó un total de 150 probetas, de las cuales 132 se utilizaron en los ensayos de resistencia a la deformación: 12 probetas patrón, 60 con adición de escoria de acero y 60 con fibras provenientes del bagazo de caña, ambas en cinco dosificaciones distintas (0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4% y 0.5%). Las 18 probetas restantes se emplearon durante las pruebas de resistencia frente a la acción de la humedad, distribuidas en dos condiciones: 9 en estado seco y 9 en estado húmedo. Como resultado, la muestra patrón presentó una TSR de 85.63%; con la proporción adecuada de escoria de acero al 0.5% se obtuvo una TSR de 85.71%; mediante la dosificación óptima de fibras provenientes del bagazo de caña al 0.1% se alcanzó una TSR de 81.81%. Finalmente, concluyó que la escoria de acero al 0.5% resultó con la TSR más alta, superando levemente a la mezcla patrón, mientras que la fibra proveniente del bagazo de caña mostró su mejor desempeño al 0.1% de adición, aunque con una TSR menor; sin embargo, todos los valores obtenidos se encontraron dentro del rango mínimo admisible.

Aguirre (2022), en su documento de tesis titulado *“Efecto del empleo de escoria siderúrgica en mezclas asfálticas para pavimentos flexibles en Nuevo Chimbote, 2022”*, estableció como objetivo determinar cómo impactó la incorporación de escoria siderúrgica en las propiedades de la mezcla asfáltica para pavimentos flexibles. Empleó la metodología de tipo aplicada, nivel explicativo, diseño pre-experimental y enfoque cuantitativo. La población de estudio estuvo constituida por 40 probetas de mezclas asfálticas elaboradas en caliente. La muestra fue de 20 probetas, para las cuales se plantearon cuatro dosificaciones de mezcla, correspondientes a los siguientes niveles de incorporación de escoria siderúrgica: 7%, 14% y 21%, además de la mezcla patrón sin adición. En cuanto a los resultados, observó que la muestra patrón con una dosificación de asfalto de 6% registró un PU igual a 2.74 gr/cm³,

6.22% de VA, 19.86% de VMA, un nivel de estabilidad de 994.67 kg, flujo de 2.97 mm y rigidez de 3405.33 kg/cm. Al adicionar 7% de escoria siderúrgica, se obtuvo un PU de 2.85 gr/cm³, 4.12% de VA, 21.74% de VMA, un nivel de estabilidad de 1014.90 kg, flujo de 3.74 mm y rigidez de 3646 kg/cm. Con 14% de escoria, el PU fue de 3.14 gr/cm³, VA de 4.33%, VMA de 19.86%, un nivel de estabilidad de 1158.61 kg, un flujo de 3.44 mm y una rigidez de 3838.18 kg/cm. Finalmente, al adicionar 21% de escoria, el PU fue de 3.16 gr/cm³, VA de 4.82%, VMA de 21.36%, una estabilidad de 1109.94 kg, flujo de 2.37 mm y rigidez de 3996.52 kg/cm. Concluyéndose que la estabilidad y la rigidez aumentaron conforme se incrementó la dosificación de escoria siderúrgica en comparación con la mezcla patrón. El flujo también mostró un comportamiento creciente con las adiciones de escoria, a excepción del 21%, en el cual se observó una disminución.

Quispe (2022), en su tesis denominado "*Comportamiento eficiente de una mezcla asfáltica modificada con polímero SBS*", planteó como objetivo establecer la proporción adecuada de asfalto modificado con polímero SBS que permitiera incrementar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica. Empleó la metodología de tipo aplicada, nivel explicativo, diseño experimental y enfoque cuantitativo; adoptó un tipo descriptivo-correlacional-explicativo. La población estuvo representada por todas las probetas preparadas con diferentes dosificaciones de asfalto alterado con polímero SBS. La muestra estuvo compuesta por 114 probetas con adiciones de SBS en proporciones de 2.5%, 3.5% y 4.5%. De ellas, 36 probetas se emplearon con el fin de establecer la dosificación óptima de asfalto (5%, 5.5%, 6% y 6.5%). Se asignaron 72 probetas al ensayo de compresión diametral, 3 probetas a la resistencia a la fatiga y 3 probetas adicionales a la medición de la deformación permanente. Sus resultados indicaron que con 2.5% de SBS y un porcentaje de asfalto del 5.6%, se registró una TSR igual a 85.1%; con 3.5% de SBS y un contenido de asfalto de 5.5%, la TSR fue de 87.8%; mientras que con 4.5% de SBS y un contenido de asfalto de 5.7%, se alcanzó una TSR de 83.6%. Se concluyó que al adicionar el polímero SBS en diferentes porcentajes, el desempeño de la mezcla fue irregular, debido a que los resultados de resistencia tendieron a aumentar y disminuir sin seguir un patrón definido. No obstante,

todos los datos obtenidos se ubicaron dentro de los parámetros mínimos exigidos por la normativa vigente.

Aguilar y Chauca (2022), en su tesis titulada *“Comparación de las propiedades físico-mecánicas de una mezcla asfáltica en caliente PEN 85/100, con y sin adición de grafito”*, establecieron como objetivo comparar las características mecánicas y físicas de la mezcla asfáltica PEN 85/100, considerando la presencia o ausencia de grafito en diferentes dosificaciones (5%, 10%, 15% y 20%). Empleó la metodología de tipo aplicada, nivel explicativo, diseño experimental y enfoque cuantitativo. La población consistió en probetas de mezcla asfáltica en caliente PEN 85/100, tanto en su forma original como con incorporación de grafito. La muestra estuvo conformada por 60 especímenes, de los cuales 16 se emplearon para determinar parámetros volumétricos (8 sin grafito con contenidos de asfalto del 6%, 6.5%, 7% y 7.5%; y 8 con adición de grafito en proporciones de 5%, 10%, 15% y 20% con relación al peso del agregado fino), 6 se usaron en el ensayo Marshall (3 con grafito y 3 sin grafito), 8 en el ensayo Cántabro (4 con y 4 sin grafito) y 12 para evaluar la sensibilidad de la mezcla frente a la humedad (6 con y 6 sin grafito). Los resultados indicaron que la mezcla patrón presentó una pérdida por desgaste del 4.68%, mientras que la mezcla con 15% de grafito mostró una pérdida del 4.53%. Como conclusión, el ensayo Cántabro evidenció que la mezcla con 15% de grafito presentó una resistencia al desgaste ligeramente superior a la mezcla patrón, mostrando en ambos casos un desempeño favorable al encontrarse por debajo del límite máximo admisible.

Román y García (2023), en su tesis titulada *“Estudio de las características mecánico-físicas de una mezcla asfáltica, alterada con escorias de hierro en sustitución del agregado fino – Cusco, 2023”*, plantearon como objetivo analizar cómo las propiedades mecánico-físicas de una mezcla bituminosa mostraron cambios al adicionarle escorias de hierro. Empleó la metodología de tipo aplicada, nivel explicativo, diseño cuasiexperimental y enfoque cuantitativo. Su población estuvo conformada por todas las composiciones asfálticas elaboradas en caliente susceptibles de ser modificadas mediante la incorporación de escoria de hierro reciclado. La muestra se compuso de 100 probetas de mezclas asfálticas, de las

cuales 20 correspondieron a la mezcla patrón y los 80 restantes fueron modificadas con escoria de hierro en proporciones de 17%, 20%, 23% y 26%. Sus resultados mostraron que la mezcla patrón con 6% de asfalto alcanzó 1445.9 kg de estabilidad, 3 mm de flujo y 4743.77 kg/cm de rigidez. Además, esta mezcla presentó un contenido de VA de 3.93%, un PU de 2.33 gr/cm³ y un VMA de 15.92%. Al incorporar un 17% de escoria de hierro, la mezcla presentó una estabilidad de 1665.87 kg, un flujo de 3.6 mm y una rigidez de 4550.89 kg/cm; la cantidad de VA fue de 2.44%, el PU de 2.34 gr/cm³ y el VMA de 15.33%. Con 20% de escoria, se obtuvo una estabilidad de 1413.78 kg, un flujo de 3.2 mm, una rigidez de 4394.25 kg/cm, un VA de 1.89%, un PU de 2.36 gr/cm³ y un VMA de 14.68%. Finalmente, con 23% de escoria, se registró una estabilidad igual a 1618.35 kg, un flujo de 3.6 mm y una rigidez de 4445.19 kg/cm; la cantidad de VA fue de 1.44%, el PU de 2.37 gr/cm³ y el VMA de 14.35%. Concluyendo que con adición de escoria de hierro generó ligeras variaciones en el flujo, y que la estabilidad presentó un comportamiento irregular según el porcentaje utilizado. El flujo fue consistentemente mayor que el de la mezcla patrón. La mayor estabilidad se alcanzó con 17% de escoria, mientras que el menor valor se observó con 20%. Sin embargo, en términos de rigidez, ningún porcentaje evaluado cumplió con el parámetro establecido, lo que sugirió que, aunque algunas proporciones pudieron mejorar aspectos individuales, no garantizaron un desempeño mecánico integral y equilibrado de la mezcla.

Venegas y Zúñiga (2023), en su estudio de tesis denominado *“Análisis de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica con cal hidratada y polvo de ladrillo como componentes del relleno mineral”*, establecieron como objetivo evaluar cómo afectó el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica la incorporación de cal hidratada y polvo de ladrillo en sustitución del relleno mineral. Empleó la metodología de tipo aplicada, nivel explicativo, diseño cuasiexperimental y enfoque cuantitativo. Su población estuvo conformada por todas las probetas fabricadas con diversas proporciones de filler y asfalto PEN 60/70, incluyendo aquellas en las que el filler fue reemplazado por cal y polvo de ladrillo. La muestra estuvo compuesta por 160 probetas: 16 se utilizaron para determinar el diseño óptimo, 64 con cal hidratada (4%, 8%, 12%, 16%), 64 con polvo de ladrillo (4%, 7%, 10%, 13%) y 16 con

una combinación de ambos en sus porcentajes óptimos. Los resultados indicaron que, con el nivel óptimo de cemento asfáltico del 5.8%, la dosificación más adecuada para cal fue del 8%, alcanzando un PU de 2.39 g/cm³, VA de 3.46%, VMA de 14.9%, flujo de 10.53 mm, estabilidad de 1325.63 kg y rigidez de 3208.8 kg/cm; mientras que, para el polvo de ladrillo, con la misma dosificación óptima de asfalto (5.8%) y una dosificación óptima del 10%, se obtuvo un PU de 2.39 g/cm³, VA de 3.5%, VMA de 15%, flujo de 10.37 mm, estabilidad de 1324.61 kg y rigidez de 3256 kg/cm. Finalmente, concluyó que las mezclas con una adición de 8% de cal hidratada y 10% de polvo de ladrillo, ambas con 5.8% de asfalto, cumplieron con los requisitos normativos en cuanto a PU, VA, VMA, estabilidad y rigidez, siendo este último ligeramente mayor en la mezcla modificada con adición de polvo de ladrillo, lo cual resultó favorable; sin embargo, el flujo en ambas mezclas superó el límite permitido, lo que indicó una mayor deformabilidad.

3.1.3 A nivel local

No existen estudios relacionados al respecto.

3.2. Bases teóricas

3.2.1 Polvo de hierro fundido

Se define como un residuo metálico fino, compuesto principalmente por partículas de hierro y carbono, que se genera como subproducto en procesos industriales como el lijado, esmerilado, pulido, torneado y soldadura de materiales de hierro fundido. Este tipo de residuo se encuentra comúnmente en tornerías, talleres de soldadura, centros de mecanizado y otras industrias metalúrgicas, donde suele ser descartado sin darle un uso posterior, a pesar de su alto potencial de reciclaje (Reliance Foundry, 2023).

Figura 1

Polvo de hierro fundido



Nota. La imagen muestra el polvo de hierro fundido, componente principal empleado en la fabricación de las muestras de esta tesis.

Método de recolección del polvo de hierro fundido

Mediante el reciclaje de residuos industriales, como los generados en tornerías (limaduras, virutas), centros de soldadura, talleres de mecanizado y fábricas donde se realiza el desbaste o acabado superficial de piezas de hierro, es posible recolectar (Alquera, 2023).

Morfología y tamaño de partícula del polvo de hierro fundido

Las partículas pueden presentar formas variadas (irregulares, esféricas, granulares) y en el caso del reciclado, su tamaño suele estar ya definido por el proceso de generación (lijado, pulido, etc.), eliminando la necesidad de molienda adicional (Alquera, 2023).

Composición química del polvo de hierro fundido

Principalmente hierro (Fe), con un significativo porcentaje de carbono (C) (generalmente por encima del 2%) y silicio (Si). Otros elementos como manganeso, fósforo y azufre están presentes en menor proporción (Reliance Foundry, 2023).

Mezcla asfáltica en caliente (MAC)

Es el tipo de mezcla bituminosa más habitual, compuesta por asfalto, agregados gruesos y finos, material de relleno (filler) y en algunos casos aditivos; logrando un recubrimiento uniforme de todas las partículas. Su elaboración requiere el calentamiento tanto del asfalto como de los agregados y su colocación se efectúa a temperaturas mayores que la del ambiente. Se utiliza ampliamente en carreteras, vías urbanas y aeropuertos, y puede

variar en composición según el tipo de asfalto empleado, con un contenido que oscila entre el 3% y 6% del volumen total de agregados (Padilla, 2004).

Figura 2

Distribución granulométrica para MAC

Tamiz	Porcentaje que pasa		
	MAC -1	MAC-2	MAC-3
25,0 mm (1")	100		
19,0 mm (3/4")	80-100	100	
12,5 mm (1/2")	67-85	80-100	
9,5 mm (3/8")	60-77	70-88	100
4,75 mm (N.º 4)	43-54	51-68	65-87
2,00 mm (N.º 10)	29-45	38-52	43-61
425 µm (N.º 40)	14-25	17-28	16-29
180 µm (N.º 80)	8-17	8-17	9-19
75 µm (N.º 200)	4-8	4-8	5-10

Nota. El cuadro muestra la distribución granulométrica de las MAC. Tomado del MTC (2015).

3.2.2 Propiedades físicas de la MAC

Una MAC elaborada puede analizarse para evaluar su desempeño dentro de un pavimento. Estas propiedades físicas corresponden a los parámetros volumétricos fundamentales, los cuales influyen directamente en la durabilidad y firmeza de la mezcla. Entre estos parámetros se consideran el PU, los VA, los VMA, el contenido de asfalto (CA) y el porcentaje de vacíos rellenos de asfalto (VFA) (Asphalt Institute, 1998).

3.2.2.1 Parámetros volumétricos

Los parámetros volumétricos constituyen propiedades físicas fundamentales de la mezcla asfáltica, ya que describen la relación volumétrica entre el asfalto y los agregados. Propiedades como el peso unitario, los vacíos de aire, los vacíos en el agregado mineral, el contenido de asfalto y los vacíos llenos de asfalto permiten estimar el comportamiento y desempeño de la mezcla, tanto en laboratorio como en condiciones de campo (Robles, 2024).

3.2.2.1.1 Peso unitario (PU)

Definida como densidad, esta característica es esencial para lograr una carpeta asfáltica compacta que proporcione un rendimiento duradero (Santa Cruz, 2021).

De acuerdo con la norma del MTC E 505, la determinación del PU de la masa

compactada de una mezcla asfáltica es un indicador fundamental del control de compactación en proyectos viales y es una base para el cálculo de otros parámetros volumétricos. El método implica registrar el peso de la probeta compactada en estado seco al aire, a temperatura ambiente, luego sumergirla en agua a 25°C durante un tiempo determinado. Después, se retira, se seca superficialmente hasta alcanzar la condición de superficie seca saturada (SSS) y se vuelve a pesar. Finalmente, se pesa la probeta mientras está suspendida en agua a la misma temperatura.

Luego se reemplaza en la siguiente fórmula:

$$PU = \frac{A}{B - C}$$

Donde:

PU = Peso unitario.

A = Peso de la probeta seca al aire.

B = Peso en condición saturada y superficialmente seca.

C = Peso de la muestra en condición sumergida (MTC, 2016).

3.2.2.1.2 Vacíos de aire (VA)

Según la norma del MTC E 505, los VA se refieren a la fracción de volumen correspondiente al aire atrapado en la mezcla asfáltica una vez compactada, calculada con base en el volumen total de la probeta, siendo un parámetro clave para garantizar la resistencia del pavimento a la penetración de agua y deformaciones.

El procedimiento consiste en preparar y compactar la muestra de mezcla asfáltica según especificaciones, medir su masa y volumen para calcular la densidad o también llamado densidad bulk (PU), y obtener densidad máxima teórica de la mezcla (G_{mm}), que corresponde a la densidad sin vacíos. Finalmente, se calcula el porcentaje de VA aplicando la fórmula:

$$VA = \left(1 - \frac{PU}{G_{mm}}\right) * 100$$

Donde:

VA = Vacíos de aire (%).

PU = Densidad bulk de la mezcla compactada (masa/volumen).

G_{mm} = Densidad máxima teórica de la mezcla (masa/volumen).

Este procedimiento permite verificar que la mezcla asfáltica conserve un porcentaje apropiado de VA , de acuerdo con los estándares establecidos por el MTC, con el fin de asegurar su durabilidad, así como su resistencia estructural y estabilidad bajo cargas de tránsito (MTC, 2016).

3.2.2.1.3 Vacíos en el agregado mineral (VMA)

Según las normas del MTC E 205 - 206 - 505, abarca el cálculo de los VMA, el cual es el volumen de los espacios presentes dentro de las partículas del agregado mineral que conforman la mezcla asfáltica ya compactada, considerando tanto los VA como el volumen de ligante asfáltico efectivo. Este parámetro se expresa como porcentaje respecto al volumen total de la probeta compactada.

El cálculo de los VMA en mezclas asfálticas requiere determinar tres parámetros fundamentales. En primer lugar, la gravedad específica aparente de la mezcla asfáltica compactada, que representa su densidad total, incluyendo los vacíos. En segundo lugar, la gravedad específica aparente promedio de los agregados combinados, que indica la densidad de la fracción sólida de estos materiales y se obtiene conforme a los métodos de la norma MTC E 205 (agregados finos) y MTC E 206 (agregados gruesos). Por último, se utiliza el porcentaje en masa de los agregados secos, definido en el diseño de mezcla, que expresa la proporción de masa seca de agregados en relación con el peso total de la mezcla. Con estos valores se procede a aplicar la fórmula correspondiente para determinar los VMA.

$$VMA = 100 - \left(\frac{PU}{G_{sa}} * P_s \right)$$

Donde:

VMA = Vacíos en el agregado mineral (%).

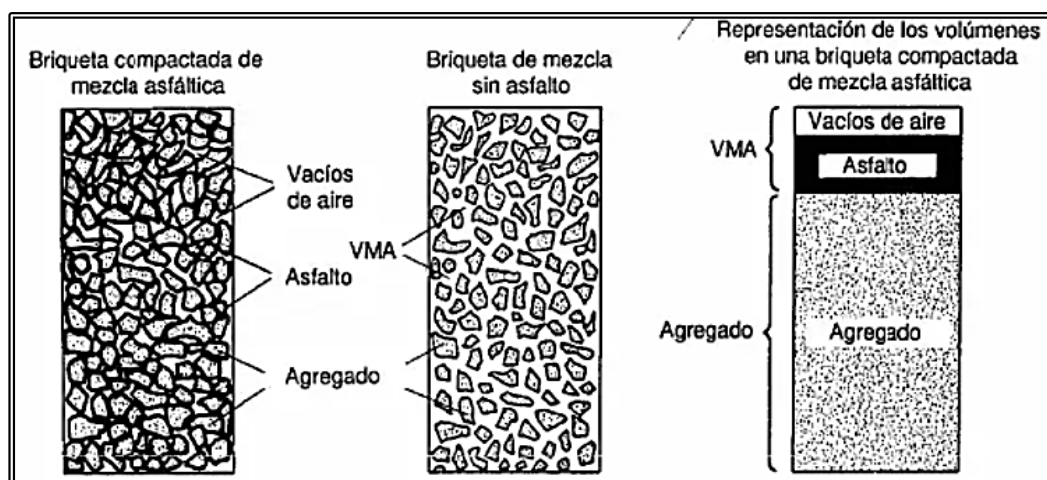
PU = Gravedad específica aparente de la mezcla asfáltica compactada.

G_{sa} = Gravedad específica aparente promedio de los agregados combinados.

P_s = Masa de los agregados secos (%) (MTC, 2016).

Figura 3

Representación de los VMA en una muestra de mezcla asfáltica



Nota. La imagen muestra los componentes volumétricos de una mezcla asfáltica, destacando los VA, el asfalto y el agregado. Tomado de Asphalt Institute (1998).

Figura 4

Cantidad mínima de VMA

Tamiz	Vacíos mínimos en agregado mineral %	
	Marshall	Superpave
2,36 mm (N.º 8)	21	-
4,75 mm (N.º 4)	18	-
9,50 mm (3/8")	16	15
12,5 mm (1/2")	15	14
19,0 mm (3/4")	14	13
25,0 mm (1")	13	12
37,5 mm (1 1/2")	12	11
50,0 mm (2")	11,5	10,5

Nota. El cuadro indica los rangos mínimos de VMA en diferentes tamaños de los tamices, según los métodos Marshall y Superpave. Tomado del MTC (2015).

3.2.3 Propiedades mecánicas de la MAC

Las MAC deben ser correctamente diseñadas, producidas y aplicadas con el fin de garantizar que cumplan con las propiedades mecánicas esenciales que aseguren su desempeño adecuado en servicio. Estas propiedades resultan ser necesarias para certificar el control de calidad, puesto que permiten verificar que la mezcla posea las características requeridas para soportar el peso del tránsito vehicular y la influencia de las condiciones

climáticas con el paso del tiempo (Asphalt Institute, 1998).

3.2.3.1 Resistencia a la deformación

Es la propiedad que expresa su eficiencia para resistir cargas sin experimentar deformaciones (Chávez, 2020).

3.2.3.1.1 Estabilidad

Corresponde a la capacidad máxima del material para soportar deformaciones cuando está sometido una carga continua. Esta característica esencial está influenciada por la naturaleza y gradación de los agregados, así como por el tipo y cantidad del asfalto empleado

Un pavimento con mayor estabilidad presenta una estructura más rígida y resistente frente a las solicitudes generadas por el tránsito vehicular (Santa Cruz, 2021).

Figura 5

Coefficientes de corrección para ensayos de estabilidad

Volumen del espécimen, cm ^{3B}	Espesor del espécimen ^B		Razón de la Correlación
	mm	Pulg	
200 - 213	25,4	1,00 (1)	5,56
214 - 225	27	1,06 (1 1/16)	5
226 - 237	28,6	1,12 (1 1/8)	4,55
238 - 250	30,2	1,19 (1 3/16)	4,17
251 - 264	31,8	1,25 (1 1/4)	3,85
265 - 276	33,3	1,31 (1 5/16)	3,57
277 - 289	34,9	1,38 (1 3/8)	3,33
290 - 301	36,5	1,44 (1 7/16)	3,03
302 - 316	38,1	1,50 (1 1/2)	2,78
317 - 328	39,7	1,56 (1 9/16)	2,5
329 - 340	41,3	1,62 (1 5/8)	2,27
341 - 353	42,9	1,69 (1 11/16)	2,08
354 - 367	44,4	1,75 (1 3/4)	1,92
368 - 379	46	1,81 (1 13/16)	1,79
380 - 392	47,6	1,88 (1 7/8)	1,67
393 - 405	49,2	1,94 (1 15/16)	1,56
406 - 420	50,8	2,00 (2)	1,47
421 - 431	52,4	2,06 (2 1/16)	1,39
432 - 443	54	2,12 (2 1/8)	1,32
444 - 456	55,6	2,19 (2 3/16)	1,25
457 - 470	57,2	2,25 (2 1/4)	1,19
471 - 482	58,7	2,31 (2 5/16)	1,14
483 - 495	60,3	2,38 (2 3/8)	1,09
496 - 508	61,9	2,44 (2 7/16)	1,04
509 - 522	63,5	2,50 (2 1/2)	1
523 - 535	65,1	2,56 (2 9/16)	0,96
536 - 546	66,7	2,62 (2 5/8)	0,93
547 - 559	68,3	2,60 (2 11/16)	0,89
560 - 573	69,8	2,75 (2 3/4)	0,86
574 - 585	71,4	2,81 (2 13/16)	0,83
586 - 598	73	2,88 (2 7/8)	0,81
599 - 610	74,6	2,94 (2 15/16)	0,78
611 - 626	76,2	3,00 (3)	0,76

Nota. El cuadro presenta los coeficientes de corrección para ensayos de estabilidad, basándose en el volumen, espesor de la probeta y su correspondiente razón de correlación. Tomado del MTC (2016).

3.2.3.1.2 Flujo

Este parámetro está vinculado con la estabilidad de las mezclas asfálticas, ya que se obtiene tras la falla de la probeta en el ensayo Marshall. Permite evaluar el nivel de deformación de la mezcla; valores elevados de fluencia reflejan un comportamiento excesivamente plástico, con alta susceptibilidad a deformarse bajo el efecto del tráfico vehicular. En cambio, valores bajos reflejan una mezcla más rígida, propensa a fracturas abruptas (Rengifo y Vargas, 2017).

3.2.3.1.3 Rigidez

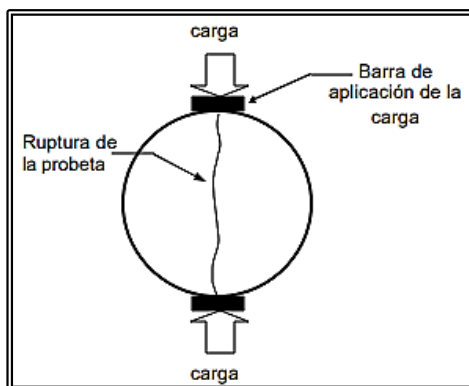
Corresponde a un indicador derivado de la relación entre la estabilidad y la fluencia, determinado a través del ensayo Marshall. Un valor elevado de este índice refleja que la mezcla presenta una mayor rigidez, lo que la hace menos flexible y más propensa a agrietarse. Por el contrario, si el índice es bajo, la mezcla será más flexible, pero también más susceptible a deformarse con facilidad (Rengifo y Vargas, 2017).

3.2.3.2 Resistencia a la tracción indirecta (ITS)

Es un parámetro útil para evaluar la probabilidad de que se presenten grietas. Cuando una mezcla asfáltica presenta una alta deformación en el punto de falla, esto indica que puede soportar mayores esfuerzos antes de fracturarse, lo que sugiere una mayor capacidad para resistir el agrietamiento en comparación con una mezcla que falla con deformaciones menores (Garnica et al., 2005).

Figura 6

Rotura de una muestra durante el ensayo de tracción indirecta



Nota. En la imagen se aprecia como la probeta se rompe durante el desarrollo del ensayo de tracción indirecta. Tomado de Garnica et al. (2005).

3.2.3.2.1 Capacidad estructural

La capacidad estructural de una mezcla asfáltica se define como la aptitud del material para soportar las cargas repetidas del tránsito sin presentar fallas estructurales, manteniendo su estabilidad, resistencia y funcionalidad durante la vida útil del pavimento (Garnica et al., 2004).

3.2.3.3 Resistencia al daño inducido por humedad (TSR)

Se refiere a la propiedad de la mezcla asfáltica de resistir la penetración de agua en su estructura interna, lo cual depende directamente del porcentaje de VA en la mezcla compactada y del grado de conexión de estos vacíos con la superficie expuesta (Cáceres, 2024).

3.2.3.3.1 Deterioro

El deterioro en mezclas asfálticas es el proceso mediante el cual el material pierde progresivamente sus propiedades mecánicas y de adherencia debido a la acción del tránsito, la humedad y el envejecimiento del ligante, lo que se manifiesta en una reducción de la resistencia y durabilidad del pavimento (Garnica et al., 2004).

3.2.3.4 Resistencia al desgaste

Es su capacidad para oponerse a la desintegración superficial y la degradación del material provocada por el desgaste del tránsito y los factores climáticos. Esta propiedad es un componente clave de la durabilidad general del pavimento, ya que un alto nivel de resistencia al desgaste asegura la integridad física de la superficie, retrasando el deterioro y prolongando la vida útil del material (Cáceres, 2024).

3.2.3.4.1 Pérdida por abrasión

La pérdida por abrasión se refiere a la disminución progresiva de material causada por la acción de partículas duras que se desplazan sobre una superficie bajo condiciones de presión y movimiento continuo. Estas partículas, generalmente de origen mineral, generan desgaste superficial que debilita el material y reduce su resistencia mecánica. Este fenómeno puede afectar el desempeño y la durabilidad de los materiales, por lo que su evaluación resulta fundamental para prevenir fallas y optimizar su comportamiento en servicio (Instituto Asteco, 2018).

Ensayos de los agregados gruesos

Según Condori (2024), para el agregado grueso, se utiliza roca sólida triturada, grava o una mezcla de estos materiales, cumpliendo con los estándares de calidad. Las partículas deben ser limpias, duraderas y resistentes, evitando formas planas, alargadas o frágiles. No

debe contener impurezas como polvo, tierra, arcilla o materia orgánica que afecten la adherencia con el asfalto. Además, deben cumplir con las características indicadas en el Manual de Ensayo de Materiales del 2016, Especificaciones Técnicas Generales para Construcción del 2015 y la Norma Técnica CE 010 de Pavimentos Urbanos del 2010, mostradas en las figuras que se presentan a continuación:

Figura 7

Criterios de aceptación para los agregados gruesos de la MAC

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (msnm)	
		≤3.000	>3.000
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	18% máx.	15% máx.
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	40% máx.	35% máx.
Adherencia	MTC E 517	+95	+95
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35% mín.	35% mín.
Partículas chatas y alargadas	ASTM 4791	10% máx.	10% máx.
Caras fracturadas	MTC E 210	85/50	90/70
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0,5% máx.	0,5% máx.
Absorción *	MTC E 206	1,0% máx.	1,0% máx.

Nota. La imagen muestra los criterios de aceptación para los agregados gruesos de la MAC, según la norma y la altitud. Tomado del MTC (2015).

Figura 2

Requisitos mínimos para la aprobación del agregado grueso de la MAC

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (m.s.n.m.)	
		< 3.000	> 3.000
Caras fracturadas	MTC E 210	85/50	90/70
Adherencia	ASTM D 3625	>95 %	>95 %

Nota. La ilustración muestra los requisitos mínimos de caras fracturadas y adherencia para el agregado grueso de la MAC, según la norma y la altitud. Tomado del MTC (2015).

Figura 3

Parámetros de calidad aplicables a los agregados gruesos utilizados en la MAC

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (msnmm)	
		< 3000	> 3000
Pérdida en Sulfato de Sodio	NTP 400.016:1999	12 % máximo	10 % máximo
Pérdida en Sulfato de Magnesio	NTP 400.016:1999	18 % máximo	15 % máximo
Abrasión Los Angeles	NTP 400.019:2002	40 % máximo	35 % máximo
Índice de Durabilidad	MTC E – 214 (1999)	35 % mínimo	
Partículas chatas y alargadas *	ASTM D – 4791 (1999)	15 % máximo	
Partículas fracturadas	MTC E – 210 (1999)	Según Tabla 12	
Sales Solubles	NTP 339.152:2002	0,5 % máximo	
Absorción	NTP 400.021:2002	1,00 %	Según Diseño
Adherencia	MTC E – 519 (1999)	+ 95	

Nota. El cuadro 11 muestra los criterios de calidad y requisitos para los agregados gruesos de la MAC, según la norma y la altitud. Tomado del MVCS (2010).

Figura 4

Parámetro mínimo del agregado grueso en la MAC

Métodos	No mayor que
Abrasión Los Ángeles (NTP 400.019:2002)	50 %

Nota. La imagen del cuadro presenta el parámetro mínimo de abrasión permitido para el agregado grueso en la MAC, según la norma. Tomado del MVCS (2010).

Figura 5

Criterios de aceptación para partículas con caras fracturadas en la MAC

Tipos de Vías	Espesor de Capa	
	< 100 mm	> 100 mm
Vías Locales y Colectoras	65/40	50/30
Vías Arteriales y Expresas	85/50	60/40

Nota. El cuadro muestra los criterios de aceptación para partículas con caras fracturadas, en función de la clase de vía y del grosor de la capa. Tomado del MVCS (2010).

- **Granulometría del agregado grueso (MTC E 204)**

Esta prueba evalúa la distribución granulométrica del agregado grueso mediante el uso de tamices, lo que permite conocer su distribución por tamaño.

Dicha distribución se representa mediante una curva granulométrica, que muestra la dimensión de la malla utilizada en los tamices (en milímetros), así como el porcentaje total de material que pasa por cada uno de ellos, expresado en peso. Es necesario que esta curva se ajuste a los rangos establecidos por la normativa técnica actual (MTC, 2016).

Figura 6

Cantidad mínima necesaria del agregado grueso para muestreo

Tamaño Máximo Nominal Abertura Cuadrada		Cantidad mínima de muestra de ensayo
mm	(pulg)	Kg
9,5	(3/8)	1
12,5	(1/2)	2
19,0	(3/4)	5
25,0	(1)	10
37,5	(1 1/2)	15
50,0	(2)	20
63,0	(2 1/2)	35
75,0	(3)	60
90,0	(3 1/2)	100
100,0	(4)	150
125,0	(5)	300

Nota. La imagen muestra la mínima cantidad de agregado grueso que debe emplearse en el muestreo, de acuerdo con el tamaño máximo nominal del material. Tomado del MTC (2016).

- **Peso específico y absorción de agregados gruesos (MTC E 206)**

El peso específico es una medida que relaciona el peso del agregado grueso con el

volumen que ocupa, lo que permite determinar la masa de una cantidad específica de este material.

Por otro lado, se entiende por absorción al aumento de peso del agregado debido al agua que ingresa en sus poros, sin considerar el agua adherida a su superficie externa como una película.

Se seca la muestra de agregado a 110°C hasta estabilizar su peso, se deja enfriar y posteriormente se introduce en agua durante un periodo de 24 horas. Luego, se elimina el exceso de agua hasta alcanzar la condición de saturación superficialmente seca, y se registra su peso. Después, se establece su peso sumergido en agua, eliminando el aire atrapado. Finalmente, la muestra se seca nuevamente hasta alcanzar un peso constante y luego se pesa otra vez (MTC, 2016).

Fórmulas:

$$Pe_m = \frac{A}{(B - C)} * 100$$

En el cual:

Pe_m = Peso específico medido de la masa del material.

A = Peso de la muestra completamente seca medida en aire (gr).

B = Peso de la muestra en estado de saturación con superficie seca en aire (gr).

C = Peso de la muestra saturada al estar sumergida en agua.

- Peso específico de la muestra en condición de saturación con superficie seca

(Pe_{sss}):

$$Pe_{sss} = \frac{B}{(B - C)} * 100$$

- Peso específico aparente (Pe_a):

$$Pe_a = \frac{A}{(A - C)} * 100$$

- Absorción (A_b):

$$A_b = \frac{B - A}{A} * 100$$

- **Durabilidad al sulfato de magnesio en el agregado grueso (MTC E 209)**

La presente prueba determina la resistencia del agregado grueso a la desintegración provocada por sales solubles, utilizando ciclos alternos de inmersión en sulfato de magnesio y secado en horno.

Las muestras se sumergen durante 16 a 18 horas, se secan a 110°C y este proceso se repite según el número de ciclos requeridos. Los resultados dependen del tipo de sal empleada, por lo que deben interpretarse conforme a las especificaciones técnicas establecidas (MTC, 2016).

Fórmula:

$$P = \frac{PI - PF}{PI} * 100$$

Donde:

P = Reducción de peso provocado por la interacción con la solución de sulfato.

$\% PI$ = Peso de la muestra previo al proceso de inmersión (gr).

PF = Peso de la muestra tras el proceso de inmersión (gr).

- **Sales solubles en el agregado grueso (MTC E 219)**

El ensayo se emplea para detectar la presencia de sales solubles en los agregados utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas, dado que su disolución y migración con la humedad pueden comprometer la cohesión interna de la mezcla y acelerar su deterioro. Aunque el agregado grueso presenta menor superficie específica que el fino, también puede retener sales perjudiciales si no es lavado adecuadamente.

Se pesan 100 gr de muestra y se introduce la muestra en un vaso de precipitados con agua destilada, asegurando que el líquido la cubra aproximadamente 3 cm por encima. Luego, se calienta hasta llegar el punto de ebullición, agitando la mezcla. Una vez enfriada, se deja sedimentar hasta obtener una solución clara. Posteriormente, se toma el líquido sobrenadante y se divide en dos tubos de ensayo, añadiendo 6 gotas de cloruro de bario en uno y 6 gotas de nitrato de plata en el otro. La formación de precipitados indica la presencia de sales solubles. Por ello, si se detectan sales, se repite el procedimiento hasta que ya no

se observe su presencia (MTC, 2016).

- **Abrasión los Ángeles al desgaste del agregado grueso (MTC E 207)**

Mediante este procedimiento se define la manera de medir el porcentaje de desgaste de los agregados, tanto menores de 37,5 mm como mayores de 19 mm, utilizando la máquina de los Ángeles. Consiste en colocar una cantidad específica de agregado grueso a un total de 500 vueltas dentro de un tambor giratorio, junto con 11 esferas metálicas que golpean y fragmentan el material, provocando su desgaste. Luego del proceso, el material resultante se tamiza a través de la malla N°12, considerando como pérdida por abrasión todo el material que pase por dicha malla. El propósito de esta prueba consiste en determinar la resistencia del agregado frente a acciones mecánicas (MTC, 2016).

Figura 13

Relación de esferas necesarias para la prueba de abrasión

Gradación	Número de Esferas	Masa de la carga (g)
A	12	5 000 ± 25
B	11	4 584 ± 25
C	8	3 330 ± 20
D	6	2 500 ± 15

Nota. La ilustración muestra la relación de esferas y la masa de carga necesarias para la prueba de abrasión, según el tipo de gradación. Tomado del MTC (2016).

Fórmula:

$$\% \text{ desgaste} = \frac{W_i - W_f}{W_f} * 100$$

En el cual:

W_i = Peso inicial de la muestra en estado seco.

W_f = Peso de la muestra seca retenida en la malla N°12.

- **Porcentaje de caras fracturadas en el agregado grueso (MTC E 210)**

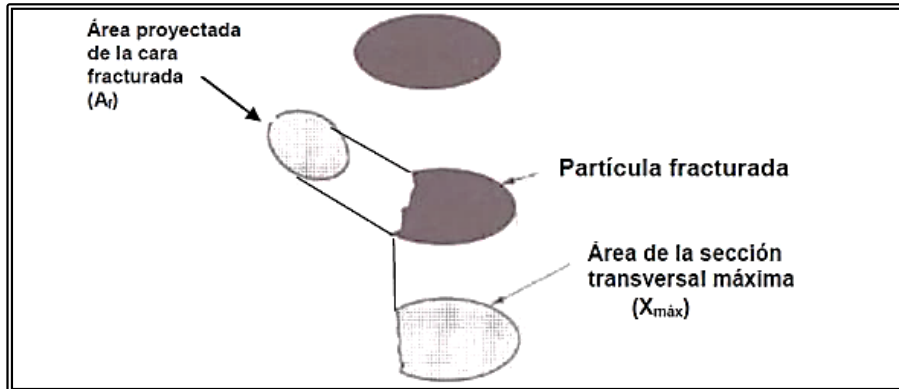
La estructura geométrica de las partículas de agregado grueso influye directamente en la facilidad de colocación del material, la energía requerida para lograr su compactación adecuada, y el comportamiento del pavimento a lo largo del tiempo.

El procedimiento permite evaluar, a partir del peso, el porcentaje de partículas de

agregado grueso con una o dos caras fracturadas. Por lo general, las partículas angulosas y de forma irregular tienden a resistir el movimiento dentro de la mezcla, ya que se ajustan mejor entre sí durante la compactación. Esta capacidad de ajuste mejora cuando las partículas tienen bordes bien definidos y angulosos (MTC, 2016).

Figura 7

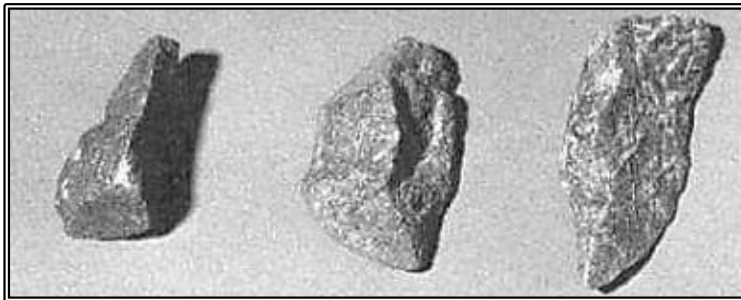
Representación gráfica de un agregado con una cara fracturada



Nota. Representación gráfica de un agregado con una cara fracturada. Tomado del MTC (2016).

Figura 8

Caras fracturadas



Nota. La imagen ilustra las caras fracturadas de los agregados, mostrando ejemplos de partículas resultantes de los ensayos. Tomado del MTC (2016).

Figura 16*Caras no fracturadas*

Nota. La ilustración muestra agregados con caras no fracturadas, presentando ejemplos de partículas redondeadas y sin fracturas visibles. Tomado del MTC (2016).

Fórmula:

$$P = \frac{F}{(F + N)} * 100$$

Donde:

P = Partículas que presentan caras fracturadas (%).

F = Número de partículas con las caras fracturadas exigidas por la norma.

N = Número de partículas sin fracturas o que no cumplen con el criterio de clasificación

- **Índice de aplanamiento y alargamiento del agregado grueso (MTC E 221)**

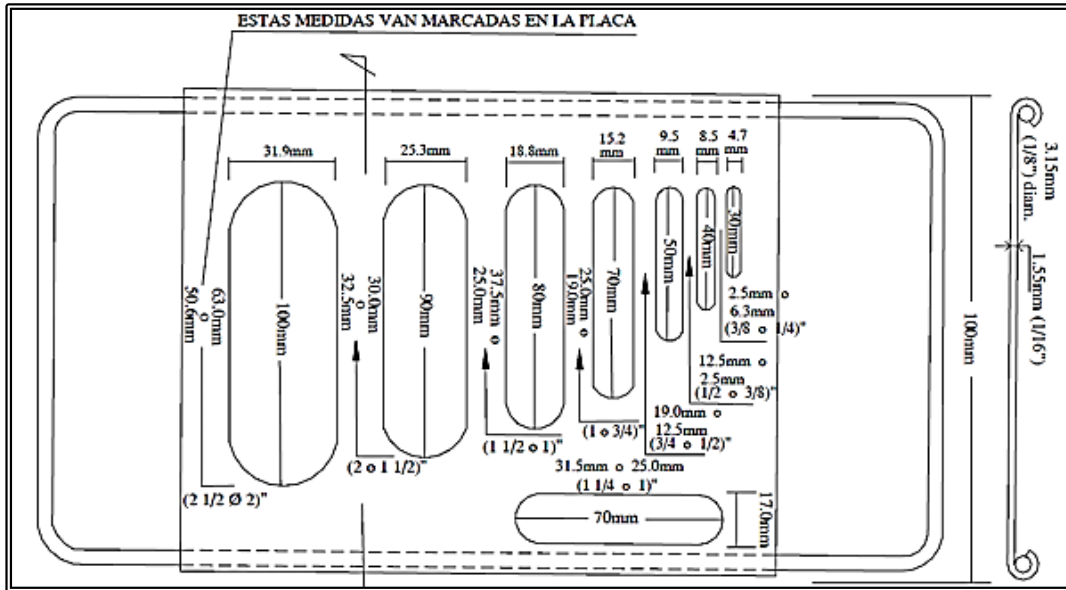
Se define el índice de aplanamiento al porcentaje de masa de las partículas dentro de una fracción específica del agregado grueso, cuyo espesor es menor a tres quintos del promedio de sus otras dos dimensiones (ancho y largo).

El índice de alargamiento, en cambio, corresponde al porcentaje en masa de partículas cuya longitud supera nueve quintos del promedio de sus otras dos dimensiones (ancho y espesor).

Para evaluar estas condiciones, se seleccionan partículas dentro del rango de tamaños permitidos y se miden utilizando calibradores especiales, conocidos como calibradores de espesores y de longitudes. No obstante, este índice no se aplica a partículas menores de 6,3 mm (1/4") ni a aquellas mayores de 63 mm (2 1/2"), conforme a lo indicado en la normativa (MTC, 2016).

Figura 9

Instrumento para medir espesores

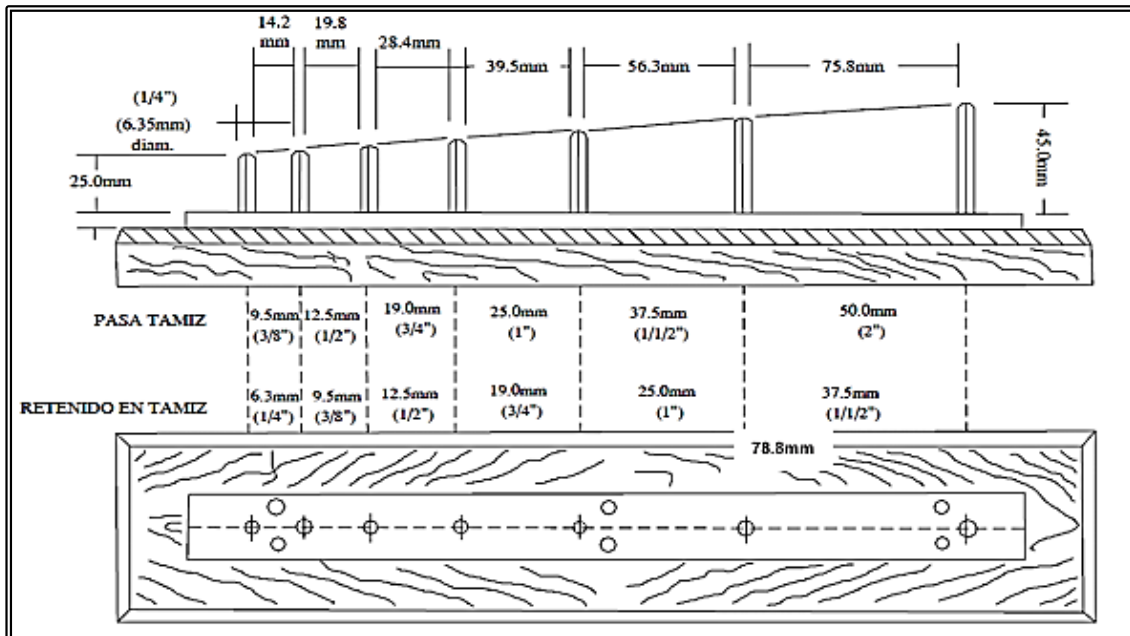


Nota. La imagen muestra un instrumento para medir espesores, detallando sus medidas.

Tomado del MTC (2016).

Figura 18

Instrumento para medir longitudes



Nota. La imagen muestra un instrumento para medir longitudes y el tamaño del agregado.

Tomado del MTC (2016).

- **Adherencia del agregado grueso (MTC E 517)**

La adherencia es la capacidad que tiene el asfalto para fijarse y mantenerse unido a la superficie del agregado. Este ensayo permite evaluar la afinidad entre ambos materiales, determinando si el asfalto recubre adecuadamente el agregado, lo cual es crucial para evitar desprendimientos (despegues) en pavimentos asfálticos.

El ensayo de adherencia implica recubrir el agregado grueso con asfalto caliente, asegurando una mezcla óptima. Una vez enfriada la muestra, se examina visualmente el porcentaje de recubrimiento asfáltico que permanece en el agregado, lo que posibilita evaluar el nivel de adherencia entre los dos materiales (MTC, 2016).

Ensayos de los agregados finos

Según Conarsac (2023), para el agregado fino, las partículas deben estar limpias. Es crucial que no contengan impurezas como polvo, tierra, arcilla o materia orgánica que comprometan la adherencia con el asfalto. Además, deben cumplir con las características especificadas en los manuales y normas técnicas relevantes, como el Manual de Ensayo de Materiales del 2016, las Especificaciones Técnicas Generales para Construcción del 2015 y la Norma Técnica CE 010 de Pavimentos Urbanos del 2010. Considerando los criterios que se detallan a continuación:

Figura 10

Criterios de aceptación para los agregados finos de la MAC

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (m.s.n.m.)	
		< 3.000	> 3.000
Equivalente de Arena	MTC E 114	60	70
Angularidad del agregado fino	MTC E 222	30	40
Azul de metileno	AASTHO TP 57	8 máx.	8 máx.
Índice de Plasticidad (malla N° 40)	MTC E 111	NP	NP
Durabilidad	MTC E 209	18 máx.	18% máx.
Índice de Durabilidad (1)	MTC E 214	35 mín.	35 mín.
Índice de Plasticidad (malla N° 200)	MTC E 111	4 máx.	NP
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0,5% máx.	0,5% máx.
Adherencia Riedel Weber	MTC E 220	>4 %	>4 %
Absorción* *	MTC E 205	0,5% máx.	0,5% máx.

Nota. El cuadro muestra los criterios de aceptación para los agregados finos de la MAC, según los ensayos y la altitud. Tomado del MTC (2015).

Figura 20

Parámetros de calidad aplicables a los agregados finos utilizados en la MAC

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (msnmm)	
		< 3000	> 3000
Equivalente de Arena	NTP 339.146:2000	Según Tabla 13	
Angularidad del agregado fino	MTC E – 222 (1999)	Según Tabla 14	
Adhesividad (Riedel Weber)	MTC E – 220 (1999)	4 % mínimo	6 % mínimo
Índice de Durabilidad	MTC E – 214 (1999)	35 mínimo	
Índice de Plasticidad	MTC E – 111 (1999)	Máximo 4	NP
Sales Solubles Totales	NTP 339.152:2002	0,5 % máximo	
Absorción	MTC E – 205 (1999)	0,50 %	Según Diseño

Nota. La ilustración presenta los criterios de calidad y requisitos para los agregados finos de la MAC. Tomado del MVCS (2010).

- **Granulometría del agregado fino (MTC E 204)**

Esta prueba tiene como objetivo determinar cómo se distribuyen las partículas del agregado fino en función de su tamaño. Para ello, se utiliza un conjunto de tamices colocados de forma descendente, aplicados a una muestra seca y de peso previamente conocido.

Este procedimiento es fundamental para evaluar la gradación del material cuando se propone su uso como agregado fino en proyectos de construcción. Los resultados obtenidos permiten verificar si la distribución granulométrica cumple con los rangos establecidos por las especificaciones técnicas. Asimismo, proporcionan datos claves con el fin de supervisar la calidad a lo largo de la producción del agregado (MTC, 2016).

- **Gravedad específica y absorción de agregados finos (MTC E 205)**

La gravedad específica del agregado es la relación entre la densidad del agregado y la densidad del agua, lo que permite conocer cuán denso es el material respecto al agua.

Asimismo, la absorción indica el incremento de masa del agregado debido al agua que penetra en sus poros accesibles. Estos parámetros permiten calcular los vacíos presentes en mezclas con emulsión y ajustar la dosificación cuando hay variaciones en la gravedad específica.

En el procedimiento se coloca 500 gr de agregado fino en un frasco, se añade agua hasta los 500 cm³ y se agita manualmente o mecánicamente para eliminar vacíos de aire. Luego, la temperatura se regula a 23°C, se añade con agua hasta la marca y se pesa el conjunto. Finalmente, el agregado se somete a secado en horno hasta estabilizar su peso, tras lo cual se pesa nuevamente (MTC, 2016).

Fórmulas:

$$Pe_m = \frac{W_o}{(V - V_a)} * 100$$

Donde:

Pe_m = Peso específico medido de la masa del material.

W_o = Peso de la muestra en condición seca, obtenido tras el secado en horno (gr).

V = Volumen total del frasco utilizado para la medición (cm³).

V_a = Cantidad de agua agregada al frasco (gr o cm^3).

- Peso específico de la muestra en condición de saturación con superficie seca

(Pe_{SSS}):

$$Pe_{SSS} = \frac{500}{(V - V_a)} * 100$$

- Peso específico aparente (Pe_a):

$$Pe_a = \frac{W_o}{(V - V_a) - (500 - W_o)} * 100$$

- Absorción (A_b):

$$A_b = \frac{500 - W_o}{(W_o)} * 100$$

- **Durabilidad al sulfato de magnesio en el agregado fino (MTC E 209)**

El objetivo de la prueba es medir cómo el agregado resiste la desintegración cuando se expone a sulfato de magnesio en solución saturada.

El procedimiento implica exponer el agregado fino a la acción de dicha solución durante un periodo controlado, que debe estar entre 16 y 18 horas y posterior secado a 110°C , repitiendo este proceso el número de veces que sean necesarios, asegurando así que la muestra permanezca completamente sumergida. Esta prueba permite medir el nivel de deterioro que el material puede sufrir ante agentes químicos agresivos (MTC, 2016).

- **Sales solubles en el agregado fino (MTC E 219)**

Esta prueba se emplea para determinar la existencia de sales solubles (cloruros y sulfatos), que podrían influir en la durabilidad de la mezcla y en la adhesión del asfalto al agregado. Estas sales pueden causar reacciones químicas perjudiciales.

En el procedimiento se pesan 100 gr de agregado fino y coloca en un vaso de precipitados con agua destilada, asegurando que quede cubierta por unos 3 cm de agua. Esta mezcla se calienta hasta hervir, removiéndolo constantemente. Luego se deja enfriar y sedimentar hasta obtener una solución clara. El líquido sobrenadante se divide en dos tubos de ensayo, agregando 6 gotas de cloruro de bario en uno y 6 gotas de nitrato de plata en el otro. La aparición de precipitados indica presencia de sales solubles. Si se detectan, se repite

el procedimiento hasta que ya no se observen (MTC, 2016).

- **Equivalente de arena en agregado fino (MTC E 114)**

El procedimiento permite determinar la relación entre la altura de la arena y la de los materiales finos, como limos y arcillas, después de un periodo de sedimentación, utilizando una solución que facilita la suspensión de las partículas más finas mientras la arena se asienta más rápidamente.

Esta prueba permite determinar el contenido de arcilla presente en una muestra de arena. Primero la muestra se introduce dentro de una probeta graduada y se le añade una solución, que ayuda a desprender las partículas de arcilla que están adheridas a los granos de arena. Luego se agita bien la mezcla y se agrega más solución para que la arcilla quede flotando y la arena se asiente en el fondo. Después de dejar reposar la mezcla por un tiempo, se observa cómo la arena permanece en la parte inferior y la arcilla forma una capa encima. Finalmente, se miden las alturas de la arena y de la arcilla, y con esos datos se calcula el equivalente de arena (Castillo, 2021).

Fórmula:

$$E.A. = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} * 100$$

- **Angularidad del agregado fino (MTC E 222)**

Es un indicador indirecto de la textura y forma de sus partículas. Mide el grado de irregularidad o aristas marcadas que estas presentan. Este parámetro influye de manera directa en la manejabilidad, la capacidad resistente y estabilidad mecánica de las mezclas asfálticas, ya que partículas más angulares favorecen la interconexión y aumentan la fricción interna dentro del material mezclado.

El ensayo inicia con la selección de la arena apropiada, correspondiente a la que atraviesa el tamiz N°8 (2.36 mm) pero queda retenida en el tamiz N°200 (0.075 mm). Esto asegura que el material esté dentro del tamaño que se necesita para el ensayo.

Luego se determina la gravedad específica bruta (G_{sb}) de esa arena, que sirve para conocer su densidad en relación con el agua.

Después se coloca la arena en un embudo y se deja caer dentro de un cilindro que tiene un volumen exacto. Se llena hasta que la arena rebose (salga un poco).

A continuación, se enrasa (se retira el exceso para que quede al ras del borde del cilindro) y se pesa la cantidad de arena que quedó adentro (MTC, 2016).

- Límites de Atterberg (MTC E 110-111):

Los límites de Atterberg permiten evaluar el comportamiento del material fino frente a distintos niveles de humedad. Incluyen el límite líquido (LL), el cual señala la transición del estado plástico al líquido y el límite plástico (LP), que indica el cambio de estado de plástico a semisólido.

Se realizan ensayos con el material que pasa las mallas N°40 y N°200, destacando la importancia de esta última en mezclas asfálticas, dado que un exceso de finos plásticos puede comprometer su estabilidad y durabilidad.

En el ensayo de LL, se prepara una pasta mezclando agua con el material fino, la cual se deposita en la copa de Casagrande y se deja caer hasta que el surco se cierre a los 25 golpes. En el LP, se forman rollitos de 3 mm de diámetro y se identifica el punto en que el material comienza a desmoronarse. Los resultados permiten verificar si el contenido de finos cumple con la normativa vigente para un adecuado comportamiento de la mezcla asfáltica.

Se calcula el índice de plasticidad (IP) restando el límite plástico (LP) al límite líquido (LL), de acuerdo con:

$$IP = LL - LP$$

Lo cual sirve para clasificar el comportamiento plástico del material fino presente en el agregado (MTC, 2016).

Ensayos de laboratorio para el diseño de MAC

Se detallan a continuación los ensayos correspondientes:

- Ensayo Marshall (MTC E 504)

Es un ensayo que permite determinar parámetros volumétricos como el PU, VA y VMA, fundamentales para evaluar la compactación y calidad de la mezcla. Asimismo, evalúa la estabilidad y el flujo, indicadores de la capacidad de la mezcla para resistir deformaciones

al ser sometida a carga (MTC, 2016).

Figura 21

Criterios exigidos para la MAC

Parámetro de Diseño	Clase de Mezcla		
	A	B	C
Marshall MTC E 504			
1. Compactación, número de golpes por lado	75	50	35
2. Estabilidad (mínimo)	8,15 kN	5,44 kN	4,53 kN
3. Flujo 0,01" (0,25 mm)	8-14	8-16	8-20
4. Porcentaje de vacíos con aire (1) (MTC E 505)	3-5	3-5	3-5
5. Vacíos en el agregado mineral	Ver tabla 423-10		
Inmersión – Compresión (MTC E 518)			
1. Resistencia a la compresión Mpa mín.	2,1	2,1	1,4
2. Resistencia retenida % (mín.)	75	75	75
Relación Polvo – Asfalto (2)	0,6-1,3	0,6-1,3	0,6-1,3
Relación Estabilidad/flujo (kg/cm) (3)	1.700-4.000		
Resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta AASHTO T 283	80 Mín.		

Nota. La imagen muestra los criterios exigidos para la MAC, incluyendo parámetros de los ensayos Marshall. Tomado del MTC (2015).

- Ensayo Lottman (MTC E 522)

Este ensayo facilita la evaluación de la resistencia a la tracción indirecta (ITS) de mezclas asfálticas, tanto en estado seco como en estado húmedo. Con estos valores se obtiene el índice de la resistencia al daño inducido por humedad (TSR), el cual refleja la capacidad de la mezcla para resistir el daño por humedad. Un TSR alto indica buena resistencia y durabilidad frente al agua (MTC, 2016).

- Ensayo Cántabro (MTC E 515)

Este ensayo permite medir la capacidad de las mezclas asfálticas para resistir el desgaste debido a la pérdida de material por fricción. También evalúa la capacidad de las probetas compactadas para soportar la acción mecánica sin desintegrarse, simulando condiciones de servicio en las que el material está sometido a esfuerzos de abrasión. El procedimiento se lleva a cabo utilizando el equipo de abrasión los Ángeles, adaptado sin las cargas abrasivas (esferas de acero) (MTC, 2016).

3.3 Definición de términos

Abrasión: Desgaste mecánico de agregados y rocas resultante de la fricción e impacto (MTC, 2018).

Adhesión: Adhesión se entiende como la propiedad del asfalto que le permite fijarse y adherirse a los agregados presentes en la mezcla (Silvestre, 2017).

Agregado fino: Es un material obtenido de la fragmentación natural o artificial de partículas, cuya granulometría se define según las especificaciones técnicas establecidas. Generalmente, atraviesa la malla N°4 de 4.75 mm e incluye una proporción de finos (MTC, 2018).

Agregado grueso: Es un material resultante de la fragmentación natural o artificial de partículas, cuya granulometría se establece según las especificaciones técnicas. Usualmente, queda retenido en la malla N°4 de 4.75 mm (MTC, 2018).

Agregado pétreo: Es un material de origen rocoso que se emplea con mínimas modificaciones. Se presenta en macizos o depósitos con fragmentos de diversos tamaños, como arena y grava. Puede ser natural o procesado y se utiliza principalmente en la construcción (Olguín, 2016).

Asfalto: Material aglutinante de tonalidad negra o marrón, formado fundamentalmente por betunes, los cuales pueden provenir de fuentes naturales o generados mediante procesos de refinación petrolera. El asfalto está presente en diferentes concentraciones dentro de los crudos petrolíferos (MTC, 2018).

Cohesión: Hace referencia a la resistencia del asfalto ya endurecido para conservar firmemente unidas las partículas que conforman el pavimento (Silvestre, 2017).

Consistencia: Está relacionada con la temperatura, ya que a temperaturas elevadas adquiere una consistencia que permite su definición o moldeo (Silvestre, 2017).

Daño por humedad: Esta relacionado con la cohesión, entendida como la resistencia interna del asfalto y con la adhesión que se refiere a la fuerza de unión entre el asfalto y los agregados (Cheng, 2002, como se citó en Mariano, 2021).

Deformación: Es el cambio en las dimensiones de un cuerpo debido a tensiones internas

causadas por fuerzas externas, pudiendo afectar las distintas capas del pavimento (Delgado, 2021).

Desgaste: Es el deterioro de una superficie sólida causado por factores ambientales, fricción, rodadura o impacto con otra superficie (Antala, 2021).

Durabilidad: Se refiere a la capacidad del asfalto de conservar sus propiedades frente a fenómenos de degradación o deterioro (Silvestre, 2017).

Endurecimiento: El asfalto se endurece por oxidación, sobre todo a alta temperatura (Silvestre, 2017).

Elasticidad: Es la propiedad del asfalto que le permite recuperar su forma inicial tras la aplicación de una fuerza o carga (Silvestre, 2017).

Filler: También denominado polvo mineral, representa la fracción más fina del agregado pétreo, la cual atraviesa el tamiz N°200, conforme a lo establecido por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), bajo la normativa ASTM D 2487. Este material suele ser de origen natural, generalmente derivado de la descomposición de rocas o de residuos calizos pulverizados, y se emplea principalmente en la producción de MAC (Rodríguez, 2004)

Granulometría: Es la clasificación del árido según el tamaño de sus partículas, determinada mediante su separación con tamices (García et al., 2009).

Mezcla asfáltica: Se trata de una mezcla uniforme de materiales pétreos y un aglutinante asfáltico, utilizada principalmente sobre la capa de rodadura en los pavimentos. También se le conoce como aglomerado, debido a su composición de materiales pétreos unidos por el asfalto (Vizcarra, 2016).

Mezcla asfáltica modificada: Las mezclas asfálticas convencionales tienen limitaciones para resistir el tráfico pesado y los cambios climáticos. Por ello, se han desarrollado ligantes mejorados que optimizan la adherencia, la durabilidad y la resistencia a la humedad. La modificación se realiza durante el proceso de fabricación, mediante la adición de aditivos específicos al asfalto, lo que permite mejorar sus propiedades (Cáceres, 2024).

Peso específico: Se define como la proporción entre el peso de una sustancia y el volumen que ocupa. Se obtiene al dividir el peso de una muestra por su volumen (Aliaga, 2020).

Porosidad: Capacidad de un material que se distingue por contener espacios vacíos dentro de su estructura (MTC, 2018).

Susceptibilidad: Se refiere a algo que puede ser alterado o influenciado por factores externos o por la acción de alguien (Mariano, 2021).

Susceptibilidad térmica: El asfalto cambia con la temperatura, se ablanda cuando se expone al calor y adquiere mayor rigidez al enfriarse (Silvestre, 2017).

Tracción indirecta: Es el estado de tensiones que se genera en la fibra inferior de una capa asfáltica debido a esfuerzos de tracción. Este fenómeno permite evaluar el comportamiento y las propiedades de las mezclas bituminosas ante cargas aplicadas (Garrote, 2006).

Viscosidad: Es la medida de su resistencia a moverse. Es decir, es la fuerza interna que tiene el asfalto que le impide fluir o deformarse fácilmente cuando algo lo empuja (Silvestre, 2017).

IV. Metodología

4.1. Tipo y nivel de investigación

Tipo de investigación

Se aplicó un estudio de tipo aplicada.

Según Hernández et al. (2014), es aplicada cuando busca resolver problemas prácticos mediante la aplicación del conocimiento científico.

Nuestra tesis fue de tipo aplicada, ya que buscó evaluar la incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20% y 23% en las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente, con el fin de proponer mejoras prácticas para su uso en obras viales.

Nivel de investigación

El nivel fue explicativo.

De acuerdo con Hernández et al. (2014), los estudios explicativos buscan ir más allá de la simple descripción o relación entre conceptos, ya que su propósito es identificar los factores que originan los fenómenos, tanto en el ámbito físico como en el social. Su objetivo principal es comprender por qué ocurren ciertos eventos y bajo qué circunstancias se presentan, así como analizar la conexión entre ellos considerando diversas variables.

Esta tesis se enmarcó en el nivel explicativo, ya que buscó explicar de qué manera la adición de polvo de hierro fundido afectó las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla asfáltica, identificando las condiciones en las cuales dicha incorporación mejoró o deterioró el comportamiento del material.

Diseño de la investigación

El diseño adoptado fue el experimental.

Baena (2017) sostiene que el diseño experimental se representa a través de la alteración de variables experimentales no probadas sometidas a situaciones controladas para demostrar ciertos eventos.

Nuestra tesis fue de diseño experimental, ya que se modificaron deliberadamente las proporciones de polvo de hierro fundido (17%, 20% y 23%) en la mezcla asfáltica en caliente, bajo condiciones controladas, para observar y demostrar su efecto sobre las propiedades

físicas y mecánicas mediante la alteración de variables experimentales.

4.2. Ámbito temporal y espacial

Ámbito temporal

Esta tesis se ejecutó desde febrero hasta julio del 2025.

Ámbito espacial

Esta tesis se llevó a cabo en la ciudad de Abancay.

4.3. Población y muestra

Población

Martínez (2012) define una población como un grupo de elementos que comparten rasgos o atributos similares, y del cual se extrae una muestra para ser analizada.

La población en nuestra tesis estuvo integrada por probetas cilíndricas elaboradas con mezcla asfáltica en caliente PEN 60/70, tanto convencionales como modificadas con polvo de hierro fundido, elaboradas mediante el método Marshall. Esta población compartió características comunes relacionadas con su uso en pavimentos flexibles.

Muestra y tipo de muestreo

Para establecer la muestra, se empleó el muestreo no probabilístico por conveniencia.

López (2004) sostiene que una muestra es una fracción representativa de la población, la cual se utiliza para llevar a cabo el estudio, ya que refleja las características del conjunto total.

Hernández (2021) indica que el muestreo no probabilístico según criterios de conveniencia implica elegir los elementos que integrarán la muestra según lo que resulte más práctico para el investigador, quien tiene la libertad de determinar cuántos elementos formarán parte del estudio.

En este caso, la selección de la muestra se llevó a cabo mediante un muestreo no probabilístico basado en conveniencia, considerando la disponibilidad de materiales en Abancay y el cumplimiento de protocolos técnicos establecidos en el Manual de Ensayo de Materiales del 2016, las Especificaciones Técnicas Generales para Construcción del 2015 y la Norma Técnica CE 010 de Pavimentos Urbanos del 2010.

Composición de la muestra

La muestra estuvo integrada por 69 probetas cilíndricas compactadas en laboratorio para mezclas asfálticas. Las probetas fueron clasificadas en dos grupos:

Grupo 1, correspondiente a la determinación del contenido óptimo de asfalto, estuvo conformado por 21 probetas, correspondientes a siete niveles de dosificación evaluados (4.0; 4.5; 5.0; 5.5; 6.0; 6.5 y 7.0 %), con tres repeticiones por cada nivel.

Grupo 2, correspondiente a la evaluación de mezclas modificadas y patrón, estuvo compuesto por 48 probetas, con tres repeticiones para cada ensayo y tratamiento, distribuidas de la siguiente manera:

- Muestra patrón: 12 probetas.
- 17% de polvo de hierro fundido: 12 probetas.
- 20% de polvo de hierro fundido: 12 probetas.
- 23% de polvo de hierro fundido: 12 probetas.

Tabla 2

Número de probetas utilizadas con el fin de determinar el contenido óptimo de asfalto (grupo 1)

Cálculo del contenido óptimo de asfalto (Método Marshall)				
Incorporación de asfalto	R - 1	R - 2	R - 3	N° de probetas
4%	1	1	1	3
4.5%	1	1	1	3
5%	1	1	1	3
5.5%	1	1	1	3
6%	1	1	1	3
6.5%	1	1	1	3
7%	1	1	1	3
Total de probetas				21

Nota. La tabla presenta la planificación del número de probetas elaboradas y ensayadas con el fin de determinar el contenido óptimo de asfalto en la mezcla.

Tabla 3

Número de probetas utilizadas en los ensayos (grupo 2)

Mezclas asfálticas modificadas mediante la adición de polvo de hierro fundido													N° de probetas
Ensayos	Porcentajes de incorporación de polvo de hierro fundido												
	Patrón	R - 1			R - 2				R - 3				
		17%	20%	23%	Patrón	17%	20%	23%	Patrón	17%	20%	23%	
Marshall (Parámetros volumétricos)													
Marshall (Resistencia a la deformación)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12
Lottman (Resistencia a la tracción indirecta)													
Lottman (Resistencia al daño inducido por humedad)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	24
Cántabro (Resistencia al desgaste)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12
TOTAL DE PROBETAS													48

Nota. La tabla indica el número de probetas empleadas en cada uno de los ensayos, considerando mezclas con y sin adición de polvo de hierro fundido.

4.4. Instrumentos

Se empleó como instrumento la ficha de registro de datos.

Las fichas funcionan como instrumentos que permiten registrar información, identificar las fuentes de los datos y organizar su almacenamiento (Castro, 2018).

El registro de datos se llevó a cabo utilizando fichas y formatos estandarizados con el fin de registrar la información primaria, siguiendo lo establecido en el Manual de Ensayo de Materiales del 2016, las Especificaciones Técnicas Generales para Construcción del 2015 y la Norma Técnica CE 010 de Pavimentos Urbanos del 2010, complementados con normas nacionales e internacionales aplicables.

Estos instrumentos facilitaron la organización sistemática de los resultados obtenidos en los ensayos (Marshall, Lottman y Cántabro), garantizando la trazabilidad de los datos mediante la identificación de las fuentes, las condiciones experimentales y los parámetros evaluados.

Las fichas sirvieron como herramientas estructuradas para el registro y almacenamiento de la información relacionada con las propiedades físicas (parámetros volumétricos) y mecánicas (resistencia a la deformación, ITS, TSR y resistencia al desgaste), facilitando su análisis y validación estadística sin alterar el contenido ni la metodología utilizada.

4.5. Procedimientos

Para validar las hipótesis específicas de esta tesis, se emplearon pruebas estadísticas que se eligieron con base en los supuestos de normalidad y la homogeneidad de varianzas, conforme al diseño experimental propuesto.

En primer lugar, la normalidad de los datos se evaluó mediante la prueba de Shapiro-Wilk, que se recomienda para muestras de tamaño pequeño y mediano (Dagnino, 2014). Posteriormente, cuando los datos presentaron distribución normal, se comprobó la homogeneidad de varianzas con las pruebas de Bartlett y Levene, lo que permitió confirmar la validez del análisis paramétrico. Una vez cumplidos estos criterios, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor con el fin de determinar la existencia de diferencias

estadísticamente significativas entre los tratamientos: mezcla patrón y mezclas con 17%, 20% y 23% de polvo de hierro fundido. Cuando el ANOVA arrojó diferencias significativas, se empleó la prueba Tukey, con el fin de identificar los niveles específicos de incorporación en los que se presentaron dichas diferencias.

Los datos fueron procesados a través de RStudio y Microsoft Excel, utilizados como herramientas auxiliares para organizar y analizar los resultados.

En los casos en que el supuesto de normalidad no se cumplió, como en la evaluación de la resistencia al daño inducido por la humedad (TSR), se aplicaron métodos no paramétricos. Específicamente, se utilizó la prueba de Kruskal Wallis para comprobar si existían diferencias significativas en los datos de los tratamientos en conjunto, seguido de la prueba de Dunn para efectuar comparaciones múltiples sin asumir normalidad.

De esta manera, la combinación de pruebas paramétricas y no paramétricas permitió asegurar un análisis estadístico riguroso y fiable, lo que validó las conclusiones sobre el efecto que la incorporación del polvo de hierro fundido tuvo en las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente.

4.6. Análisis de datos

La recolección de datos fue prolectiva.

Según Medina et al. (2011), es prolectiva cuando la información se obtiene al mismo tiempo que ocurren los hechos o intervenciones y se generan sus resultados.

La recolección de datos en esta tesis se realizó de manera prolectiva, ya que la información fue registrada en el mismo momento en que se llevaban a cabo los procedimientos experimentales y se obtenían los resultados. Es decir, los datos no provienen de registros pasados ni de predicciones futuras, sino que se generaron y registraron los resultados obtenidos durante la realización de los ensayos en probetas con adición de polvo de hierro fundido en proporciones de 17%, 20% y 23%, así como a la probeta sin incorporación (patrón).

4.7. Consideraciones éticas

La presente tesis se desarrolló siguiendo los lineamientos estipulados en el Artículo

10° del Reglamento de Investigación, versión 6.0, de la Universidad Tecnológica de los Andes, el cual fomenta el respeto por la normativa ética, tanto nacional como internacional, y asegura el cumplimiento del Reglamento de Propiedad Intelectual.

Esta tesis se desarrolló con responsabilidad académica, asegurando la veracidad de los datos obtenidos, el uso adecuado de fuentes bibliográficas y el respeto a la propiedad intelectual. Asimismo, se procuró cumplir con las normas técnicas vigentes aplicables dentro del ámbito de la ingeniería civil, garantizando una investigación transparente y honesta (Universidad Tecnológica de los Andes [UTEA], 2019)

V. Resultados y discusión

5.1. Resultados

5.1.1. Recolección de datos

El desarrollo de esta tesis se realizó mediante una serie de procedimientos planificados de manera sistemática, tomando como referencia investigaciones previas sobre la adición de polvo de hierro fundido en mezclas asfálticas en caliente, con el objetivo de analizar sus propiedades físicas y mecánicas. A continuación, se detallaron los procedimientos ejecutados y los resultados obtenidos.

5.1.1.1 Polvo de hierro fundido

El polvo de hierro fundido utilizado fue recolectado en distintos talleres de tornería y soldadura ubicados a lo largo de la avenida Panamericana, en las inmediaciones de la comisaría PNP Bellavista. El material fue almacenado en un saco para facilitar su transporte y posterior manipulación en laboratorio. Posteriormente, se realizó un análisis granulométrico utilizando tamices desde la malla N°4 en adelante, con el objetivo de eliminar impurezas y garantizar una distribución de partículas adecuada. Se seleccionó únicamente el material que pasó por la malla N°200, ya que este fue el utilizado en las dosificaciones para los ensayos correspondientes.

Tabla 4

Granulometría del polvo de hierro fundido

Análisis granulométrico de polvo de hierro fundido			
Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	Cantidad retenida (%)
N°40	0.43	21413.7	20.8%
N°80	0.18	39891.9	38.7%
N°200	0.075	30869.1	30.0%
< N°200	-	10835.6	10.5%
TOTAL	-	103010.30	100%

Nota. La tabla presenta la granulometría del polvo de hierro fundido, mostrando el porcentaje de material retenido en los diferentes tamices.

5.1.1.2 Asfalto

El material utilizado provino de PETROPERÚ, cuyas características se presentaron

en la tabla 5. Se seleccionó el asfalto tipo PEN 60/70, ya que la MAC fue diseñada para su aplicación en la región Apurímac, donde la temperatura promedio es de 16°C y la altitud alcanza los 2377 m. s. n. m.

Tabla 5

Características técnicas del asfalto tipo PEN 60/70

Ensayos	Und.	Método		Especificaciones	
		ASTM	AASHTO	Mín.	Máx.
Penetración retenida					
* Condiciones: 25 °C, 5 s, 100 g, 0.1 mm	dmm	D-5	T-49	60	70
Propiedades de volatilización					
* Temperatura de ignición Cleveland, copa abierta	°C	D-92	T-48	232	
* Densidad relativa a 15.6/15.6°C	-	D-70	T-228	Reportar	
* Medición de la ductilidad efectuada a 25°C, 5 cm/min	cm	D-113	T-51	100	
* Solubilidad en tricloroetileno	%	D-2042	T-44	99	
Sensibilidad a la temperatura					
* Reducción por calentamiento	%	D-6	T-47		0.8
* Penetración residual	%	D-5	T-49	52+	
* Medición de la ductilidad efectuada a 25°C, 5 cm/min	cm	D-113	T-51	50	
* Coeficiente de sensibilidad térmica	-		Francés RLB	-1	1
Viscosidad					
* Viscosidad cinemática (100°C)	cSt	D-2170	T-201	Reportar	
* Viscosidad cinemática (135°C)	cSt	D-2170	T-201	200	

Nota. La tabla detalla las características técnicas del asfalto tipo PEN 60/70, mostrando los métodos de prueba (ASTM, AASHTO) y las especificaciones mínimas y máximas que debe cumplir el material. Tomado del "Análisis de laboratorio del asfalto producido por PETROPERÚ".

5.1.1.3 Agregado grueso

En el diseño de la mezcla asfáltica se utilizó grava chancada como agregado grueso, proveniente de la cantera Murillo. Parte de los ensayos de caracterización del material se realizaron en los laboratorios de nuestra universidad; sin embargo, debido a la necesidad de equipos específicos, se complementaron algunos análisis en laboratorios externos acreditados, asegurando el cumplimiento de los estándares requeridos.

La evaluación de este agregado se realizó siguiendo lo dispuesto en las

Especificaciones Técnicas Generales para Construcción del 2015 (cuyos resultados se apreciaron en las figuras 9 y 10) y en la Norma Técnica CE 010 de Pavimentos Urbanos del 2010 (presentada en las figuras 11, 12 y 13), cumpliendo con los criterios técnicos indicados en la MAC.

Tabla 6*Características técnicas del agregado grueso*

Ensayos	Normas / Requerimientos							
	Norma	Condición	Norma	Condición	Norma	Condición	Norma	Condición
	MTC	≤ 3000 (msnm)	ASTM	≤ 3000 (msnm)	AASHTO	≤ 3000 (msnm)	NTP	≤ 3000 (msnm)
Peso específico y absorción	E 206	1% máx.	C 127	1% máx.	T 85	2% máx.	400.021:2002	0.01
Durabilidad al sulfato de magnesio	E 209	18% máx.	C 88	-	T 104	-	400.016:1999	18% máx.
Sales solubles	E 219	0.5% máx.	-	-	T 260	-	339.152:2002	0.5% máx.
Abrasión los Ángeles al desgaste	E 207	40% máx.	C 131	40% máx.	T 96	30% máx.	400.019:2002	40% máx.
Porcentaje de caras fracturadas	E 210	85/50	D 5821	100/90	T 335	-	-	-
Índice de aplanamiento y alargamiento	E 221	10% máx.	D 4791	15% máx.	-	-	-	-
Adherencia	E 517	95 %	D 1664	-	-	-	-	-

Nota. La tabla detalla las propiedades del agregado grueso, junto con los ensayos aplicados y los criterios normativos correspondientes (MTC, ASTM, AASHTO, NTP) que el agregado debe cumplir.

En esta tesis, el agregado grueso utilizado provino de la cantera Murillo y estuvo conformado en su totalidad por grava chancada.

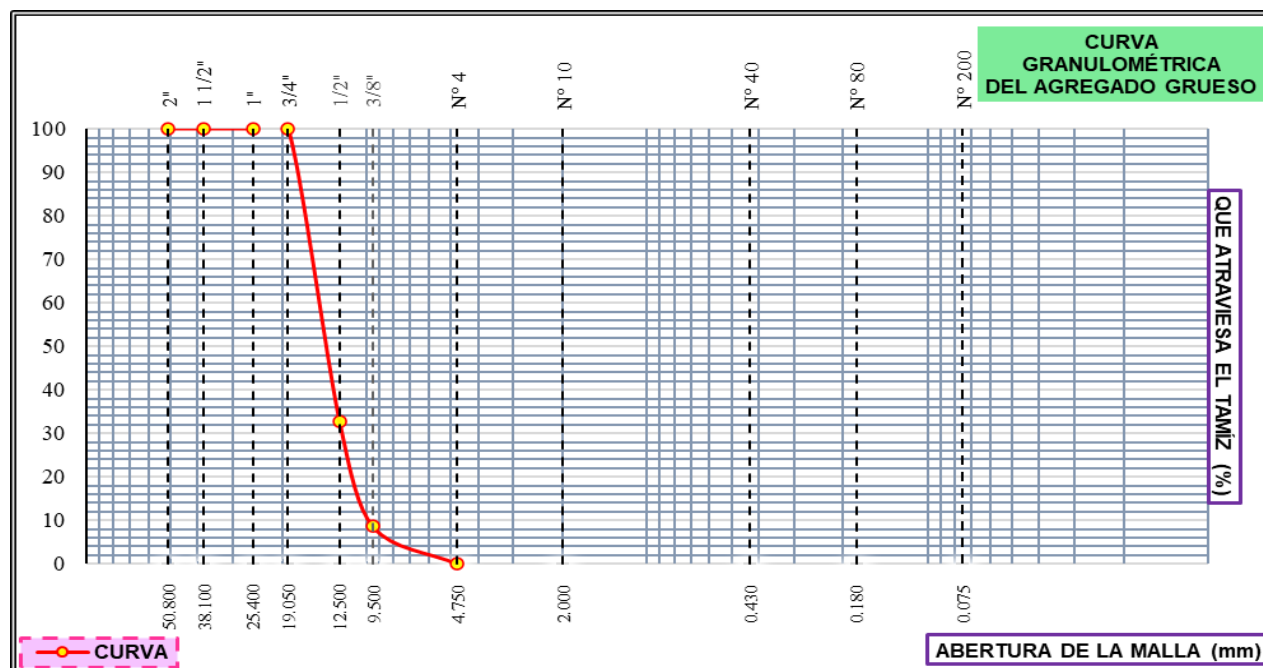
Tabla 7

Distribución granulométrica del agregado grueso con tamaño máximo de 3/4"

Malla	Tamaño de malla (mm)	Peso de material retenido (gr)	Cantidad retenida (%)	Total retenido (%)	Que atraviesa el tamiz (%)
3/4"	19.050	0.00	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.500	1718.8	67.3	67.3	32.7
3/8"	9.500	615.47	24.1	91.4	8.6
N°4	4.750	219.53	8.6	100.0	0.0
N°10	2.000	-	-	-	-
N°40	0.430	-	-	-	-
FONDO	0.000	0.00	0.0	0.0	0.0
TOTAL	-	2553.80	100.00	-	-

Nota. La tabla presenta la distribución granulométrica del agregado grueso, detallando el porcentaje de retención en cada tamiz para partículas de hasta 3/4".

Figura 11 *Granulometría del agregado grueso*



Nota. El gráfico representa la curva granulométrica correspondiente al agregado grueso, detallando el porcentaje de material que atraviesa los tamices según el tamaño de la malla.

Tabla 8*Criterios de aceptación de las características del agregado grueso*

Ensayos	Resultados	Normas / Requerimientos											
		Norma MTC	Condición ≤ 3000 (msnm)	Obs.	Norma ASTM	Condición ≤ 3000 (msnm)	Obs.	Norma AASHTO	Condición ≤ 3000 (msnm)	Obs.	Norma NTP	Condición ≤ 3000 (msnm)	Obs.
Peso específico y absorción	0.64%	E 206	1% máx.	Cumple	C 127	1% máx.	Cumple	T 85	2% máx.	Cumple	400.021:2002	1% máx.	Cumple
Durabilidad al sulfato de magnesio	5.51%	E 209	18% máx.	Cumple	C 88	-	-	T 104	-	-	400.016:1999	18% máx.	Cumple
Sales Solubles	0.07	E 219	0.5% máx.	Cumple	-	-	-	T 260	-	-	339.152:2002	0.5% máx.	Cumple
Abrasión los Ángeles al desgaste	23.64%	E 207	40% máx.	Cumple	C 131	40% máx.	Cumple	T 96	30% máx.	Cumple	400.019:2002	40% máx.	Cumple
Porcentaje de caras fracturadas	86.7/62.1	E 210	85/50 mín.	Cumple	D 5821	100/90 máx.	Cumple	T 335	-	-	-	-	-
Índice de aplanamiento y alargamiento	9.20%	E 221	10% máx.	Cumple	D 4791	15% máx.	Cumple	-	-	-	-	-	-
Adherencia	96%	E 517	95% mín.	Cumple	D 1664	-	-	-	-	-	-	-	-

Nota. La tabla muestra los ensayos de laboratorio del agregado grueso con las normas y requerimientos técnicos correspondientes (MTC, ASTM, AASHTO, NTP).

5.1.1.4 Agregado fino

El agregado fino fue obtenido de la cantera Vía de Evitamiento. Se realizaron diversos ensayos de caracterización en los laboratorios de nuestra universidad, y aquellos que requirieron instrumentos o condiciones especializadas fueron ejecutados en laboratorios externos. Esta combinación de recursos permitió completar todos los análisis necesarios conforme a los requerimientos técnicos.

La evaluación del agregado fino se basó en los lineamientos de las Especificaciones Técnicas Generales para Construcción del 2015, como se mostró en las figuras 21 y 23, y de la Norma Técnica CE 010 de Pavimentos Urbanos del 2010, como se mostró en la figura 22, correspondiente a agregados finos para MAC.

Tabla 9*Características del agregado fino*

Ensayos	Normas / Requerimientos							
	Norma	Condición	Norma	Condición	Norma	Condición	Norma	Condición
	MTC	≤ 3000 (msnm)	ASTM	≤ 3000 (msnm)	AASHTO	≤ 3000 (msnm)	NTP	≤ 3000 (msnm)
Gravedadespecífica y absorción	E 205	0.5% máx.	C 128	-	T 84	-	-	-
Durabilidad al sulfato de magnesio	E 209	-	C 88	-	T 104	15% máx.	400.016:199	-
Sales solubles	E 219	0.5% máx.		-	-	-	339.152:2002	0.5% máx.
Equivalencia de arena	E 114	60% mín.	D 2419	-	T 176	-	339.146:2000	50% mín.
Angularidad	E 222	30% mín.	C 1252	-	T 89	25% mín.	-	-

Nota. La tabla presenta los requisitos normativos (MTC, ASTM, AASHTO, NTP) para el agregado fino que debe cumplir.

En la tesis realizada, el agregado fino utilizado provino de la cantera Vía de Evitamiento y estuvo compuesto por arena chancada.

Tabla 10

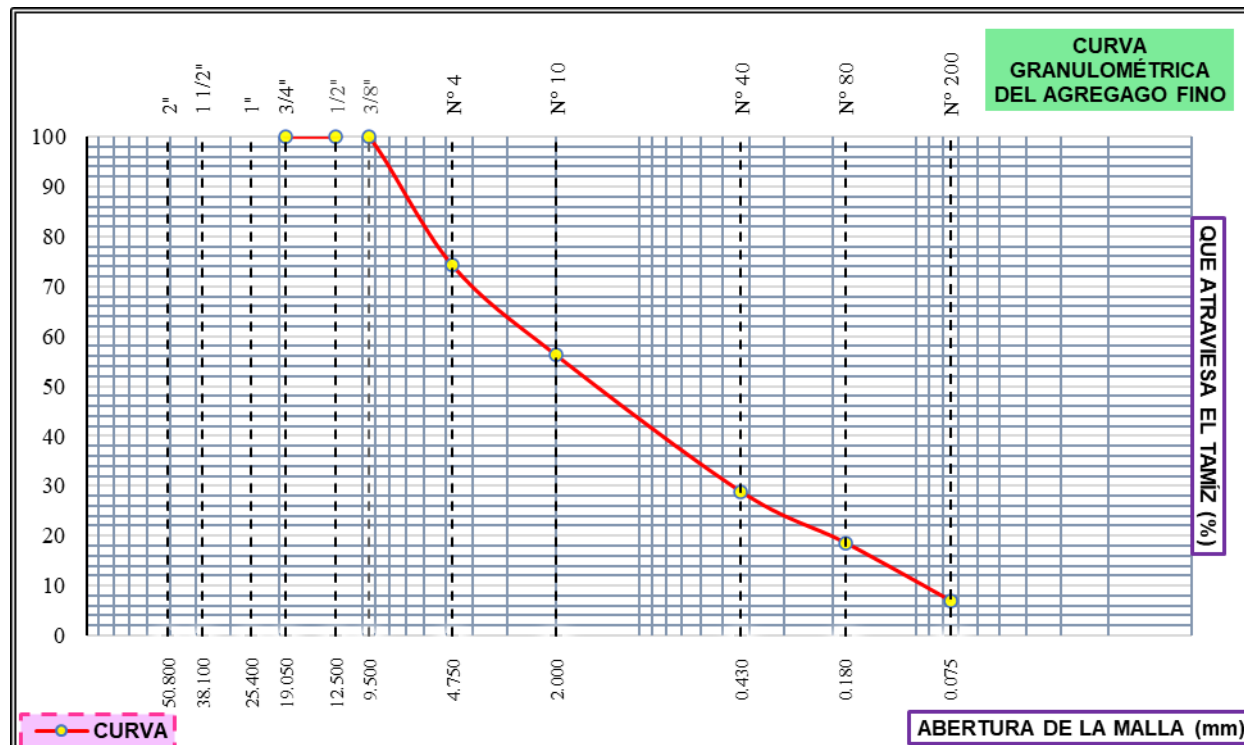
Distribución granulométrica del agregado fino

Malla	Tamaño de la malla (mm)	Peso de material retenido (gr)	Cantidad retenida (%)	Total retenido (%)	Porcentaje que pasa el tamiz (%)
3/8"	9.500	0.00	0.0	0.0	100.0
N°4	4.750	482.80	25.7	25.7	74.32
N°10	2.000	340.07	18.1	43.8	56.23
N°40	0.430	513.91	27.3	71.1	28.89
N°80	0.180	193.51	10.3	81.4	18.59
N°200	0.075	218.17	11.6	93.0	6.99
FONDO	0.000	131.34	7.0	100.0	-
TOTAL	-	1879.80	100.0	-	-

Nota. La tabla detalla la granulometría del agregado fino, mostrando el porcentaje de retención en los distintos tamices.

Figura 12

Curva granulométrica del agregado fino



Nota. El gráfico muestra la granulometría del agregado fino, detallando la fracción de material que atraviesa cada tamiz de acuerdo con su tamaño de malla.

Tabla 11*Criterios de aceptación de las características del agregado fino*

Ensayos	Resultados	Normas / Requerimientos											
		Norma MTC	Condición ≤ 3000 (msnm)	Obs.	Norma ASTM	Condición ≤ 3000 (msnm)	Obs.	Norma AASHTO	Condición ≤ 3000 (msnm)	Obs.	Norma NTP	Condición ≤ 3000 (msnm)	Obs.
Gravedad específica y absorción	0.44%	E 205	0.5% máx.	Cumple	C 128	-	-	T 84	-	-	-	-	-
Durabilidad al sulfato de magnesio	2.50%	E 209	-	-	C 88	-	-	T 104	15% máx	Cumple	400.016:199	-	-
Sales solubles	0.11%	E 219	0.5% máx.	Cumple	-	-	-	-	-	-	339.152:2002	0.5% máx.	Cumple
Equivalente de arena	66%	E 114	60% mín.	Cumple	D 2419	-	-	T 176	-	-	339.146:2000	50% mín.	Cumple
Angularidad	36.90%	E 222	30% mín.	Cumple	C 1252	-	-	T 89	25% mín.	Cumple	-	-	-

Nota. La tabla muestra los ensayos del agregado fino junto con sus criterios normativos correspondientes (MTC, ASTM, AASHTO, NTP).

5.1.1.5 Combinación de agregados gruesos y finos

La combinación de agregados se realizó siguiendo la clasificación MAC-1, correspondiente al diseño de mezclas asfálticas en caliente. Se utilizó asfalto de penetración 60/70, sobre el cual se determinó la dosificación óptima, detallada a continuación:

Tabla 12

Distribución de agregados basado en la MAC-1

Tipo de agregado	Cantidad (%)
Grava chancada (menor a ¾" - ½") - Cantera Murillo	34.00
Arena chancada (menor a 3/8") - Cantera Vía de Evitamiento	66.00
TOTAL	100.00

Nota. La tabla muestra la distribución porcentual de agregados, mostrando que la mezcla contiene 34% de grava chancada y 66% de arena chancada, conforme a la clasificación MAC-1.

Para la preparación de la mezcla asfáltica se utilizó agregado grueso procedente de la cantera Murillo y agregado fino de la cantera Vía de Evitamiento. Se comprobó que la cantidad de VA en la mezcla fuera la apropiada, alcanzando un valor de 4.62%, dentro de los rangos aceptables. Posteriormente, con base en la dosificación teórica establecida, se llevó a cabo la verificación experimental de la mezcla, integrando los agregados según las proporciones previamente calculadas.

Tabla 13

Combinación proyectada según la clasificación de MAC-1

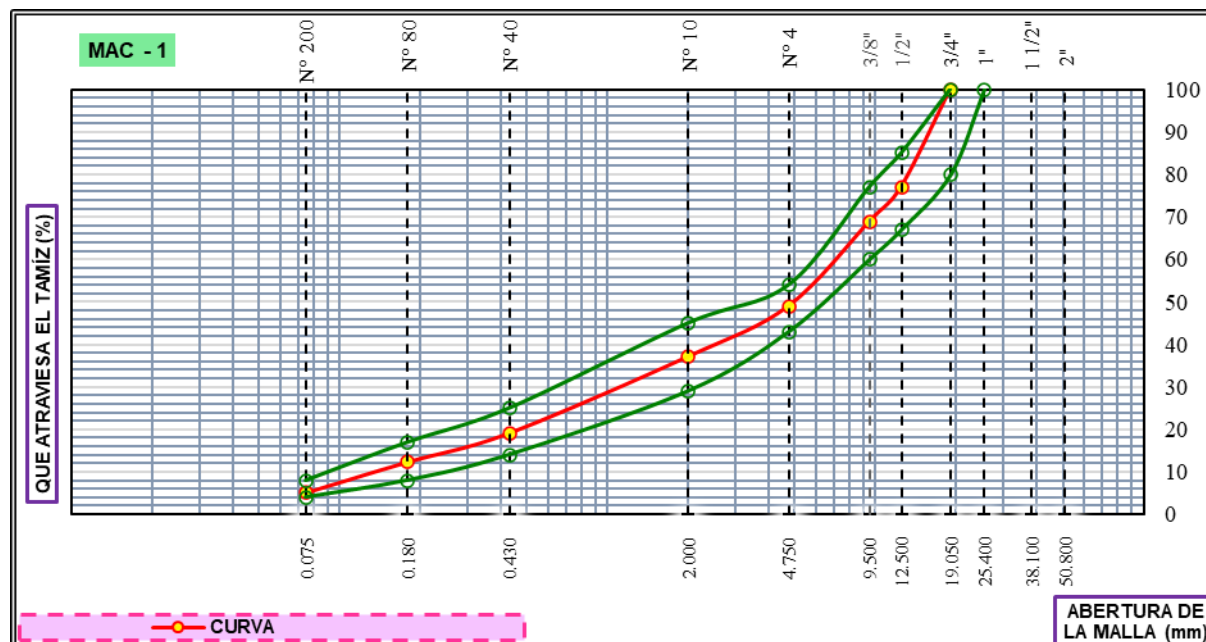
Tamiz (pulg)	Abertura (mm)	Grava Chancada	Arena Chancada	Mezcla MAC - 1 C. Proyectada	Criterio de aceptación MAC - 1		Verificación
		34% (< a 3/4" - 1/2")	66% (< a 3/8")		Valor mín.	Valor máx.	
1"	25.400	100.00	100.00	100.0	100.0	100.0	Cumple
3/4"	19.050	100.00	100.00	100.0	80.0	100.0	Cumple
1/2"	12.500	32.7	100.00	77.1	67.0	85.0	Cumple
3/8"	9.500	8.6	100.00	68.9	60.0	77.0	Cumple
N°4	4.750	0.0	74.32	49.0	43.0	54.0	Cumple
N°10	2.000	0.0	56.23	37.1	29.0	45.0	Cumple
N°40	0.430	0.0	28.89	19.1	14.0	25.0	Cumple
N°80	0.180	0.0	18.59	12.3	8.0	17.0	Cumple
N°200	0.075	0.0	6.99	5.0	4.0	8.0	Cumple

Nota. La tabla muestra la combinación granulométrica prevista para la mezcla de agregados (34%

grava y 66% arena) y verifica que cumpla con los criterios de aceptación de la clasificación de MAC - 1.

Figura 13

Granulometría de combinación de agregados



Nota. El gráfico muestra que la curva granulométrica se ubica dentro de los límites de la clasificación MAC-1, confirmando que cumple con las especificaciones correspondientes.

5.1.1.6 Diseño de MAC-1 mediante la metodología Marshall

Según la normativa del MTC E 504, se utiliza el método Marshall para llevar a cabo el diseño de mezclas asfálticas en caliente de tipo convencional. Este procedimiento permite determinar los parámetros fundamentales, con el propósito de establecer la dosificación óptima de asfalto en la mezcla.

Para el proceso de diseño se utilizaron principalmente agregado grueso, agregado fino, asfalto y material de relleno (filler). Es importante precisar que tanto el asfalto como el 2% de filler (cemento portland tipo I) fueron empleados como sustitución parcial del agregado fino, manteniendo fija la cantidad de agregado grueso y filler, sin que estos fueran reemplazados en ninguna proporción.

Para llevar a cabo el diseño, se prepararon mezclas con siete contenidos de asfalto distintos: 4%, 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0%, 6.5% y 7.0%. Para cada contenido, se fabricaron tres probetas, y los resultados obtenidos fueron promediados.

Procedimiento aplicado en la elaboración de probetas y la determinación del contenido óptimo de asfalto:

En primer lugar, se seleccionaron cuidadosamente los materiales: agregados gruesos, finos, filler (cemento portland tipo I) y el asfalto. Luego, se realizó el diseño granulométrico para lograr una combinación adecuada de agregados, conforme a las especificaciones establecidas para mezclas en caliente.

Posteriormente, se definieron varias dosificaciones de asfalto, manteniendo constante la cantidad de agregado grueso y filler, y variando únicamente el contenido de asfalto. Para cada dosificación, se pesaron y se calentaron los agregados a 150°C, así como el asfalto, ajustando su temperatura según su viscosidad. Una vez que los materiales alcanzaron la temperatura requerida, se efectuó el mezclado hasta obtener una masa uniforme.

Con la mezcla lista, se procedió a llenar los moldes tipo Marshall y cada probeta fue compactada aplicando 75 golpes por cara mediante el martillo Marshall. Las probetas moldeadas se mantuvieron en reposo hasta que alcanzaron la temperatura ambiente, y posteriormente fueron desmoldadas para su respectiva evaluación. Finalmente, con los

resultados se identificó la dosificación que mejor cumplió con los parámetros requeridos, determinándose de esta manera la proporción óptima de asfalto en la mezcla.

Tabla 14

Dosificación empleada en porcentajes para el diseño convencional

Diseño de MAC convencional							
Asfalto	4.0%	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%
Grava chancada	34.0%	34.0%	34.0%	34.0%	34.0%	34.0%	34.0%
Arena chancada	60.0%	59.50%	59.0%	58.5%	58.0%	57.5%	57.0%
Filler	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%

Nota. La tabla resume la proporción de materiales considerada en el diseño convencional de la mezcla asfáltica, indicando los contenidos de asfalto (del 4% al 7%), así como de grava, arena y filler.

Tabla 15

Resultados obtenidos del diseño de la mezcla asfáltica convencional mediante el método Marshall

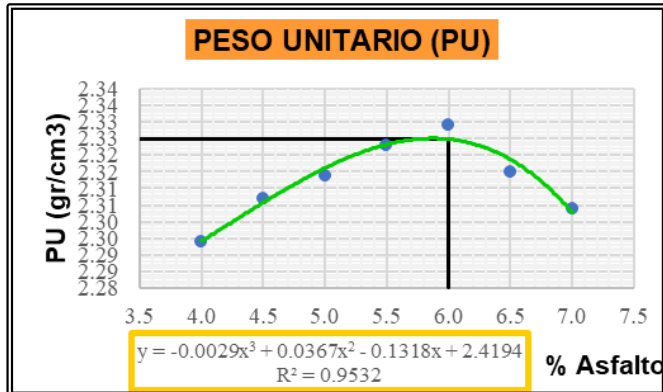
Indicadores	Und.	Contenido de asfalto (%)						
		4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50	7.00
PU	gr/ cm ³	2.29	2.31	2.31	2.32	2.33	2.32	2.30
VA	%	8.90	7.80	7.10	5.10	4.40	4.99	4.90
VMA	%	22.10	20.50	21.60	21.50	20.52	21.20	22.49
VFA	%	58.04	62.47	67.27	71.60	79.91	77.10	79.00
Estabilidad	kg	950.40	1138.96	1420.33	1711.10	1288.50	1016.00	1301.50
Flujo	mm	2.50	3.00	3.50	3.70	3.50	4.00	3.99
Rigidez	kg/cm	3940.00	3780.00	3605.00	3410.00	3316.00	3252.00	2910.00

Nota. La tabla presenta los resultados de los ensayos Marshall realizados a la mezcla asfáltica convencional, indicando los valores de estabilidad, flujo y rigidez para contenidos de asfalto entre 4% y 7%.

Los resultados obtenidos mediante el método Marshall para la MAC convencional fueron representados gráficamente en cada parámetro evaluado, y dichos gráficos se muestran en las figuras 27, 28, 29, 30, 31, 32 y 33.

Figura 25

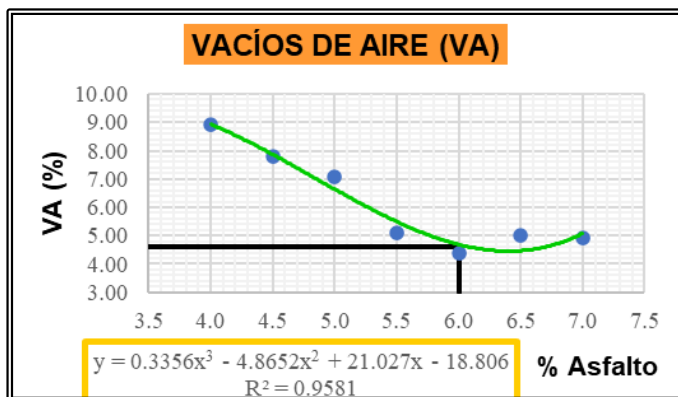
Comportamiento del PU en función al contenido de asfalto



Nota. El gráfico muestra cómo varían los PU en función del porcentaje de asfalto.

Figura 26

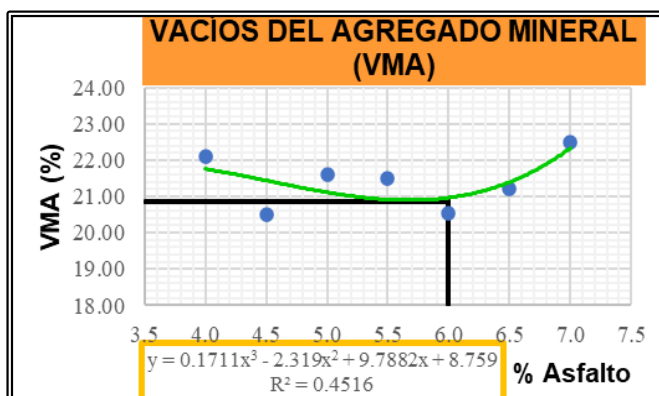
Comportamiento de los VA en relación con el porcentaje de asfalto



Nota. El gráfico muestra la variación de los VA según la cantidad de asfalto.

Figura 27

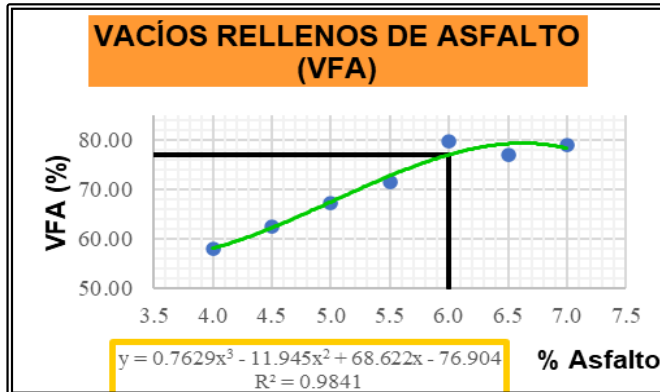
Variación del VMA respecto al contenido de asfalto



Nota. La figura presenta la relación entre el VMA y la cantidad de asfalto.

Figura 28

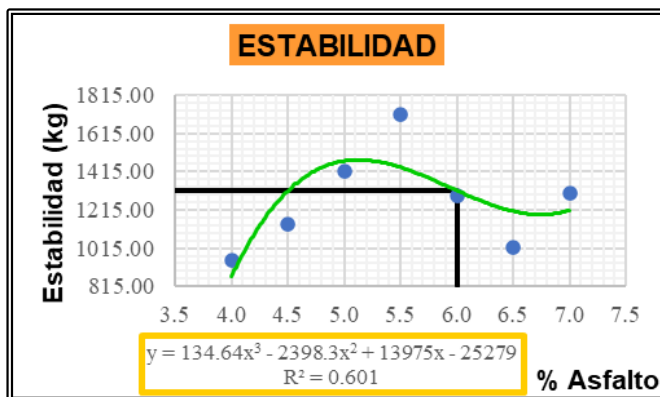
Comportamiento de los VFA según la dosificación de asfalto



Nota. El gráfico muestra la variación de los VFA según la cantidad de asfalto.

Figura 29

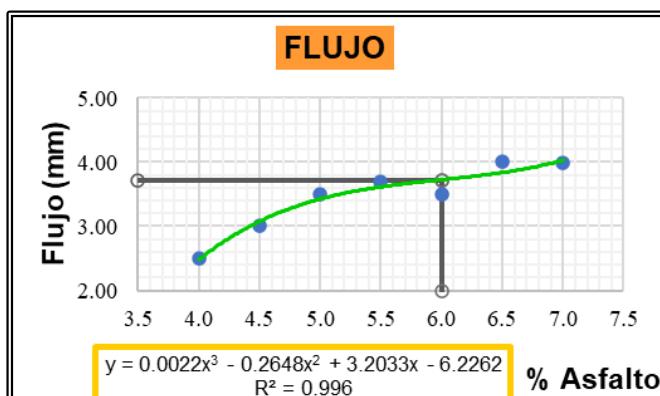
Variación de la estabilidad según el contenido de asfalto



Nota. El gráfico muestra la estabilidad según la cantidad de asfalto.

Figura 30

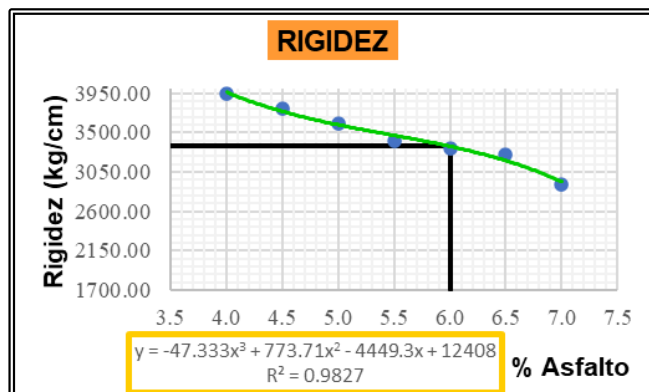
Comportamiento del flujo en función del contenido de asfalto



Nota. El gráfico muestra la variación del flujo según la cantidad de asfalto.

Figura 31

Variación de la rigidez respecto al contenido de asfalto



Nota. El gráfico muestra cómo varía la rigidez según la cantidad de asfalto.

A fin de establecer la dosificación óptima de asfalto en la mezcla asfáltica convencional, se adoptó el porcentaje que respondió a todos los lineamientos técnicos normativos, garantizando tanto una compactación adecuada como una buena durabilidad. En función de ello, se concluyó que el 6% de asfalto constituyó la dosificación ideal para la mezcla.

Tabla 16

Parámetros y valores obtenidos del ensayo Marshall en la MAC convencional

Indicadores	Und.	Resultados	Criterios aceptación	Verificación
PU	gr/cm ³	2.33	-	
VA	%	4.40	3 - 5	Cumple
VMA	%	20.52	14 mín.	Cumple
VFA	%	79.91	70% - 80%	Cumple
Estabilidad	kg	1288.50	815 mín.	Cumple
Flujo	mm	3.50	2 - 3.5	Cumple
Rigidez	kg/cm	3316.00	1700 - 4000	Cumple

Nota. La tabla muestra los resultados obtenidos del análisis realizado a las probetas con un contenido de asfalto del 6%, verificando su cumplimiento con los rangos permitidos por las normas.

5.1.1.7 Método Marshall aplicado a MAC con contenido óptimo de asfalto y diferentes dosificaciones de polvo de hierro fundido

Para el diseño de las mezclas asfálticas con adición de polvo de hierro fundido se utilizó el mismo procedimiento aplicado a las mezclas asfálticas tradicionales, empleando el

método Marshall para la preparación y compactación de las probetas.

En esta propuesta, se evaluó el efecto del polvo de hierro fundido incorporado en sustitución parcial del agregado fino, mediante el procedimiento de vía seca, lo que implicó su mezcla previa con los agregados antes de la adición del asfalto.

Adicionalmente, se incorporó filler mineral en una proporción fija del 2% respecto al peso total de los agregados, en reemplazo parcial del agregado fino, con el propósito de incrementar la cohesión interna y optimizar las propiedades funcionales de la mezcla.

El polvo de hierro fundido fue dosificado en tres tratamientos distintos, a niveles de 17%, 20% y 23%, en función del peso total de los agregados, reemplazando únicamente la fracción de material retenida en el tamiz N°200. Estas dosificaciones permitieron analizar su influencia en las propiedades tanto físicas como mecánicas de la mezcla asfáltica modificada.

Tabla 17

Dosificación aplicada para la preparación de las probetas modificadas con polvo de hierro fundido

Formulación de las probetas con adición de polvo de hierro fundido			
Polvo de hierro fundido	17%	20%	23%
Asfalto	6%	6%	6%
Grava chancada	34%	34%	34%
Arena chancada	41%	38%	35%
Filler	2%	2%	2%

Nota. La tabla detalla la dosificación de probetas con polvo de hierro. El porcentaje de asfalto, grava y filler se mantiene constante, mientras que la arena varía para compensar los diferentes porcentajes de polvo de hierro.

Procedimiento de elaboración de las probetas con adición de polvo de hierro fundido:

La elaboración de las probetas de MAC con adición de polvo de hierro fundido se desarrolló conforme a las etapas del método Marshall, manteniendo la misma secuencia empleada en la fabricación de mezclas asfálticas tradicionales. La única variación consistió en la adición de polvo de hierro fundido, que reemplazó parcialmente el agregado fino,

específicamente de la fracción que atravesó el tamiz N°200.

Inicialmente, se definieron las proporciones de polvo de hierro fundido a utilizar. Se establecieron tres niveles de sustitución del agregado fino por polvo de hierro fundido, correspondientes a 17%, 20% y 23% del peso total del agregado. Asimismo, se fijó la temperatura de mezclado en 150°C, tanto para los agregados como para el asfalto, asegurando una adecuada integración de los materiales durante el proceso.

Posteriormente, se procedió al pesado de los materiales requeridos: agregados gruesos y finos, asfalto (en un contenido óptimo del 6%), filler mineral (2%, también en reemplazo del agregado fino) y la cantidad correspondiente de polvo de hierro fundido según cada dosificación. Los agregados y el polvo de hierro fundido fueron precalentados en una cocina hasta alcanzar una temperatura uniforme de 150°C, con el fin de evitar contrastes térmicos al momento del mezclado.

Una vez alcanzada la temperatura adecuada, se mezclaron inicialmente los agregados con el polvo de hierro fundido. En esta etapa se garantizó una adherencia superior al 95% entre el polvo de hierro fundido y los agregados, lo cual aseguró una distribución homogénea y una buena compatibilidad antes de incorporar el asfalto.

A continuación, se añadió el asfalto, previamente calentado a 150°C. La mezcla fue trabajada cuidadosamente hasta obtener una masa homogénea, con todos los componentes completamente recubiertos por el asfalto.

La mezcla en caliente fue vertida en moldes tipo Marshall, cuidando evitar pérdidas de material. Cada muestra fue compactada mediante 75 golpes por cada cara, conforme a lo establecido por el método Marshall. Tras la compactación, las probetas se dejaron reposar dentro del molde durante cuatro horas, tiempo suficiente para que alcanzaran la temperatura ambiente de forma gradual.

Finalmente, se extrajo cuidadosamente cada probeta, quedando listas para su posterior análisis físico y mecánico.

5.1.2 Procesamientos de datos

5.1.2.1 Procedimiento del ensayo Marshall aplicado al cálculo de los parámetros volumétricos en MAC

Se prepararon tres tratamientos de mezcla asfáltica modificada con polvo de hierro fundido, con niveles de dosificación de 17%, 20% y 23%, elaborándose tres probetas para cada una de estas dosificaciones. Asimismo, se prepararon tres probetas adicionales sin dosificación de polvo de hierro fundido, correspondiente a la muestra patrón.

Una vez preparadas todas las probetas, se evaluaron mediante el ensayo Marshall, siguiendo lo indicado en la norma del MTC E 504. En esta fase se determinaron los principales parámetros volumétricos de cada mezcla: PU, VA y VMA.

Estos resultados permitieron analizar las propiedades físicas de las mezclas modificadas y compararlas con el comportamiento de la muestra patrón.

- Procedimiento del ensayo Marshall aplicado al cálculo de los parámetros volumétricos en MAC sin incorporación de polvo de hierro fundido (patrón)

Se prepararon tres probetas sin incorporación de polvo de hierro fundido (patrón). La elaboración de todas las probetas se efectuó con un contenido óptimo de asfalto del 6%, temperatura de mezclado de 150°C y con compactación mediante 75 golpes por cada cara, siguiendo la metodología establecida. A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 18

Valores determinados mediante el ensayo Marshall (PU, VA y VMA) – sin incorporación de polvo de hierro fundido (patrón)

Indicadores	Und.	Resultado R - 1	Resultado R - 2	Resultado R - 3	Promedio	Criterio de aceptación	Verificación
PU	gr/cm ³	2.33	2.35	2.34	2.34	-	-
VA	%	6.28	5.47	5.87	5.87	3 - 5	No cumple
VMA	%	24.88	24.24	24.56	24.56	14 mín.	Cumple

Nota. La tabla muestra los resultados obtenidos del ensayo Marshall de la muestra patrón.

Se observa que el valor promedio del PU es 2.34 gr/cm³, de VA es 5.87%, de VMA es 24.56%, indicando que los VA no cumplen con el criterio de aceptación.

Procedimiento del ensayo Marshall aplicado al cálculo de los parámetros volumétricos en MAC con incorporación de 17% de polvo de hierro fundido:

Se prepararon tres probetas de mezcla asfáltica en caliente con una adición del 17% de polvo de hierro fundido, empleando un contenido óptimo de asfalto del 6%. La mezcla se elaboró a una temperatura de 150°C y se compactó aplicando 75 golpes por cada cara de la probeta, mediante el martillo Marshall, siguiendo las indicaciones normativas correspondientes. Los datos obtenidos se presentan en la tabla 19.

Tabla 19

Valores determinados mediante el ensayo Marshall (PU, VA y VMA) – con incorporación de 17% de polvo de hierro fundido

Indicadores	Und.	Resultado R - 1	Resultado R - 2	Resultado R - 3	Promedio	Criterio de aceptación	Verificación
PU	gr/cm ³	2.33	2.35	2.34	2.34	-	-
VA	%	4.10	3.30	3.70	3.70	3 - 5	Cumple
VMA	%	16.50	17.14	16.82	16.82	14 mín.	Cumple

Nota. La tabla muestra los resultados del ensayo Marshall para la mezcla con 17% de polvo de hierro fundido, registrando valores promedio en PU de 2.58 gr/cm³, VA de 3.70% y VMA de 16.82%. Los valores de VA y VMA cumplen con los criterios de aceptación.

Procedimiento del ensayo Marshall aplicado al cálculo de los parámetros volumétricos en MAC con incorporación de 20% de polvo de hierro fundido:

Para esta dosificación, elaboraron tres probetas de mezcla asfáltica con adición del 20% de polvo de hierro fundido. Se utilizó un contenido óptimo de asfalto del 6% y la mezcla se realizó a una temperatura de 150°C. La compactación se efectuó aplicando 75 golpes por cada cara de la probeta mediante el martillo Marshall. Los datos obtenidos se presentan a continuación:

Tabla 20

Valores determinados mediante el ensayo Marshall (PU, VA y VMA) – con incorporación de 20% de polvo de hierro fundido

Indicadores	Und.	Resultado R - 1	Resultado R - 2	Resultado R - 3	Promedio	Criterio de aceptación	Verificación
PU	gr/cm ³	2.55	2.54	2.57	2.55	-	-
VA	%	3.16	2.75	3.96	3.29	3 - 5	Cumple
VMA	%	17.79	18.11	17.14	17.68	14 mín.	Cumple

Nota. La tabla presenta los resultados correspondientes a la mezcla con 20% de polvo de hierro fundido, mostrando valores promedio de PU de 2.55 gr/cm³, VA de 3.29% y VMA de 17.68%. Los valores promedio de los VA y VMA cumplen con los criterios de aceptación.

Procedimiento del ensayo Marshall aplicado al cálculo de los parámetros volumétricos en MAC con incorporación de 23% de polvo de hierro fundido:

Se elaboraron tres probetas de mezcla asfáltica con incorporación del 23% de polvo de hierro fundido, conservando un contenido óptimo de asfalto del 6%. El proceso se efectuó a 150°C, aplicando 75 golpes de compactación por cada cara de la probeta con el martillo Marshall. A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 21

Valores determinados mediante el ensayo Marshall (PU, VA y VMA) – con incorporación de 23% de polvo de hierro fundido

Indicadores	Und.	Resultado R - 1	Resultado R - 2	Resultado R - 3	Promedio	Criterio de aceptación	Verificación
PU	gr/cm ³	2.40	2.39	2.41	2.40	-	-
VA	%	3.07	3.47	2.67	3.07	3 - 5	No cumple
VMA	%	22.63	22.95	22.30	22.63	14 mín.	Cumple

Nota. La tabla muestra los resultados del ensayo Marshall correspondientes a la mezcla con 23% de polvo de hierro fundido, registrando un PU promedio de 2.40 gr/cm³, VA de 3.07% y VMA de 22.63%. Se observa que el valor promedio de VA no cumple con los criterios de aceptación, mientras que el VMA sí los cumple.

- **Resumen de resultados del ensayo Marshall aplicado al cálculo de los parámetros volumétricos en MAC con y sin incorporación de polvo de hierro fundido**

La tabla 22 presenta un resumen de los resultados obtenidos del ensayo Marshall para las mezclas con las diferentes dosificaciones de polvo de hierro fundido

Tabla 22

Resumen de los valores determinados mediante el ensayo Marshall (PU, VA y VMA) y sus variaciones

Indicadores	Und.	Contenido de polvo de hierro fundido				Criterio de aceptación	(%) Variaciones con respecto al patrón		
		Patrón	17%	20%	23%		AI 17%	AI 20%	AI 23%
PU	gr/cm ³	2.34	2.58	2.55	2.4	-	10.26	8.97	2.56
VA	%	5.87	3.7	3.29	3.07	3-5	-36.97	-43.95	-47.70
VMA	%	24.56	16.82	17.68	22.63	14 mín.	-31.51	-28.01	-7.86

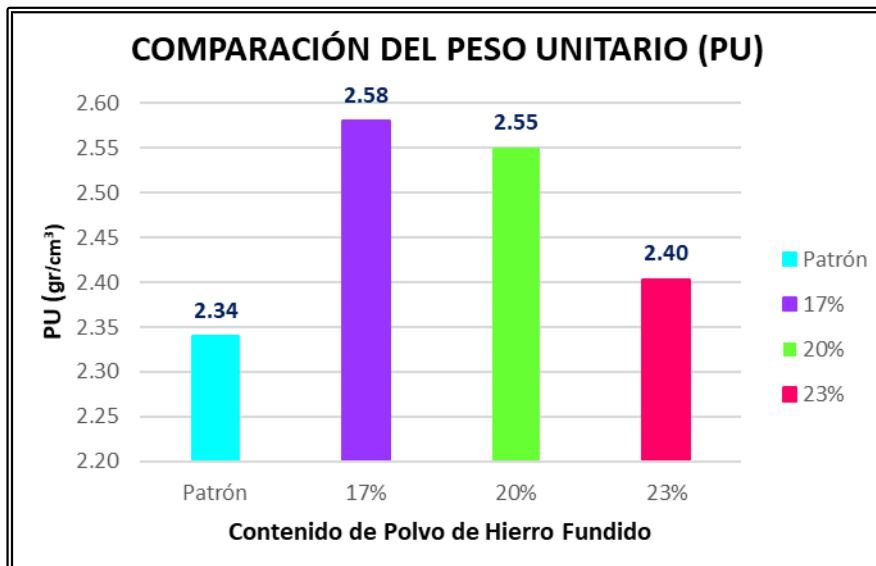
Nota. La tabla resume los promedios de los parámetros volumétricos obtenidos mediante el ensayo Marshall. Las variaciones porcentuales se calcularon tomando como referencia la mezcla patrón. Se evidencia que las mezclas modificadas cumplen con los estándares establecidos por la normativa para VMA, y que las mezclas con 17% y 20% de polvo de hierro fundido también cumplen con los criterios para VA.

A continuación, los resultados son analizados y presentados gráficamente:

A. Peso Unitario (PU)

Figura 32

Comparación del PU en MAC con y sin incorporación de polvo de hierro fundido

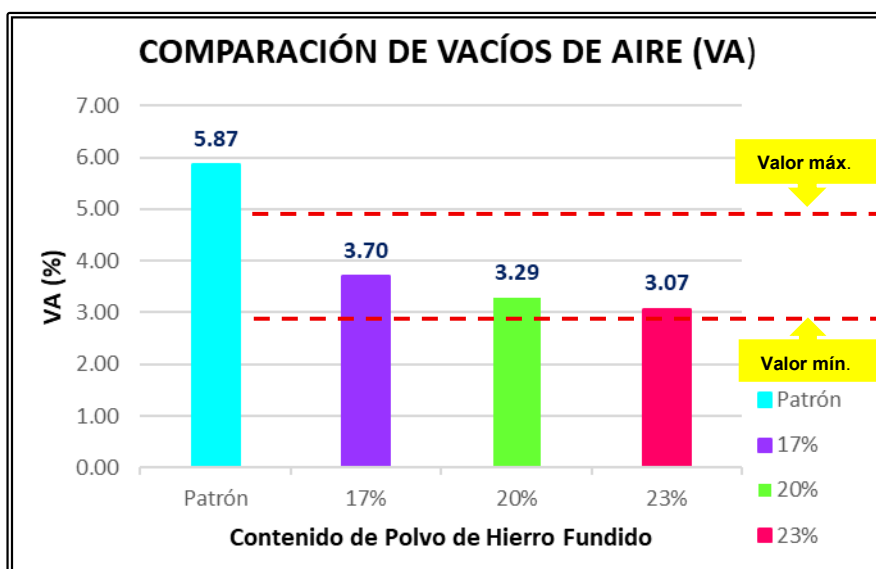


Nota. La Imagen compara el PU de la MAC con distintas dosificaciones de polvo de hierro fundido, en contraste con la muestra patrón.

B. Vacíos de aire (VA)

Figura 33

Comparación de VA en MAC con y sin incorporación de polvo de hierro fundido

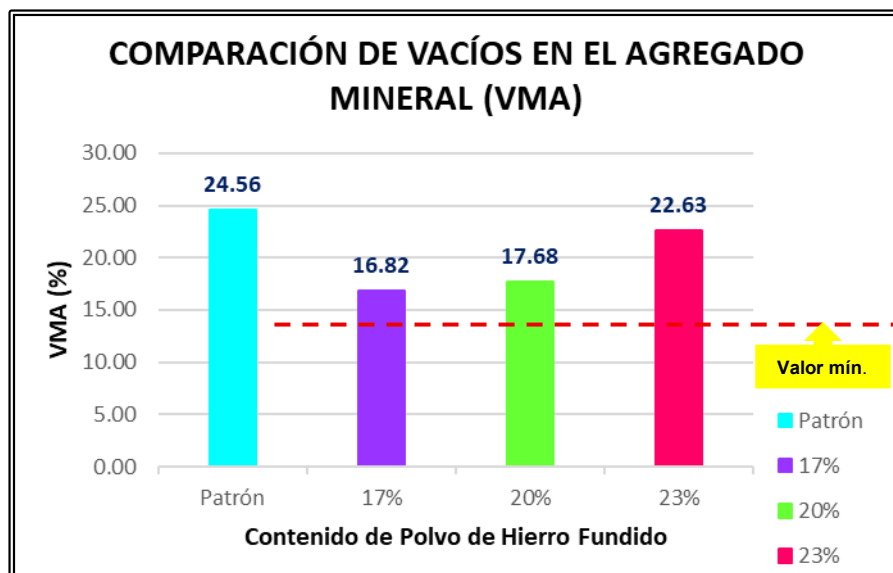


Nota. El grafico compara los VA de la MAC, contrastando las que incluyen polvo de hierro con la muestra patrón.

C. Vacíos en el agregado mineral (VMA)

Figura 34

Comparación de los valores de VMA entre mezclas convencionales y modificadas con polvo de hierro fundido



Nota. La imagen compara los VMA de una muestra patrón con los valores de las mezclas que contienen diferentes porcentajes de polvo de hierro fundido.

5.1.2.2 Procedimiento del ensayo Marshall aplicado a la determinación de la resistencia a la deformación en MAC

Se desarrollaron tres niveles de dosificación de polvo de hierro fundido (17%, 20% y 23%) y uno sin dicho material, elaborándose tres probetas para cada caso. Una vez preparadas todas las muestras, se procedió a realizar el ensayo Marshall conforme a lo estipulado en la normativa del MTC E 504. Esta etapa del estudio se centró en la medición de la estabilidad, el flujo y la rigidez, con el fin de analizar el comportamiento mecánico de las mezclas modificadas frente a la mezcla convencional (patrón). Los resultados obtenidos permitieron comparar la resistencia a la deformación de cada dosificación con respecto a la muestra patrón.

Procedimiento del ensayo Marshall aplicado a la determinación de la resistencia a la deformación en MAC con y sin incorporación de polvo de hierro fundido (patrón):

Se realizaron tres probetas sin adición de polvo de hierro fundido, correspondientes a la muestra patrón. Estas se elaboraron con un contenido de asfalto óptimo equivalente al 6% y se compactaron a 150°C, aplicándose 75 golpes en cada cara de la probeta mediante el martillo Marshall. Los valores obtenidos se presentaron en la tabla 23.

Tabla 23

Resultados obtenidos del ensayo Marshall (estabilidad, flujo y rigidez) – sin incorporación de polvo de hierro fundido (patrón)

Indicadores	Und.	Resultado R - 1	Resultado R - 2	Resultado R - 3	Promedio	Criterio de aceptación	Verificación
Estabilidad registrada sin corrección	kg	1474.00	1235.30	1115.70	1275.00	-	-
Coefficiente de corrección de estabilidad	K	0.99	0.99	0.99	0.99	-	-
Estabilidad	kg	1451.89	1222.95	1109.01	1261.28	815 mín.	Cumple
Flujo	mm	3.58	3.38	2.82	3.26	2 - 3.5	Cumple
Rigidez	kg/cm	4054.00	3621.00	3934.00	3869.67	1700 - 4000	Cumple

Nota. El ensayo Marshall de la muestra patrón reportó una estabilidad de 1261.28 kg, flujo de 3.26 mm y rigidez de 3869.67 kg/cm, cumpliendo con los estándares de aceptación establecidos.

Procedimiento del ensayo Marshall aplicado a la determinación de la resistencia a la deformación en MAC con incorporación de 17% de polvo de hierro fundido:

Para la dosificación del 17% de polvo de hierro fundido, se confeccionaron tres probetas con un contenido de asfalto óptimo del 6%. El procedimiento consistió en mezclar a 150°C y compactar las probetas mediante el método Marshall, aplicándose 75 golpes por cada cara. Los valores correspondientes se presentaron en la tabla 24:

Tabla 24

Resultados obtenidos del ensayo Marshall (estabilidad, flujo y rigidez – con incorporación del 17% de polvo de hierro fundido)

Indicadores	Und.	Resultado R - 1	Resultado R - 2	Resultado R - 3	Promedio	Criterio de aceptación	Verificación
Estabilidad registrada sin corrección	kg	1312.40	1340.60	1242.80	1298.60	-	-
Coefficiente de corrección de estabilidad	K	0.99	0.98	1.01	0.99	-	-
Estabilidad	kg	1296.65	1317.81	1252.74	1289.07	815 mín.	Cumple
Flujo	mm	3.05	3.56	3.30	3.30	2 - 3.5	Cumple
Rigidez	kg/cm	4254.10	3705.88	3793.89	3917.96	1700 - 4000	Cumple

Nota. Se presentan los valores correspondientes al ensayo Marshall para mezclas asfálticas que incorporan 17% de polvo de hierro fundido, con 1289.07 kg de estabilidad, 3.30 mm de flujo y 3917.96 kg/cm de rigidez, cumpliendo con los criterios establecidos para aceptación.

Procedimiento del ensayo Marshall aplicado a la determinación de la resistencia a la deformación en MAC con incorporación de 20% de polvo de hierro fundido:

En esta etapa se elaboraron tres probetas con un 20% de polvo de hierro fundido, manteniéndose constante el contenido de asfalto en 6%. Se trabajó a una temperatura de 150°C, aplicándose 75 impactos por cada lado mediante el método Marshall. En la tabla 25 se consignaron los valores obtenidos:

Tabla 25

Resultados obtenidos del ensayo Marshall (estabilidad, flujo y rigidez) – con incorporación del 20% de polvo de hierro fundido

Indicadores	Und.	Resultado R - 1	Resultado R - 2	Resultado R - 3	Promedio	Criterio de Aceptación	Verificación
Estabilidad registrada sin corrección	kg	1368.70	1384.90	1298.60	1350.73	-	-
Coefficiente de corrección de estabilidad	K	0.99	1.00	0.98	0.99	-	-
Estabilidad	kg	1348.17	1382.13	1276.52	1335.61	815 mín.	Cumple
Flujo	mm	3.40	3.35	3.45	3.40	2 - 3.5	Cumple
Rigidez	kg/cm	3961.01	4122.32	3695.36	3926.23	1700 - 4000	Cumple

Nota. Se muestran los valores obtenidos del ensayo Marshall en mezclas con 20% de polvo de hierro fundido, registrando una estabilidad de 1335.61 kg, un flujo de 3.40 mm y una rigidez de 3926.23 kg/cm, cumpliendo los criterios de aceptación establecidos.

Procedimiento del ensayo Marshall aplicado a la determinación de la resistencia a la deformación en MAC con incorporación de 23% de polvo de hierro fundido:

Se elaboraron tres probetas con un 23% de polvo de hierro fundido, manteniéndose un contenido de asfalto óptimo del 6%. Las probetas se compactaron a 150°C, aplicándose 75 golpes por cada cara según el método Marshall. Los resultados se indicaron en la siguiente tabla:

Tabla 26

Resultados obtenidos del ensayo Marshall (estabilidad, flujo y rigidez) – con incorporación del 23% de polvo de hierro fundido

Indicadores	Und.	Resultado R - 1	Resultado R - 2	Resultado R - 3	Promedio	Criterio de Aceptación	Verificación
Estabilidad registrada sin corrección	kg	1423.00	1242.00	1612.00	1425.67	-	-
Coefficiente de corrección de estabilidad	K	0.98	0.99	0.98	0.98	-	-
Estabilidad	kg	1390.27	1223.37	1576.54	1396.73	815 mín.	Cumple
Flujo	mm	3.66	3.43	3.56	3.55	2 - 3.5	Cumple
Rigidez	kg/cm	3802.00	3568.00	4434.00	3934.67	1700 - 4000	Cumple

Nota. Se muestran los valores obtenidos del ensayo Marshall en mezclas que incluyen 23% de polvo de hierro fundido, registrando una estabilidad de 1396.73 kg, un flujo de 3.55 mm y una rigidez de 3934.67 kg/cm, cumpliendo los criterios de aceptación.

Resumen de resultados del ensayo Marshall aplicado a la determinación de la resistencia a la deformación en MAC con y sin incorporación de polvo de hierro fundido:

Se resumieron en la tabla 27 los valores correspondientes al ensayo Marshall, aplicados en las distintas dosificaciones de polvo de hierro fundido.

Tabla 27

Resumen de resultados obtenidos del ensayo Marshall (estabilidad, flujo, rigidez) y sus variaciones

Indicadores	Und.	Contenido de polvo de hierro fundido				Criterio de aceptación	(%) Variaciones con respecto al patrón		
		Patrón	17%	20%	23%		AI 17%	AI 20%	AI 23%
Estabilidad	kg	1261.28	1289.17	1335.61	1396.73	815 mín.	2.21	5.89	10.74
Flujo	mm	3.26	3.3	3.4	3.55	2 - 3.5	1.23	4.29	8.90
Rigidez	kg/cm	3869.67	3917.96	3926.23	3934.67	1700 - 4000	1.25	1.46	1.68

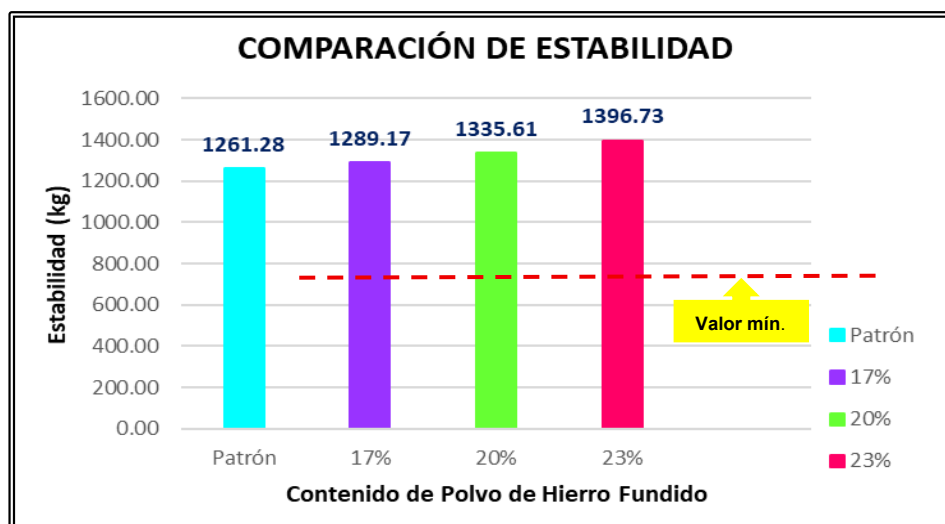
Nota. Se resumen los valores promedio obtenidos del ensayo Marshall en las mezclas asfálticas. Se destaca que todas las mezclas, incluyendo el patrón, cumplen con los criterios de aceptación para estabilidad y rigidez. A diferencia del flujo, tanto la estabilidad como la rigidez muestran un aumento progresivo al incorporar polvo de hierro fundido.

A continuación, se analizaron en detalle los resultados obtenidos, complementados con sus respectivas representaciones gráficas:

A. Estabilidad

Figura 35

Comparación de la estabilidad en MAC con y sin incorporación de polvo de hierro fundido

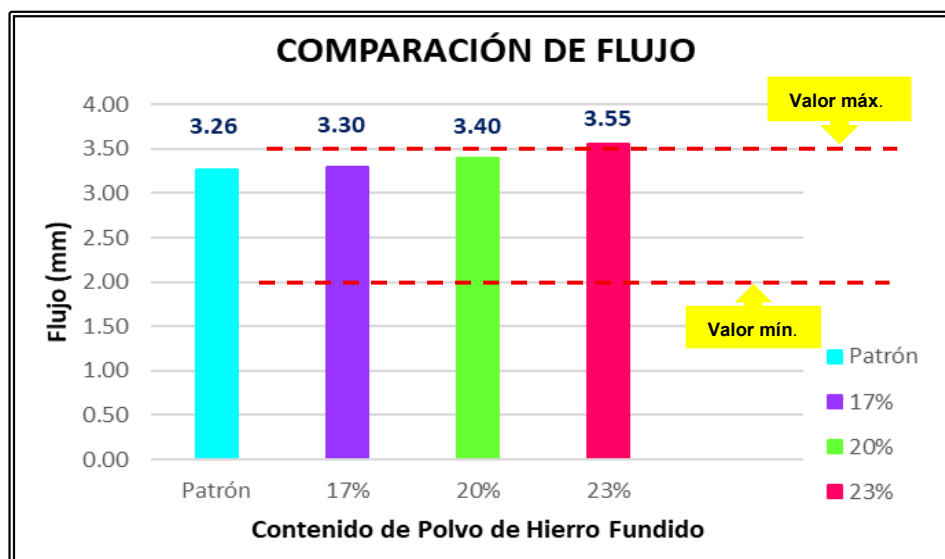


Nota. El gráfico muestra la comparación de la estabilidad entre la MAC patrón y las mezclas que incluyen distintas dosificaciones de polvo de hierro fundido.

B. Flujo

Figura 36

Comparación del flujo en MAC con y sin incorporación de polvo de hierro fundido

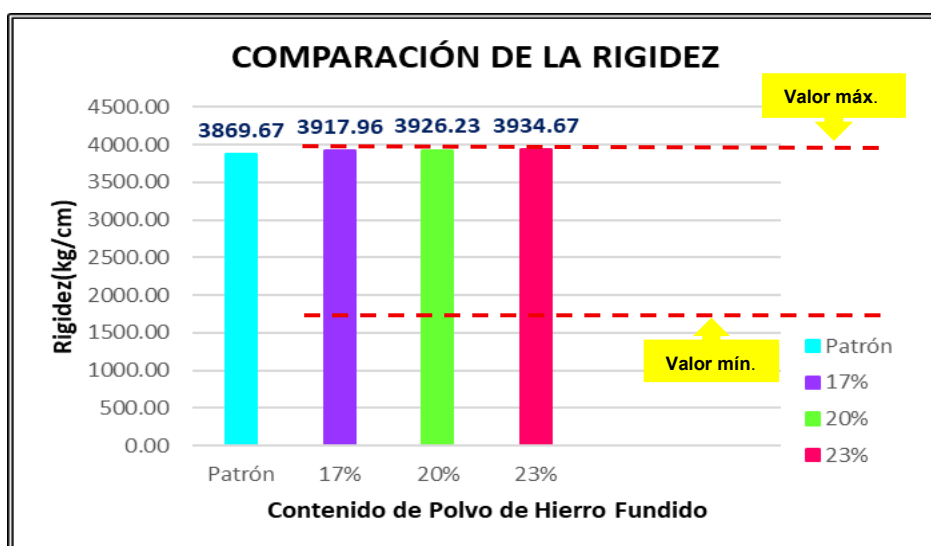


Nota. La imagen muestra la comparación del flujo entre la MAC patrón y las mezclas que incorporan distintas dosificaciones de polvo de hierro fundido.

C. Rigidez

Figura 37

Comparación de la rigidez en MAC con y sin incorporación de polvo de hierro fundido



Nota. El gráfico muestra la comparación de la rigidez entre la MAC patrón y las mezclas que incorporan distintas dosificaciones de polvo de hierro fundido.

Procedimiento del ensayo Lottman en MAC aplicado a la cuantificación de la resistencia a la tracción indirecta en MAC con y sin incorporación de polvo de hierro fundido:

El ensayo se centró en evaluar la resistencia a la tracción indirecta de mezclas asfálticas en caliente, siguiendo la metodología Lottman según las normativas del MTC E 522 y la AASHTO T 283.

Para ello, se elaboraron probetas empleando el método Marshall, incorporándose polvo de hierro fundido en tres niveles de dosificación: 17%, 20% y 23%, además de una mezcla sin adición (patrón). Para cada porcentaje de incorporación, se prepararon seis probetas, que se distribuyeron equitativamente en dos grupos de ensayo: tres probetas para la evaluación en condición húmeda y otras tres para condición seca. Estas mezclas se prepararon manteniendo una temperatura controlada de 150°C. Previo al ensayo, se registraron las dimensiones de cada espécimen (altura y diámetro) con un vernier y se determinó su peso utilizando una balanza.

Para la medición de la resistencia, se utilizó el equipo Marshall, al cual se le acopló un cabezal Lottman, específico para realizar la compresión diametral. Se aplicó una carga de rotura a baja velocidad. Este valor de carga máxima se empleó en la fórmula para calcular la resistencia a compresión diametral.

Resumen de resultados del ensayo Lottman en MAC aplicado a la cuantificación de la resistencia a la tracción indirecta en MAC con y sin incorporación de polvo de hierro fundido:

La tabla 28 presentó los resultados del ensayo Lottman, según los diferentes contenidos de polvo de hierro fundido:

Tabla 28

Resumen de valores obtenidos mediante el ensayo Lottman (ITS)

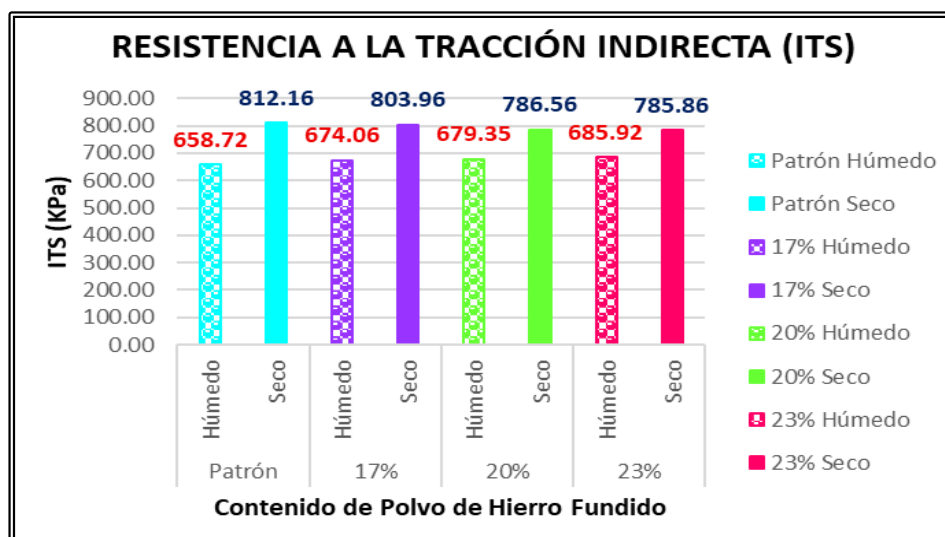
Polvo de hierro fundido	Grupo	ITS (kPa)				Promedio	(%) Variación
		R - 1	R - 2	R - 3			
Patrón	Húmedo	664.42	650.66	661.09	658.72	0.00	
	Seco	809.56	812.13	814.79	812.16	0.00	
17%	Húmedo	672.28	673.17	676.74	674.06	2.33	
	Seco	803.23	805.73	802.92	803.96	-1.01	
20%	Húmedo	686.16	680.12	671.77	679.35	3.13	
	Seco	780.19	789.92	789.57	786.56	-3.15	
23%	Húmedo	685.03	696.41	676.32	685.92	4.13	
	Seco	790	784.81	782.76	785.86	-3.24	

Nota. La tabla presenta un resumen de los resultados del ensayo Lottman, mostrando las resistencias a la tracción indirecta (ITS) para mezclas asfálticas húmedas y secas. Se observa que la resistencia en condición húmeda aumenta con la incorporación de polvo de hierro fundido, mientras que la resistencia en condición seca presenta una ligera disminución en todas las mezclas modificadas.

A continuación, se representó en un gráfico el comportamiento:

Figura 38

Comparación de la ITS en condiciones húmedas y secas



Nota. El gráfico compara la ITS de las muestras con y sin polvo de hierro, evaluadas bajo condiciones secas y húmedas.

Procedimiento del ensayo Lottman en MAC aplicado a la evaluación de la resistencia al daño por humedad en MAC con y sin incorporación de polvo de hierro fundido:

Este ensayo tuvo como objetivo determinar la resistencia de la MAC al daño inducido por humedad, considerando el coeficiente TSR como indicador clave. Para obtener este valor de TSR, se siguió rigurosamente la metodología del ensayo Lottman, tal como se estableció en las normativas del MTC E 522 y AASHTO T 283. Este ensayo fue crucial, ya que, aunque partió de la determinación del ITS de las probetas, su propósito fundamental fue cuantificar cómo esa resistencia se vio afectada por la presencia de humedad. Por ello, se emplearon las mismas probetas cilíndricas compactadas, en las que se midió la resistencia a la tracción indirecta (ITS), garantizando la continuidad del material y la eficacia del análisis para determinar la TSR.

Los resultados de la ITS en condiciones secas y húmedas, obtenidos según los distintos porcentajes de polvo de hierro fundido, permitieron calcular la TSR, indicador principal de la resistencia al daño por humedad en mezclas asfálticas en caliente.

Resumen de resultados del ensayo Lottman en MAC aplicado a la evaluación de la resistencia al daño por humedad en MAC con y sin incorporación de polvo de hierro fundido:

Con el fin de evaluar el desempeño de las distintas dosificaciones, se mostraron en la tabla 29 los resultados obtenidos del ensayo Lottman.

Tabla 29

Resumen de resultados obtenidos del ensayo Lottman (TSR) y sus variaciones

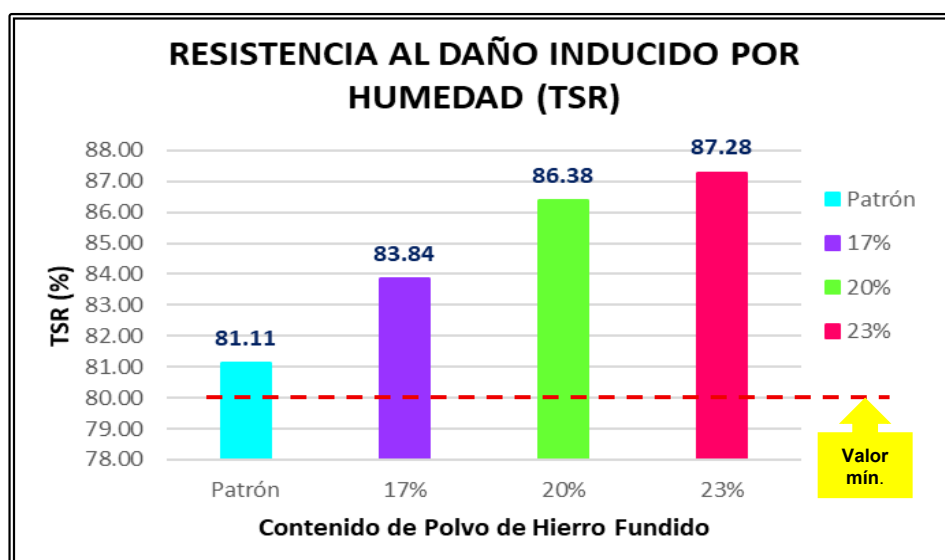
Polvo de hierro fundido	Und.	TSR				Criterio de aceptación	(% Variación
		R-1	R-2	R-3	Promedio		
Patrón	%	82.07	80.12	81.14	81.11	80 mín.	0.00
17%	%	83.7	83.55	84.28	83.84		3.37
20%	%	87.95	86.1	85.08	86.38		6.50
23%	%	86.71	88.74	86.4	87.28		7.61

Nota. La tabla resume los resultados del TSR, mostrando que para la muestra patrón el promedio es de 81.11%; con 17% de polvo de hierro fundido el promedio es de 83.84%; para 20% de polvo de hierro fundido se obtuvo un promedio de 86.38%; y finalmente, con 23% de polvo de hierro fundido el promedio registrado es de 87.28%.

A continuación, se representó en un gráfico el comportamiento:

Figura 39

Comparación de la capacidad de la mezcla en la resistencia al daño inducido por humedad (TSR)



Nota. La imagen muestra la comparación del TSR entre la mezcla patrón y aquellas que contienen distintas dosificaciones de polvo de hierro fundido.

5.1.2.3 Procedimiento del ensayo Cántabro aplicado al análisis de la resistencia al desgaste en MAC con y sin incorporación de polvo de hierro fundido

Para evaluar la resistencia al desgaste por abrasión e impacto de las MAC, se empleó el ensayo Cántabro de pérdida por desgaste, siguiendo la normativa del MTC E 515, siendo este ensayo clave para medir la cohesión y la durabilidad de la mezcla frente a esfuerzos abrasivos.

Para ello, se elaboraron probetas Marshall (como las usadas en otros ensayos) con polvo de hierro fundido en tres dosificaciones: 17%, 20% y 23%, además de una mezcla sin adición (patrón). La fabricación se realizó a 150°C. Previamente al ensayo, se midieron las dimensiones y se registró el peso inicial de cada probeta.

Se llevó a cabo la prueba empleando el equipo de abrasión tipo Cántabro, donde las probetas se sometieron a 300 vueltas, simulando el desgaste por impacto y abrasión. Tras el ciclo, se anotó el peso final de cada probeta.

El cálculo del porcentaje de pérdida por desgaste se realizó considerando la diferencia entre el peso inicial y el final de la probeta, siendo este el indicador clave de la resistencia al desgaste del material.

Resumen de resultados del ensayo Cántabro aplicado al análisis de la resistencia al desgaste en MAC con y sin incorporación de polvo de hierro fundido:

En la tabla 30 se detallaron los resultados del ensayo Cántabro, mostrando el comportamiento de las mezclas asfálticas analizadas.

Tabla 30

Resumen de resultados obtenidos del ensayo Cántabro (desgaste) y sus variaciones

Polvo de hierro fundido	Und	Desgaste				Criterio de aceptación	(%) Variación
		R-1	R-2	R-3	Promedio		
Patrón	%	4	3.25	4.24	3.83	20 máx.	0.00
17%	%	2.74	2.06	2.31	2.37		-38.12
20%	%	1.16	1.19	1.39	1.25		-67.36
23%	%	1.03	1.1	1.19	1.11		-71.02

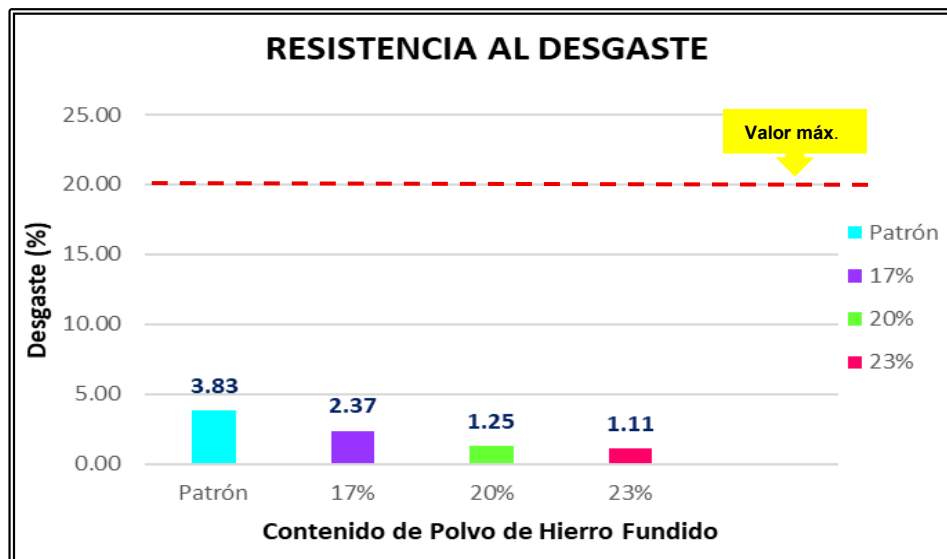
Nota. La tabla presenta los resultados de pérdida por desgaste del ensayo Cántabro. Todas

las mezclas se encuentran dentro del límite máximo permitido del 20%. La incorporación de polvo de hierro fundido reduce progresivamente el desgaste de la mezcla, destacando la dosificación del 23% por su mejora sustancial.

El gráfico siguiente muestra cómo varía el comportamiento:

Figura 40

Análisis comparativo de la resistencia al desgaste de las mezclas



Nota. El gráfico muestra la comparación de la resistencia al desgaste entre la mezcla patrón y las mezclas que incorporan distintas dosificaciones de polvo de hierro fundido.

5.2 Discusión

5.2.1 Discusión del objetivo general a partir de los resultados

Los valores obtenidos en las mezclas con 17% y 20% de incorporación presentaron mejoras notables en la propiedad de los parámetros volumétricos, resistencia a la deformación, resistencia a la tracción indirecta, resistencia al daño inducido por humedad y resistencia al desgaste. Ambas dosificaciones satisficieron todas las especificaciones de las normativas técnicas actuales, lo que permite verificar su desempeño dentro de los márgenes aceptables. En el caso del 23%, si bien se observaron algunas mejoras puntuales, no todas las propiedades evaluadas se mantuvieron dentro de los rangos normativos, lo que evidencia un comportamiento menos uniforme frente a las demás dosificaciones evaluadas.

5.2.2 Discusión de los objetivos específicos a partir de los resultados

5.2.2.1 Discusión del objetivo específico 1 a partir de los resultados

Calcular en qué proporción mejora la incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20% y 23% en los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo Marshall.

Los resultados evidenciaron que las mezclas modificadas con 17%, 20% y 23% de polvo de hierro fundido lograron un comportamiento más favorable al compararse con la mezcla de referencia (patrón), manteniéndose dentro de los valores permitidos por la normativa vigente. Este hallazgo es fundamental para validar el potencial del material como aditivo.

En cuanto al PU, la incorporación del polvo de hierro fundido provocó un incremento en todas las dosificaciones, lo cual concuerda con lo esperado debido a la alta densidad de este material. La mezcla con 17% presentó el mayor valor (2.58 g/cm^3). De manera similar, Román y García (2023) reportaron un aumento del PU respecto a la mezcla patrón (2.33 gr/cm^3); sin embargo, los incrementos observados fueron menores, alcanzando un valor máximo de 2.37 g/cm^3 con una dosificación del 23%. La mayor magnitud del incremento obtenida en el presente estudio puede atribuirse al efecto densificante más pronunciado del polvo de hierro fundido en comparación con la escoria de hierro.

Respecto a los VA, se observó que la mezcla patrón obtuvo un valor de 5.87%, el cual se encuentra fuera del rango normativo de 3% a 5%. En contraste, las mezclas modificadas con 17%, 20% y 23% registraron valores de 3.70%, 3.29% y 3.07% respectivamente, logrando así ubicarse dentro del rango normativo. Los resultados evidencian que la incorporación de polvo de hierro fundido contribuye a mejorar la compactación de la mezcla asfáltica. No obstante, este comportamiento difiere de lo reportado por Román y García (2023), quienes señalaron que la adición de escoria de hierro a partir del 17% generó valores de VA por debajo del rango permitido (2.44%). Esta discrepancia sugiere que, aunque ambos materiales influyen en la reducción de los VA, el polvo de hierro fundido presenta una interacción volumétrica más favorable, evitando que los valores se desplacen fuera del rango normativo.

En relación con los VMA, todas las mezclas evaluadas, incluida la mezcla patrón, cumplieron con el valor mínimo de 14% establecido por la normativa. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Román y García (2023), quienes también señalaron que, pese a la reducción de los VMA con la incorporación del subproducto de hierro, los valores se mantuvieron dentro del rango normativo en todas las dosificaciones.

En términos generales, la incorporación de polvo de hierro fundido demuestra ser más efectiva en la optimización de los parámetros volumétricos, permitiendo que la mezcla se ajuste a los criterios de calidad establecidos por el MTC. A diferencia de la tesis de Román y García (2023), el polvo de hierro no solo aumenta el PU, sino que también permite que los VA se mantengan dentro del rango normativo, demostrando una mejora integral y equilibrada en los tres parámetros evaluados, lo cual la escoria de hierro no logró de manera simultánea.

5.2.2.2 Discusión del objetivo específico 2 a partir de los resultados

Determinar en qué medida mejora la incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20% y 23% en la resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica en caliente, mediante los parámetros del ensayo Marshall.

Los resultados obtenidos reflejan que la mezcla, al incorporar este material, alcanzó mayores niveles de estabilidad y rigidez, cumpliendo con los criterios establecidos en las normativas técnicas vigentes.

Respecto a la estabilidad, todas nuestras muestras, incluyendo el patrón (1261.28 kg), superaron el mínimo normativo de 815 kg. La inclusión del aditivo provocó un incremento gradual en la resistencia, alcanzándose el valor máximo con una dosificación del 23% (1396.73 kg). Este hallazgo concuerda parcialmente con Román y García (2023), quienes también reportaron valores de estabilidad superiores al mínimo requerido. Sin embargo, su estudio mostró un comportamiento irregular de la estabilidad al 17% (1665.87 kg), 20% (1413.78 kg) y 23% (1618.35 kg), con el valor más bajo en la dosificación del 20%. En contraste, nuestro estudio evidencia una tendencia ascendente y consistente de la estabilidad con el aumento de la dosificación de polvo, lo que sugiere una interacción más uniforme del polvo de hierro con la mezcla.

Respecto al flujo, nuestras mezclas se mantuvieron dentro del rango normativo de 2 a 3.5 mm, a excepción de la mezcla con 23% de aditivo (3.55 mm), que superó ligeramente el límite superior. Este resultado es similar a lo encontrado por Román y García (2023), quienes también observaron que algunas de sus dosificaciones con escoria de hierro (17% y 23%) superaron el límite máximo de flujo (3.6 mm), lo que sugiere que la adición de residuos de hierro, independientemente de su forma, tiende a aumentar la movilidad de la mezcla bajo carga.

En relación con la rigidez, todas las mezclas evaluadas en nuestro estudio se mantuvieron dentro del intervalo normativo de 1700 hasta 4000 kg/cm. Los resultados evidencian una leve mejora con la adición de polvo de hierro (patrón: 3869.67 kg/cm; 23%: 3934.67 kg/cm). Este hallazgo contrasta fuertemente con la tesis de Román y García (2023), donde ninguna de las mezclas con escoria de hierro (incluida el patrón) cumplió con este parámetro, excediendo el límite superior de 4000 kg/cm. La rigidez excesiva reportada en ese estudio podría indicar una falta de flexibilidad en la mezcla, lo cual resultaría en un comportamiento quebradizo.

Las notables diferencias en los resultados de estabilidad y rigidez entre ambos estudios pueden explicarse por la granulometría del aditivo y la fracción del agregado sustituida. Si bien tanto en el presente trabajo como en el de Román y García (2023) se

emplearon materiales en reemplazo del agregado, la clave reside en su función dentro de la mezcla.

En nuestro ensayo, el polvo de hierro fundido fino actuó como un relleno, cuya principal función es optimizar la densidad al llenar los micro vacíos. Por otro lado, la escoria de hierro utilizada por Román y García (2023) reemplazó al agregado con fracciones más gruesas. Esta variación en la granulometría modificó de manera diferente y menos controlada las propiedades mecánicas de la mezcla, lo que justifica la variabilidad en los resultados.

5.2.2.3 Discusión del objetivo específico 3 a partir de los resultados

Cuantificar en qué forma mejora la incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% en la resistencia a la tracción indirecta de la mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo Lottman.

Los resultados obtenidos en el ensayo Lottman permitieron evaluar la resistencia a la tracción indirecta (ITS) como una propiedad mecánica absoluta de la mezcla, expresada en kPa, tanto en condición seca (RTS) como en condición húmeda (RTH). Este parámetro cuantifica la capacidad resistente efectiva de la mezcla para soportar esfuerzos de tracción bajo cada condición de exposición.

En condición húmeda (RTH), se evidenció que la incorporación de polvo de hierro fundido incrementó progresivamente la resistencia de la mezcla, simulando el comportamiento que puede presentarse durante la vida útil del pavimento bajo la acción de lluvias o condiciones ambientales. La mezcla patrón registró un valor de 658.72 kPa, mientras que la mezcla con 23% de aditivo alcanzó 685.92 kPa, lo que confirma que el polvo de hierro fundido mejora la resistencia mecánica disponible de la mezcla en estado húmedo.

Cabe señalar que no se identificaron investigaciones previas que evalúen la resistencia a la tracción indirecta mediante el uso de polvo de hierro fundido, lo que evidencia un vacío de información técnica respecto al comportamiento de este material en dicha propiedad mecánica. Por esta razón, los resultados obtenidos fueron contrastados con estudios que emplearon otros tipos de aditivos para evaluar la misma variable. En este contexto, el estudio realizado por Ávila y Velasco (2021) resulta comparable, ya que los

autores observaron un incremento de la resistencia a la tracción en condición húmeda al emplear cal hidratada, pasando de 1312.77 kPa en la mezcla patrón a 1377.93 kPa, lo que sugiere que, aunque se utilicen aditivos de distinta naturaleza y dosificación, es posible mejorar la resistencia efectiva de la mezcla en presencia de humedad.

En cuanto a la resistencia a la tracción seca (RTS), los resultados no mostraron una tendencia uniforme, registrándose valores entre 803.96 kPa (17%) y 686.56 kPa (20%), evidenciándose una reducción respecto a la mezcla patrón. De manera similar, Ávila y Velasco (2021) reportaron que, pese a obtener un valor elevado de RTS en su mezcla patrón (1612.81 kPa), la incorporación de aditivos tendió a disminuir esta resistencia. Este comportamiento confirma que la resistencia en condición seca es altamente sensible al tipo de material incorporado y que el polvo de hierro fundido no necesariamente incrementa la resistencia máxima en seco, aunque sí contribuye a mejorar el desempeño resistente de la mezcla bajo condiciones de humedad.

En conjunto, los resultados indican que el polvo de hierro fundido contribuye a mejorar la resistencia efectiva de la mezcla asfáltica cuando se encuentra expuesta a humedad, condición crítica para el desempeño y durabilidad del pavimento.

5.2.2.4 Discusión del objetivo específico 4 a partir de los resultados

Evaluar de qué manera mejora la incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% en la resistencia al daño inducido por humedad de la mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo Lottman.

Los resultados obtenidos mediante el ensayo Lottman permitieron evaluar la resistencia al daño inducido por humedad a través del índice TSR, el cual cuantifica la susceptibilidad de la mezcla asfáltica frente a la acción del agua. Este parámetro se expresa como una relación entre la resistencia de la mezcla en condición húmeda y seca, por lo que no representa una resistencia mecánica absoluta, sino la proporción de resistencia que la mezcla conserva luego de ser expuesta a la humedad, permitiendo analizar su capacidad de retener desempeño estructural bajo condiciones adversas.

Los resultados del ensayo evidenciaron que la incorporación de polvo de hierro

fundido mejoró de manera progresiva la resistencia al daño inducido por humedad de la mezcla asfáltica. De acuerdo con la normativa vigente, que establece un valor mínimo de TSR del 80%, la mezcla patrón alcanzó un valor de 81.10%, ubicándose apenas por encima del límite normativo. En contraste, las mezclas modificadas presentaron incrementos graduales y consistentes del TSR, registrándose valores de 83.84% para la dosificación del 17%, 86.38% para el 20% y 87.28% para el 23%. Estos resultados evidencian que el polvo de hierro fundido incrementa la capacidad de la mezcla para conservar su resistencia frente a la acción de la humedad, superando el desempeño de la mezcla convencional.

Aunque no se encontraron estudios previos que utilicen polvo de hierro fundido para este ensayo, los resultados obtenidos pueden contrastarse con investigaciones que evaluaron la resistencia al daño inducido por humedad mediante el uso de otros tipos de aditivos. En este contexto, el estudio realizado por Quispe (2022), en el que se incorporó un polímero termoplástico, reportó valores de TSR de 85.1% para una dosificación de 2.5%, 87.8% para 3.5% y 83.6% para 4.5%, los cuales también superaron el valor mínimo normativo. No obstante, a diferencia de los resultados obtenidos en la presente investigación, el comportamiento del TSR no mostró una tendencia de mejora constante, sino un patrón irregular, con un incremento inicial seguido de una disminución al aumentar la dosificación del aditivo.

Esta diferencia resulta relevante, ya que el polvo de hierro fundido presentó un incremento progresivo y controlado del TSR conforme se incrementó su dosificación, lo que evidencia un comportamiento más estable y predecible frente al daño inducido por humedad. La consistencia observada sugiere una interacción más uniforme entre el polvo de hierro fundido y el asfalto, favoreciendo la adhesión y la cohesión interna de la mezcla. En contraste, la variabilidad reportada en el estudio con polímero podría estar asociada a su comportamiento termoplástico. En conjunto, los resultados validan al polvo de hierro fundido como un aditivo más confiable para mejorar la resistencia al daño inducido por humedad en mezclas asfálticas en caliente.

5.2.2.5 Discusión del objetivo específico 5 a partir de los resultados

Examinar como mejora la incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% en la resistencia al desgaste de la mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo Cántabro.

Nuestros resultados evidenciaron que la adición de polvo de hierro fundido generó una mejora significativa en la resistencia al desgaste de la mezcla asfáltica. Según la normativa vigente, que establece un valor máximo de 20% para la pérdida por desgaste, se verificó que tanto la mezcla patrón (3.83%) como las mezclas modificadas cumplieron con dicho requisito. No obstante, la incorporación del polvo de hierro fundido produjo una reducción progresiva y sustancial de la pérdida por desgaste, registrándose valores de 2.37% para la dosificación del 17%, 1.25% para el 20% y 1.11% para el 23%. Estos resultados no solo cumplen con la normativa, sino que evidencian una mejora significativa en la cohesión interna de la mezcla y en su resistencia al desprendimiento de partículas.

Cabe señalar que no se identificaron investigaciones previas que evalúen la resistencia al desgaste mediante el uso de polvo de hierro fundido, lo que pone en evidencia un vacío de información técnica respecto al comportamiento de este material frente a dicha propiedad. Por esta razón, los resultados obtenidos fueron contrastados con estudios que emplearon otros materiales alternativos como aditivos en mezclas asfálticas. En este contexto, la tesis desarrollada por Aguilar y Chauca (2022), en la que se incorporó un 15% de grafito, reportó una pérdida por desgaste de 4.53% en la mezcla modificada, valor que resultó superior al obtenido en todas las mezclas con polvo de hierro fundido evaluadas en la presente investigación. Mientras que el grafito mostró solo una mejora marginal respecto a su mezcla patrón (4.68%), el polvo de hierro fundido evidenció un desempeño notablemente superior, reduciendo la pérdida por desgaste a más de la mitad en las mayores dosificaciones.

En síntesis, la incorporación de polvo de hierro fundido en la mezcla asfáltica se presenta como un aditivo altamente eficaz para mitigar el daño por desgaste. La mejora progresiva observada al incrementar la dosificación del aditivo indica que el polvo de hierro fundido optimiza la cohesión y la resistencia a la abrasión de la mezcla, superando el comportamiento de otros materiales alternativos como el grafito.

5.2.3 Prueba de hipótesis

5.2.3.1 Contraste de hipótesis

Hipótesis general

La incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% influye mejorando las propiedades físicas-mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente - Abancay, 2025.

Hipótesis específicas

a. Primera hipótesis específica

La incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20% y 23% influye mejorando los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo Marshall.

Para la validación estadística de la hipótesis se aplica el primer supuesto del ANOVA, correspondiente a la prueba de Shapiro-Wilk, utilizada para determinar si un conjunto de datos presenta una distribución normal, lo cual constituye un requisito clave antes de aplicar análisis estadísticos paramétricos como el ANOVA.

El ensayo Marshall permite contrastar los parámetros volumétricos (VA, PU y VMA) entre la mezcla patrón y las mezclas modificadas con polvo de hierro fundido.

Los resultados de las diferentes mezclas analizadas se detallan a continuación:

Para el parámetro PU, los valores son los siguientes: 2.34 gr/cm³ para la mezcla patrón, 2.58 gr/cm³ con 17% de polvo de hierro fundido, 2.55 gr/cm³ con 20% y 2.40 gr/cm³ con 23%.

Respecto al contenido de VA (vacíos de aire), la mezcla patrón presenta 5.87%, mientras que las mezclas modificadas con polvo de hierro fundido registran 3.70% (17%), 3.29% (20%) y 2.07% (23%). Estos valores reflejan una mejora progresiva en la compactación de la mezcla a medida que aumenta el porcentaje de aditivo, aunque la mezcla patrón y la de 17 % no alcanzan el rango permitido según la normativa.

En cuanto al VMA (vacíos en el agregado mineral), la mezcla patrón alcanza 24.56%, mientras que las mezclas con polvo de hierro fundido presentan 16.82% (17%), 17.68% (20%) y 22.63% (23%). Aunque los valores disminuyen respecto a la mezcla patrón, las adiciones permiten mantener un volumen adecuado de vacíos en el agregado, logrando un buen

equilibrio entre densificación y espacio interno de la mezcla.

Parámetros volumétricos: Peso unitario (PU)

Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk)

- Hipótesis nula (H_0): Los valores del PU presentan una distribución normal.
- Hipótesis alternativa (H_a): Los valores del PU no presentan una distribución normal.

Tabla 31

Resultados del PU (gr/cm³)

Resumen del PU (gr/cm³)			
Patrón	17% - Polvo de hierro fundido	20% - Polvo de hierro fundido	23% - Polvo de hierro fundido
(P-1) – 2.33	(P-4) – 2.59	(P-7) – 2.55	(P-10) – 2.40
(P-2) – 2.35	(P-5) – 2.57	(P-8) – 2.54	(P-11) – 2.39
(P-3) – 2.34	(P-6) – 2.58	(P-9) – 2.57	(P-12) – 2.41

Nota. Resumen de los valores del PU en probetas patrón y modificadas

Tabla 32

Prueba de Shapiro-Wilk aplicado al PU

Grupo	Estadístico W	Valor p
Patrón	1.0000	1.0000
17%	1.0000	1.0000
20%	0.9640	0.6370
23%	1.0000	1.0000

Nota. En todos los grupos, el valor $p > 0.05$; por lo tanto, no se rechaza la H_0 . Los datos del PU presentan una distribución normal.

Consideraciones estadísticas

Si los valores p fueran ≤ 0.05 , se utilizaría el análisis mediante la prueba de Kruskal-Wallis. Como el valor $p > 0.05$, se confirma que los datos cumplen la suposición de normalidad y permiten continuar con la aplicación del ANOVA, suponiendo que la homogeneidad de varianzas también se comprueba.

Prueba de igualdad de varianzas

Para validar el uso de ANOVA se aplican las pruebas de Bartlett y Levene.

- H_0 : Las varianzas del PU son iguales entre los grupos.

- H_a : Al menos un grupo presenta una varianza del PU diferente.

Tabla 33

Estadísticos de homogeneidad de varianzas

Prueba	Valor p
Bartlett	0.9184
Levene	0.9159

Nota. El valor $p > 0.05$ en ambas pruebas; por lo tanto, no se rechaza la H_0 y se asume que las varianzas son homogéneas entre los grupos.

Consideraciones estadísticas

Si los valores p fueran ≤ 0.05 , se optaría por la prueba de Kruskal-Wallis en lugar de ANOVA.

ANOVA

- H_0 : No se presentan diferencias significativas en las medias del PU entre los grupos evaluados.
- H_a : Se presenta al menos una diferencia significativa en las medias del PU entre los grupos evaluados.

Tabla 34

Estadísticos descriptivos del PU

Grupo	Media	sd	cv (%)	Valor mínimo	Valor máximo
Patrón	2.3400	0.0100	0.4270	2.3300	2.3500
17%	2.5800	0.0100	0.3880	2.5700	2.5900
20%	2.5500	0.0153	0.5980	2.5347	2.5653
23%	2.4000	0.0100	0.4170	2.3900	2.4100

Nota. Se resumen los valores estadísticos del PU. La media más alta corresponde a la mezcla con 17% de polvo de hierro fundido (2.5800 gr/cm³), observándose baja dispersión de datos en todos los grupos.

Tabla 35

Resultados del ANOVA aplicado al PU

Fuente	SC	gl	CM	Valor F	Valor p	F crítico
Grupo	0.1225	3	0.0408	306.25	0.0000	4.0662

Nota. Se observa que el valor $F > F$ crítico y el valor $p < 0.05$; por lo tanto, se rechaza la H_0 , asumiendo que existen diferencias significativas entre los grupos.

Comparaciones múltiples (Tukey)

- H_0 : No se identifican diferencias significativas en las medias del PU al comparar los grupos.
- H_a : Al menos una media del PU difiere de manera significativa respecto a los demás grupos.

Tabla 36

Resultados de la prueba Tukey aplicado al PU

		Tukey				
Polvo de hierro fundido	Media	Error estándar	Valor p	Confianza del 95%		
				Valor mínimo	Valor máximo	
Patrón	17%	0.2400	0.0067	0.0000	0.2098	0.2702
	20%	74.3233	0.0067	0.0000	0.1831	0.2435
	23%	135.4433	0.0067	0.0010	0.0298	0.0902
17%	Patrón	0.2400	0.0067	0.0000	0.2098	0.2702
	20%	-0.0267	0.0067	0.0848	-0.0569	0.0035
	23%	-0.1800	0.0067	0.0000	-0.2102	-0.1498
20%	Patrón	74.3233	0.0067	0.0000	0.1831	0.2435
	17%	-0.0267	0.0067	0.0848	-0.0569	0.0035
	23%	-0.1533	0.0067	0.0000	-0.1835	0.1231
23%	Patrón	135.4433	0.0067	0.0010	0.0298	0.0902
	17%	-0.1800	0.0067	0.0000	-0.2102	-0.1498
	20%	-0.1533	0.0067	0.0000	-0.1835	0.1231

Nota. Se evidencian diferencias significativas del PU entre la mayoría de los grupos; por lo tanto, se rechaza la H_0 y se asume que entre las dosificaciones de 17% y 20% no se observan diferencias significativas, lo que sugiere un efecto similar.

Interpretación general

Los resultados indican que los datos del PU cumplen con los criterios de distribución normal y homogeneidad de varianzas, lo que justifica la aplicación del ANOVA. El análisis estadístico evidencia la existencia de diferencias significativas entre los grupos (valor $p <$

0.05), confirmando que la incorporación de polvo de hierro fundido influye de manera significativa en el PU. En particular, las dosificaciones del 17%, 20% y 23% presentan incrementos estadísticamente significativos del PU en comparación con la mezcla patrón, efecto que, de acuerdo con el análisis estadístico, se atribuye directamente a la incorporación del aditivo.

Parámetros volumétricos: Vacíos de aire (VA)

Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk)

- H_0 : Los valores de los VA presentan una distribución normal.
- H_a : Los valores de los VA no presentan una distribución normal.

Tabla 37

Resultados de los VA (%)

Resumen de VA (%)			
Patrón	17%- Polvo de hierro fundido	20%- Polvo de hierro fundido	23%- Polvo de hierro fundido
(P-1) – 6.28	(P-4) – 4.10	(P-7) – 3.16	(P-10) – 3.07
(P-2) – 5.47	(P-5) – 3.30	(P-8) – 2.75	(P-11) – 3.47
(P-3) – 5.87	(P-6) – 3.70	(P-9) – 3.96	(P-12) – 2.67

Nota. Resumen de los valores de VA en probetas patrón y modificadas.

Tabla 38

Prueba de Shapiro-Wilk aplicado a los VA

Grupo	Estadístico W	Valor p
Patrón	1.0000	0.9860
17%	1.0000	1.0000
20%	0.9670	0.6490
23%	1.0000	1.0000

Nota. En todos los grupos, el valor $p > 0.05$; por lo tanto, no se rechaza la H_0 . Los datos del PU presentan una distribución normal.

Consideraciones estadísticas

Dado que el valor $p > 0.05$, los datos cumplen la suposición de normalidad y permiten aplicar ANOVA, suponiendo que la homogeneidad de varianzas también se verifica.

Prueba de igualdad de varianzas

Para validar el uso de ANOVA se aplican las pruebas de Bartlett y Levene.

- H_0 : Las varianzas de los VA son iguales entre los grupos.
- H_a : Al menos un grupo presenta una varianza de los VA diferente.

Tabla 39*Estadísticos de homogeneidad de varianzas*

Prueba	Valor p
Bartlett	0.9167
Levene	0.9126

Nota. El valor $p > 0.05$ en ambas pruebas; por lo tanto, no se rechaza la H_0 y se asume que las varianzas son homogéneas entre los grupos.

Consideraciones estadísticas

Si los valores p fueran ≤ 0.05 , se optaría por la prueba de Kruskal-Wallis en lugar de ANOVA.

ANOVA

- H_0 : No se presentan diferencias significativas en las medias de los VA entre los grupos evaluados.
- H_a : Se presenta al menos una diferencia significativa en las medias de los VA entre los grupos evaluados.

Tabla 40*Estadísticos descriptivos de los VA*

Grupo	Media	sd	cv (%)	Valor mínimo	Valor máximo
Patrón	5.8733	0.4052	6.8995	5.4681	6.2785
17%	3.7000	0.4041	10.9216	3.2959	4.1041
20%	3.2900	0.6056	18.4018	2.6844	3.8956
23%	3.0700	0.4012	13.0623	2.6688	3.4712

Nota. La media de los VA disminuye de 5.8733% a 3.0700% al aumentar el polvo de hierro fundido, indicando que la mezcla adquiere mayor densidad. La dispersión de los datos es baja.

Tabla 41

Resultados del ANOVA aplicado a los VA

Fuente	SC	gl	CM	Valor F	Valor p	F crítico
Grupo	14.9018	3	4.9673	23.0304	0.0003	4.0662

Nota. Se observa que el valor $F > F$ crítico y el valor $p < 0.05$; por lo tanto, se rechaza la H_0 , indicando diferencias significativas entre los grupos.

Comparaciones múltiples (Tukey)

- H_0 : No se identifican diferencias significativas en las medias de los VA al comparar los grupos.
- H_a : Al menos una media de los VA difiere de manera significativa respecto a los demás grupos.

Tabla 42

Resultados de la prueba Tukey aplicado a los VA

Tukey						
Polvo de hierro fundido	Media	Error estándar	Valor p	Confianza del 95%		
				Valor mínimo	Valor máximo	
Patrón	17%	-2.1733	0.6195	0.0020	-3.3876	-0.9590
	20%	-2.5833	0.6195	0.0006	-3.7976	-1.3690
	23%	-2.8033	0.6195	0.0004	-4.0176	-1.5890
17%	Patrón	-2.1733	0.6195	0.0020	-3.3876	-0.9590
	20%	-0.4100	0.6195	0.7098	-1.6243	0.8043
	23%	-0.6300	0.6195	0.4007	-1.8443	0.5843
20%	Patrón	-2.5833	0.6195	0.0006	-3.7976	-1.3690
	17%	-0.4100	0.6195	0.7098	-1.6243	0.8043
	23%	-0.2200	0.6195	0.9353	-1.4343	0.9943
23%	Patrón	-2.8033	0.6195	0.0004	-4.0176	-1.5890
	17%	-0.6300	0.6195	0.4007	-1.8443	0.5843
	20%	-0.2200	0.6195	0.9353	-1.4343	0.9943

Nota. Se evidencian diferencias significativas entre la mezcla patrón y aquellas que incorporan polvo de hierro fundido; mientras que entre las tres dosificaciones no se evidencian diferencias; por lo tanto, se rechaza la H_0 y se asume que existen diferencias significativas en los VA con respecto a la mezcla patrón.

Interpretación general

Los resultados indican que los datos de VA cumplen con los criterios de distribución normal y homogeneidad de varianzas, lo que justifica la aplicación del ANOVA. El análisis estadístico evidencia la existencia de diferencias significativas entre los grupos (valor $p < 0.05$), confirmando que la incorporación de polvo de hierro fundido influye de manera significativa en los vacíos de aire. En particular, las dosificaciones del 17%, 20% y 23% generan una reducción estadísticamente significativa de los vacíos de aire en comparación con la mezcla patrón, efecto que se atribuye directamente a la incorporación del aditivo.

Parámetros volumétricos: Vacíos en el agregado mineral (VMA)

Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk)

- H_0 : Los valores de los VMA presentan una distribución normal.
- H_a : Los valores de los VMA no presentan una distribución normal.

Tabla 43

Resultados de VMA (%)

Resumen de VMA (%)			
Patrón	17% - Polvo de hierro fundido	20% - Polvo de hierro fundido	23% - Polvo de hierro fundido
(P-1) – 24.88	(P-4) – 16.50	(P-7) – 17.79	(P-10) – 22.63
(P-2) – 24.24	(P-5) – 17.14	(P-8) – 18.11	(P-11) – 22.95
(P-3) – 24.56	(P-6) – 16.82	(P-9) – 17.14	(P-12) – 22.30

Nota. Resumen de los valores de VMA en probetas patrón y modificadas

Tabla 44

Prueba de Shapiro-Wilk aplicado a los VMA

Grupo	Estadístico W	Valor p
Patrón	1.00000	1.0000
17%	1.00000	1.0000
20%	0.96285	0.6296
23%	0.99992	0.9830

Nota. En todos los grupos el valor $p > 0.05$; por lo tanto, no se rechaza la H_0 . Los datos siguen una distribución normal

Consideraciones estadísticas

Dado que el valor $p > 0.05$, los datos cumplen la suposición de normalidad y permiten aplicar ANOVA, asumiendo que la homogeneidad de varianzas también se verifica.

Prueba de igualdad de varianzas

Para validar el uso de ANOVA se aplican las pruebas de Bartlett y Levene.

- H_0 : Las varianzas de los VMA son iguales entre los grupos.
- H_a : Al menos un grupo presenta una varianza de los VMA diferente.

Tabla 45

Estadísticos de homogeneidad de varianzas

Prueba	Valor p
Bartlett	0.9150
Levene	0.9135

Nota. El valor $p > 0.05$ en ambas pruebas; por lo tanto, no se rechaza la H_0 y se asume que las varianzas son homogéneas entre los grupos.

Consideraciones estadísticas

Si los valores p fueran ≤ 0.05 , se optaría por la prueba de Kruskal-Wallis en lugar de ANOVA.

ANOVA

- H_0 : No se presentan diferencias significativas en las medias del VMA entre los grupos evaluados.
- H_a : Se presenta al menos una diferencia significativa en las medias del VMA entre los grupos evaluados.

Tabla 46*Estadísticos descriptivos de los VMA*

Grupo	Media	sd	cv (%)	Límite inferior	Límite superior
Patrón	24.5600	0.3200	1.30	23.7651	25.3549
17%	16.8200	0.3200	1.90	16.0251	17.6149
20%	17.6800	0.4943	2.80	16.4522	18.9078
23%	22.6267	0.3250	1.44	21.8193	23.4340

Nota. Al adicionar polvo de hierro fundido, la media de los VMA disminuye respecto al patrón, pero aumenta nuevamente con la mayor dosificación (23%). La dispersión de los datos es baja.

Tabla 47*Resultados del ANOVA aplicado a los VMA*

Fuente	SC	gl	CM	Valor F	Valor p	F crítico
Grupo	127.4297	3	42.4766	306.2846	0.00000	5.4095

Nota. Se observa que el valor $F > F$ crítico y el valor $p < 0.05$; por lo tanto, se rechaza la H_0 , asumiendo que existen diferencias significativas entre los grupos.

Comparaciones múltiples (Tukey)

- H_0 : No se identifican diferencias significativas en las medias de los VMA al comparar los grupos.
- H_a : Al menos una media de los VMA difiere de manera significativa respecto a los demás grupos.

Tabla 48

Resultados de la prueba Tukey aplicado a los VMA

Polvo de hierro fundido		Tukey				
		Media	Error estándar	Valor p	Confianza del 95%	
					Valor mínimo	Valor máximo
Patrón	17%	-7.7400	0.4223	0.0000	-8.7137	-6.7663
	20%	-6.8800	0.4223	0.0000	-7.8537	-5.9063
	23%	-1.9333	0.4223	0.0010	-2.9071	-0.9596
17%	Patrón	-7.7400	0.4223	0.0000	-8.7137	-6.7663
	20%	0.8600	0.4223	0.0848	-0.1137	1.8337
	23%	5.8067	0.4223	0.0000	4.8329	6.7804
20%	Patrón	-6.8800	0.4223	0.0000	-7.8537	-5.9063
	17%	0.8600	0.4223	0.0848	-0.1137	1.8337
	23%	4.9467	0.4223	0.0000	3.9729	5.9204
23%	Patrón	-1.9333	0.4223	0.0010	-2.9071	-0.9596
	17%	5.8067	0.4223	0.0000	4.8329	6.7804
	20%	4.9467	0.4223	0.0000	3.9729	5.9204

Nota. Se evidencian diferencias significativas entre la mayoría de los grupos, excepto entre las dosificaciones del 17% y 20%; por lo tanto, se rechaza la H_0 y se asume que las medias de los VMA varían según el porcentaje de polvo de hierro fundido.

Interpretación general

Los resultados indican que los datos de VMA cumplen con los criterios de distribución normal y homogeneidad de varianzas, lo que respalda la aplicación del ANOVA. El análisis estadístico evidencia la existencia de diferencias significativas entre los grupos (valor $p < 0.05$), confirmando que la incorporación de polvo de hierro fundido influye de manera significativa en el VMA. En particular, las dosificaciones del 17%, 20% y 23% presentan variaciones estadísticamente significativas del VMA en comparación con la mezcla patrón, efecto que se atribuye directamente a la incorporación del aditivo.

b. Hipótesis específica 02

La incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% influye mejorando la resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica en caliente, mediante los parámetros del ensayo Marshall.

Para contrastar estadísticamente la hipótesis se aplica el primer supuesto del ANOVA, correspondiente a la prueba de Shapiro-Wilk, utilizada para determinar si los datos siguen

una distribución normal, condición esencial antes de realizar análisis estadísticos paramétricos como el ANOVA.

El ensayo Marshall permite evaluar y contrastar la resistencia a la deformación, expresada en términos de estabilidad y flujo, tanto en la mezcla patrón como en las mezclas con incorporación de polvo de hierro fundido.

Los resultados de las mezclas analizadas se detallan a continuación: la mezcla patrón alcanza una estabilidad de 1261.28 kg, mientras que las mezclas con 17%, 20% y 23% de polvo de hierro fundido alcanzan 1289.17 kg, 1335.61 kg y 1396.73 kg respectivamente. Estos valores evidencian una mejora progresiva en la resistencia a la deformación, superando ampliamente el límite mínimo requerido.

Respecto al flujo, la mezcla patrón registra 3.26 mm, mientras que las mezclas con 17%, 20% y 23% registran valores de 3.30 mm, 3.40 mm y 3.55 mm, respectivamente. Aunque se observa un incremento mínimo, todos los valores se mantienen dentro del rango permitido, excepto el correspondiente al 23%, que no está dentro del rango permitido

Resistencia a la deformación: Estabilidad

Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk)

- H_0 : Los valores de la estabilidad presentan una distribución normal.
- H_a : Los valores de la estabilidad no presentan una distribución normal.

Tabla 49

Resultados de la estabilidad (kg)

Resumen de la estabilidad (kg)			
Patrón	17%- Polvo de hierro fundido	20%- Polvo de hierro fundido	23%- Polvo de hierro fundido
(P-1) - 1451.89	(P-4) - 1296.65	(P-7) - 1348.17	(P-10) - 1390.27
(P-2) - 1222.95	(P-5) - 1317.81	(P-8) - 1382.13	(P-11) - 1223.37
(P-3) - 1109.01	(P-6) - 1252.74	(P-9) - 1276.52	(P-12) - 1576.54

Nota. Resumen de los valores de la estabilidad en probetas patrón y modificadas

Tabla 50*Prueba de Shapiro-Wilk aplicado a la estabilidad*

Grupo	Estadístico W	Valor p
Patrón	0.96386	0.6347
17%	0.96085	0.6196
20%	0.95927	0.6119
23%	0.99900	0.9395

Nota. El valor $p > 0.05$; por lo tanto, no se rechaza la H_0 . Los datos de estabilidad presentan una distribución normal.

Consideraciones estadísticas

Dado que el valor $p > 0.05$, los datos cumplen la suposición de normalidad y permiten aplicar ANOVA, asumiendo que la homogeneidad de varianzas también se verifica.

Prueba de igualdad de varianzas

Para validar el uso de ANOVA se aplican las pruebas de Bartlett y Levene.

- H_0 : Las varianzas de la estabilidad son iguales entre los grupos.
- H_a : Al menos un grupo presenta una varianza de la estabilidad diferente.

Tabla 51*Estadísticos de homogeneidad de varianzas*

Prueba	Valor p
Barlett	0.1542
Levene	0.3622

Nota. El valor $p > 0.05$ en ambas pruebas; por lo tanto, no se rechaza la H_0 y se asume homogeneidad de varianzas.

Consideraciones estadísticas

Dado que en las pruebas el valor $p > 0.05$ (lo que indica homogeneidad de varianzas), se opta por aplicar ANOVA en lugar de la prueba de Kruskal-Wallis.

ANOVA

- H_0 : No se presentan diferencias significativas en las medias de la estabilidad entre los grupos evaluados.

- H_a : Se presenta al menos una diferencia significativa en las medias de la estabilidad entre los grupos evaluados.

Tabla 52*Estadísticos descriptivos de la estabilidad*

Grupo	Media	sd	cv (%)	Valor mínimo	Valor máximo
Patrón	1261.2833	175.0159	0.1387	1109.01	1451.89
17%	1289.0667	33.2175	0.0258	1252.74	1317.81
20%	1335.6067	53.8757	0.0403	1276.52	1382.13
23%	1396.3933	176.7399	0.1266	1223.37	1576.54

Nota. Se evidencia que, al aumentar la cantidad de polvo de hierro fundido, la media de la estabilidad incrementa de 1261.2833 kg a 1396.3933 kg, reflejando una mejora en la resistencia de la mezcla. La dispersión de los datos es baja.

Tabla 53*Resultados del ANOVA para estabilidad*

Fuente	SC	gl	CM	Valor F	Valor p	F crítico
Grupo	31.600	3	10533.33	0.641	0.61	4.0662

Nota. Se observa que el valor $F < F$ crítico y el valor $p > 0.05$; por lo tanto, no se rechaza la H_0 , asumiendo que no existen diferencias significativas entre los grupos.

Comparaciones múltiples (Tukey)

- H_0 : No se identifican diferencias significativas en las medias de la estabilidad al comparar los grupos.
- H_a : Al menos una media de la estabilidad difiere de manera significativa respecto a los demás grupos.

Tabla 54Resultados de la prueba Tukey *aplicado a la estabilidad*

		Tukey				
Polvo de hierro fundido		Media	Error estándar	Valor p	Confianza del 95%	
					Valor mínimo	Valor máximo
Patrón	17%	27.7833	145.3342	0.9929	-307.3580	362.9247
	20%	74.3233	145.3342	0.8903	-260.8180	409.4647
	23%	135.4433	145.3342	0.5910	-199.6980	470.5847
17%	Patrón	27.7833	145.3342	0.9929	-307.3580	362.9247
	20%	46.54	145.3342	0.9688	-288.6013	381.6813
	23%	107.660	145.3342	0.7384	-227.4813	442.8013
20%	Patrón	74.3233	145.3342	0.8903	-260.8180	409.4647
	17%	46.5400	145.3342	0.9688	-288.6013	381.6813
	23%	61.12	145.3342	0.9341	-274.0213	396.2613
23%	Patrón	135.4433	145.3342	0.5910	-199.6980	470.5847
	17%	107.6600	145.3342	0.7384	-227.4813	442.8013
	20%	61.12	145.3342	0.9341	-274.0213	396.2613

Nota. En todos los grupos los valores $p > 0.05$; por lo tanto, no se rechaza la H_0 , asumiéndose que no existen diferencias significativas entre las medias de la estabilidad en las distintas dosificaciones de polvo de hierro fundido.

Interpretación general

Los resultados indican que los datos de la estabilidad cumplen con los criterios de distribución normal y homogeneidad de varianzas, lo que justifica la aplicación del ANOVA. El análisis estadístico muestra que no existen diferencias significativas entre los grupos (valor $p > 0.05$), lo que evidencia que la incorporación de polvo de hierro fundido no genera un efecto estadísticamente significativo sobre la estabilidad. En este contexto, las variaciones observadas no pueden atribuirse de manera concluyente a la adición del material, sino que podrían estar asociadas a la variabilidad propia del ensayo o al azar. Asimismo, la prueba de Tukey confirma la ausencia de diferencias significativas en las comparaciones múltiples, evidenciando que las dosificaciones del 17%, 20% y 23% no modifican de manera significativa la estabilidad respecto a la mezcla patrón.

Resistencia a la deformación: Flujo

Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk)

- H_0 : Los valores del flujo presentan una distribución normal.
- H_a : Los valores del flujo no presentan una distribución normal.

Tabla 55

Resultados del flujo (mm)

Resumen de flujo (mm)			
Patrón	17%- Polvo de hierro fundido	20%- Polvo de hierro fundido	23%- Polvo de hierro fundido
(P-1) - 3.58	(P-4) - 3.05	(P-7) - 3.40	(P-10) - 3.66
(P-2) - 3.38	(P-5) - 3.56	(P-8) - 3.35	(P-11) - 3.43
(P-3) - 2.82	(P-6) - 3.30	(P-9) - 3.45	(P-12) - 3.56

Nota. Resumen de los valores del flujo en probetas patrón y modificadas

Tabla 56

Prueba Shapiro-Wilk aplicado al flujo

Grupo	Estadístico W	Valor p
Patrón	0.93041	0.4902
17%	0.99987	0.9784
20%	1.00000	1.0000
23%	0.99436	0.8564

Nota. El valor $p > 0.05$; por lo tanto, no se rechaza la H_0 . Los datos presentan una distribución normal

Consideraciones estadísticas

Dado que el valor $p > 0.05$, los datos cumplen la suposición de normalidad y permiten aplicar ANOVA, asumiendo que la homogeneidad de varianzas también se verifica.

Prueba de igualdad de varianzas

Para validar el uso de ANOVA se aplican las pruebas Barlett y Levene

- H_0 : Las varianzas del flujo son iguales entre los grupos.
- H_a : Al menos un grupo presenta una varianza del flujo diferente.

Tabla 57*Estadísticos de homogeneidad de varianzas*

Prueba	Valor p
Barlett	0.1147
Levene	0.2801

Nota. El valor $p > 0.05$ en ambas pruebas; por lo tanto, no se rechaza la H_0 y se asume que las varianzas son homogéneas entre los grupos.

Consideraciones estadísticas

Dado que el valor $p > 0.05$ (lo que indica homogeneidad de varianzas), se opta por aplicar ANOVA en lugar de la prueba de Kruskal-Wallis.

ANOVA

- H_0 : No se presentan diferencias significativas en las medias del flujo entre los grupos evaluados.
- H_a : Se presenta al menos una diferencia significativa en las medias del flujo entre los grupos evaluados.

Tabla 58*Estadísticos descriptivos del flujo*

Grupo	Media	sd	cv (%)	Valor mínimo	Valor máximo
Patrón	3.2600	0.3940	12.1000	2.2800	4.2400
17%	3.3000	0.2550	7.7200	2.6700	3.9400
20%	3.4000	0.0500	1.4700	3.2800	3.5200
23%	3.5500	0.1150	3.2500	3.2600	3.8400

Nota. Se muestra que, al adicionar polvo de hierro fundido, la media del flujo incrementa respecto al patrón, de 3.2600 mm a 3.5500 mm. Este aumento refleja una mayor deformación plástica de la mezcla bajo carga, Asimismo, la dispersión de los datos es baja.

Tabla 59*Resultados del ANOVA aplicado al flujo*

Fuente	SC	gl	CM	Valor F	Valor p	F crítico
Grupo	0.1487	3	0.0496	0.8400	0.5091	4.0662

Nota. Se observa que el valor $F < F$ crítico y el valor $p > 0.05$; por lo tanto, no se rechaza la H_0 , asumiendo que no existen diferencias significativas entre los grupos.

Comparaciones múltiples (Tukey)

- H_0 : No se identifican diferencias significativas en las medias del flujo al comparar los grupos.
- H_a : Al menos una media del flujo difiere de manera significativa respecto a los demás grupos.

Tabla 60

Resultados de la prueba Tukey aplicado al flujo

Polvo de hierro fundido		Tukey				
		Media	Error estándar	Valor p	Confianza del 95%	
					Valor mínimo	Valor máximo
Patrón	17%	0.0433	0.1402	0.9960	-0.5918	0.6785
	20%	0.1400	0.1402	0.8920	-0.4952	0.7752
	23%	0.2900	0.1402	0.4998	-0.3452	0.9252
17%	Patrón	0.0433	0.1402	0.9960	-0.5918	0.6785
	20%	0.0967	0.1402	0.9688	-288.6013	381.6813
	23%	0.2467	0.1402	0.6192	-0.3885	0.8818
20%	Patrón	0.1400	0.1402	0.8903	-260.8180	409.4647
	17%	0.0967	0.1402	0.9688	-288.6013	381.6813
	23%	0.1500	0.1402	0.8716	-0.4852	0.7852
23%	Patrón	0.2900	0.1402	0.4998	-0.3452	0.9252
	17%	0.2467	0.1402	0.6192	-0.3885	0.8818
	20%	0.1500	0.1402	0.8716	-0.4852	0.7852

Nota. Se evidencian que todos los valores $p > 0.05$ en las comparaciones múltiples, lo que indica que no existen diferencias significativas en el flujo entre las distintas dosificaciones de polvo de hierro fundido; por lo tanto, no se rechaza la H_0 .

Interpretación general

Los resultados indican que los datos del flujo cumplen con los criterios de distribución normal y homogeneidad de varianzas, lo que respalda la aplicación del ANOVA. El análisis estadístico muestra que no existen diferencias significativas entre los grupos (valor $p > 0.05$), evidenciando que la incorporación de polvo de hierro fundido no produce un efecto estadísticamente significativo sobre el flujo. En este contexto, las variaciones observadas no pueden atribuirse de manera concluyente a la adición del material, sino que podrían deberse a la variabilidad propia del ensayo o al azar. Asimismo, la prueba de Tukey confirma la ausencia de diferencias significativas en las comparaciones múltiples, evidenciando que las

dosificaciones del 17%, 20% y 23% no modifican de manera significativa el flujo respecto a la mezcla patrón.

c. Hipótesis específica 03

La incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% influye mejorando la resistencia a la tracción indirecta de la mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo Lottman.

Para la validación estadística de la hipótesis se aplica el primer supuesto del ANOVA, mediante la prueba de Shapiro-Wilk, que permite verificar si los datos se ajustan a una distribución normal, requisito fundamental antes de emplear análisis estadísticos paramétricos como el ANOVA.

El ensayo Lottman permite evaluar la resistencia a la tracción indirecta (ITS) en condiciones húmedas y secas de la mezcla patrón y de las mezclas con incorporación de polvo de hierro fundido.

Se presentan a continuación los resultados de las mezclas evaluadas. Para la resistencia a la tracción húmeda (RTH), la mezcla patrón registra un valor de 658.72 kPa, mientras que al incorporar polvo de hierro fundido al 17%, 20% y 23%, se registran valores de 674.06 kPa, 679.35 kPa y 685.92 kPa, respectivamente. Esto refleja un incremento progresivo de la resistencia mecánica inmediata bajo condiciones húmedas, indicando que el aditivo mejora la cohesión de la mezcla. Para la resistencia a la tracción seca (RTS), el grupo sin aditivo alcanza un valor de 812.16 kPa. Con 17 % de adición, se obtiene 803.96 kPa, con 20%, 786.56 kPa y con 23%, 785.86 kPa. Estos resultados muestran que, a diferencia de lo observado en húmedo, la resistencia en seco disminuye con la incorporación del aditivo.

Resistencia a la tracción indirecta (ITS): Capacidad estructural (húmedo)

Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk)

- H_0 : Los valores de la ITS-húmedo presentan una distribución normal.

- H_a : Los valores de la ITS-húmedo no presentan una distribución normal.

Tabla 61

Resultados de la ITS-húmedo (kPa)

Resumen de la ITS-húmedo (kPa)			
Patrón	17% - Polvo de hierro fundido	20% - Polvo de hierro fundido	23% - Polvo de hierro fundido
(P-1) - 664.42	(P-4) - 672.28	(P-7) - 686.16	(P-10) - 685.03
(P-2) - 650.66	(P-5) - 673.17	(P-8) - 680.12	(P-11) - 696.41
(P-3) - 661.09	(P-6) - 676.74	(P-9) - 671.77	(P-12) - 676.32

Nota. Resumen de los valores de la ITS-húmedo en probetas patrón y modificadas

Tabla 62

Prueba de Shapiro-Wilk aplicado a la ITS-húmedo

Grupo	Estadístico W	Valor p
Patrón	0.9185	0.4470
17%	0.8926	0.3622
20%	0.9915	0.8235
23%	0.9941	0.8537

Nota. En todos los grupos, se presentan valores $p > 0.05$; por lo tanto, no se rechaza la H_0 .

Los datos de la ITS-húmedo presentan una distribución normal.

Consideraciones estadísticas

Dado que el valor $p > 0.05$, los datos cumplen la suposición de normalidad y permiten aplicar ANOVA, asumiendo que la homogeneidad de varianzas también se verifica.

Prueba de igualdad de varianzas

Para validar el uso de ANOVA se aplican las pruebas de Bartlett y Levene.

- H_0 : Las varianzas de la ITS-húmedo son iguales entre los grupos.
- H_a : Al menos un grupo presenta una varianza de la ITS-húmedo diferente.

Tabla 63*Estadísticos de homogeneidad de varianzas*

Prueba	Valor p
Bartlett	0.4424
Levene	0.6047

Nota. El valor $p > 0.05$ en ambas pruebas; por lo tanto, no se rechaza la H_0 y se asume que las varianzas son homogéneas entre los grupos.

Consideraciones estadísticas

Dado que el valor $p > 0.05$ (lo que indica homogeneidad de varianzas), se opta por aplicar ANOVA en lugar de la prueba de Kruskal-Wallis.

ANOVA

- H_0 : No se presentan diferencias significativas en las medias de la ITS-húmedo entre los grupos evaluados.
- H_a : Se presenta al menos una diferencia significativa en las medias de la ITS-húmedo entre los grupos evaluados.

Tabla 64*Estadísticos descriptivos de la ITS-húmedo*

Grupo	Media	sd	cv (%)	Valor mínimo	Valor máximo
Patrón	658.7233	7.1753	1.0891	651.5480	665.8987
17%	674.0633	2.3622	0.3504	671.7011	676.4256
20%	679.3500	7.2310	1.0645	672.1190	686.5810
23%	685.9200	10.0753	1.4691	675.8447	695.9953

Nota. Se evidencia que la media de la ITS-húmedo aumenta con la adición de polvo de hierro fundido, de 658.7233 kPa a 685.9200 kPa. Este incremento refleja una mejora en el comportamiento mecánico y la cohesión del material bajo condiciones de saturación. Asimismo, es baja la dispersión de los datos.

Tabla 65

Resultados del ANOVA para la ITS-húmedo

Fuente	SC	gl	CM	Valor F	Valor p	F crítico
Grupos	1209.0960	3	403.0320	7.6471	0.0098	4.0662

Nota. Se observa que el valor $F > F$ crítico y el valor $p < 0.05$; por lo tanto, se rechaza la H_0 , asumiendo que existen diferencias significativas entre los grupos.

Comparaciones múltiples (Tukey)

- H_0 : No se identifican diferencias significativas en las medias de la ITS-húmedo al comparar los grupos.
- H_a : Al menos una media de la ITS-húmedo difiere de manera significativa respecto a los demás grupos.

Tabla 66

Prueba de Tukey aplicado a la ITS-húmedo

		Tukey				
Polvo de hierro fundido		Media	Error estándar	Valor p	Confianza del 95%	
					Valor mínimo	Valor máximo
Patrón	17%	15.3400	4.1914	0.1189	-3.6421	34.3221
	20%	20.6267	4.1914	0.0339	1.6445	39.6088
	23%	27.1967	4.1914	0.0077	8.2145	46.1788
17%	Patrón	15.3400	4.1914	0.1189	-3.6421	34.3221
	20%	5.2867	4.1914	0.8094	-13.6955	24.2688
	23%	11.8567	4.1914	0.2640	-7.1255	30.8388
20%	Patrón	20.6267	4.1914	0.0339	1.6445	39.6088
	17%	5.2867	4.1914	0.8094	-13.6955	24.2688
	23%	6.5700	4.1914	0.6948	-12.4121	25.5521
23%	Patrón	27.1967	4.1914	0.0077	8.2145	46.1788
	17%	11.8567	4.1914	0.2640	-7.1255	30.8388
	20%	6.5700	4.1914	0.6948	-12.4121	25.5521

Nota. La tabla muestra que la prueba encuentra diferencias significativas en la ITS-húmedo solo al comparar la mezcla patrón con las mezclas de 20% y 23% de polvo de hierro fundido; por lo tanto, se rechaza la H_0 y se asume que existen diferencias significativas entre las medias de las distintas dosificaciones.

Interpretación general

Los resultados indican que los datos del ITS-húmedo cumplen con los criterios de

distribución normal y homogeneidad de varianzas, lo que justifica la aplicación del ANOVA. El análisis estadístico evidencia la existencia de diferencias significativas entre los grupos (valor $p < 0.05$), confirmando que la incorporación de polvo de hierro fundido influye de manera significativa en el ITS-húmedo. En particular, las dosificaciones del 20% y 23% presentan incrementos estadísticamente significativos del ITS-húmedo en comparación con la mezcla patrón, efecto que se atribuye directamente a la incorporación del aditivo.

Resistencia a la tracción indirecta (ITS): Capacidad estructural (seco)

Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk)

- H_0 : Los valores de la ITS-seco presentan una distribución normal.
- H_a : Los valores de la ITS-seco no presentan una distribución normal.

Tabla 67

Resultados de la ITS-seco

Resumen de la ITS-seco (kPa)			
Patrón	17% - Polvo de hierro fundido	20% - Polvo de hierro fundido	23% - Polvo de hierro fundido
(P-1) - 809.56	(P-4) - 803.23	(P-7) - 780.19	(P-10) - 790.00
(P-2) - 812.13	(P-5) - 805.73	(P-8) - 789.92	(P-11) - 784.81
(P-3) - 814.79	(P-6) - 802.92	(P-9) - 789.57	(P-12) - 782.76

Nota. Resumen de los valores de la ITS-seco en probetas patrón y modificadas

Tabla 68

Prueba de Shapiro-Wilk para la ITS-seco

Grupo	Estadístico W	Valor p
Patrón	0.9999	0.9810
17%	0.8316	0.1925
20%	0.7769	0.0606
23%	0.9410	0.5314

Nota. En todos los grupos el valor $p > 0.05$; por lo tanto, no se rechaza la H_0 . Los datos de la ITS-seco presentan una distribución normal.

Consideración estadística

Dado que el valor $p > 0.05$, los datos cumplen la suposición de normalidad y permiten aplicar ANOVA, asumiendo que la homogeneidad de varianzas también se verifica.

Prueba de igualdad de varianzas

Para validar el uso de ANOVA se aplican las pruebas de Bartlett y Levene.

- H_0 : Las varianzas de la ITS–seco son iguales entre los grupos.
- H_a : Al menos un grupo presenta una varianza de la ITS–seco diferente.

Tabla 69

Estadísticos de homogeneidad de varianza

Prueba	Valor p
Barlett	0.4654
Levene	0.8288

Nota. El valor $p > 0.05$ en ambas pruebas, por lo tanto, no se rechaza la H_0 y se asume que las varianzas son homogéneas entre los grupos.

Consideración estadística.

Dado que en las pruebas el valor $p > 0.05$ (lo que indica homogeneidad de varianzas), se opta por aplicar ANOVA en lugar de la prueba de Kruskal-Wallis.

ANOVA

- H_0 : No se presentan diferencias significativas en las medias ITS–seco entre los grupos evaluados.
- H_a : Se presenta al menos una diferencia significativa en las medias ITS–seco entre los grupos evaluados.

Tabla 70*Estadísticos descriptivos de la ITS–seco*

Grupo	Media	sd	cv (%)	Valor mínimo	Valor máximo
Patrón	812.1600	2.6151	0.3220	805.6637	818.6563
17%	803.9600	1.5407	0.1916	800.1327	807.7873
20%	786.5600	5.5194	0.7017	772.8492	800.2708
23%	785.8567	3.7318	0.4749	776.5865	795.1269

Nota. Al incrementar la cantidad de polvo de hierro fundido, la media de la ITS-seco disminuye de 812.1600 kPa a 785.8567 kPa. La dispersión de datos es baja.

Tabla 71*Resultados del ANOVA aplicado a la ITS–seco*

Fuente	SC	gl	CM	Valor F	Valor p	F crítico
Grupos	1534.0880	3	511.3627	38.16	0.0000	4.0662

Nota. Se observa que el valor $F > F$ crítico y el valor $p < 0.05$; por lo tanto, se rechaza la H_0 , asumiendo que existen diferencias significativas entre los grupos.

Comparaciones múltiples (Tukey)

- H_0 : No se identifican diferencias significativas en las medias de la ITS–seco al comparar los grupos.
- H_a : Al menos una media de la ITS–seco difiere de manera significativa respecto a los demás grupos.

Tabla 72

Resultados de la prueba Tukey aplicado a la ITS-seco

Polvo de hierro fundido		Media	Tukey			
			Error estándar	Valor p	Confianza del 95%	
					Valor mínimo	Valor máximo
Patrón	17%	-8.200	1.5098	0.095551	-17.77158	1.3715
	20%	25.600	1.5098	0.000123	-35.17158	-16.028
	23%	-26.303	1.5098	0.000101	-35.87491	-16.731
17%	Patrón	-8.200	1.5098	0.095551	-17.77158	1.3715
	20%	-17.400	1.5098	0.001771	-26.97158	-7.8284
	23%	-18.103	1.5098	0.001366	-27.67491	-8.53175
20%	Patrón	25.600	1.5098	0.000123	-35.17158	-16.028
	17%	-17.400	1.5098	0.001771	-26.97158	-7.8284
	23%	-0.7033	1.5098	0.99503	-10.27491	8.8682
23%	Patrón	25.600	1.5098	0.000123	-35.17158	-16.028
	17%	-18.103	1.5098	0.001366	-27.67491	-8.53175
	20%	-0.7033	1.5098	0.99503	-10.27491	8.8682

Nota. La tabla evidencia que la prueba arroja valores $p < 0.05$ en las comparaciones múltiples, lo que indica que existen diferencias significativas entre las medias de la ITS-seco entre las distintas dosificaciones de polvo de hierro fundido; por lo tanto, se rechaza la H_0 .

Interpretación general

Los resultados indican que los datos del ITS-seco cumplen con los criterios de distribución normal y homogeneidad de varianzas, lo que respalda la aplicación del ANOVA. El análisis estadístico evidencia la existencia de diferencias significativas entre los grupos (valor $p < 0.05$), confirmando que la incorporación de polvo de hierro fundido influye de manera significativa en el ITS-seco. En particular, las dosificaciones del 20% y 23% presentan una disminución estadísticamente significativa del ITS-seco en comparación con la mezcla patrón, efecto que se atribuye directamente a la incorporación del aditivo.

d. Hipótesis específica 04

La incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% influye mejorando la resistencia al daño inducido por humedad de la mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo Lottman

Para contrastar estadísticamente la hipótesis, se evalúa el primer supuesto del ANOVA mediante la prueba de Shapiro-Wilk, la cual permite verificar si los datos presentan

una distribución normal. Esta condición resulta fundamental antes de aplicar análisis estadísticos paramétricos como el ANOVA.

El ensayo Lottman permite evaluar la resistencia al daño inducido por humedad (TSR) tanto de la mezcla asfáltica patrón como de las mezclas modificadas con polvo de hierro fundido.

Se presentan a continuación los resultados de las diferentes mezclas evaluadas. La mezcla patrón, sin incorporación del aditivo, presenta un valor de 81.10%, mientras que las mezclas modificadas con adición de polvo de hierro fundido alcanzan valores crecientes: 83.84% con 17%, 86.38% con 20% y 87.28% con 23%. Este aumento progresivo indica que el polvo de hierro fundido reduce el daño que el agua genera a largo plazo, mejorando la resistencia al desprendimiento y la pérdida de cohesión interna, lo que se traduce en una mayor vida útil y durabilidad de la mezcla.

Resistencia al daño inducido por humedad (TSR)

Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk)

- H_0 : Los valores de la TSR presentan una distribución normal.
- H_a : Los valores de la TSR no presentan una distribución normal.

Tabla 73

Resultados de la TSR (%)

Resumen de la TSR (%)			
Patrón	17%- Polvo de hierro fundido	20%- Polvo de hierro fundido	23%- Polvo de hierro fundido
(P-1) - 82.07	(P-4) - 83.70	(P-7) - 87.95	(P-10) - 86.71
(P-2) - 80.12	(P-5) - 83.55	(P-8) - 86.10	(P-11) - 88.74
(P-3) - 81.14	(P-6) - 84.28	(P-9) - 85.08	(P-12) - 86.40

Nota. Resumen de los valores de la TSR en probetas patrón y modificadas.

Tabla 74*Prueba de Shapiro-Wilk aplicado a la TSR*

Grupo	Estadístico W	Valor p
Patrón	0.9993	0.9491
17%	0.8963	0.3739
20%	0.7500	0.0000
23%	0.8474	0.2335

Nota. No todos los grupos presentan un valor $p > 0.05$; por lo tanto, se rechaza la H_0 , indicando que los datos de la TSR no siguen una distribución normal.

Consideraciones estadísticas

Para aplicar ANOVA, todos los grupos deben cumplir el supuesto de normalidad. Como el grupo del 20% no lo cumple, se emplea una prueba no paramétrica, específicamente la prueba de Kruskal–Wallis.

Prueba de Kruskal-Wallis

- H_0 : Las medianas de la TSR son iguales entre los grupos (la incorporación de polvo de hierro fundido no influye significativamente).
- H_a : Al menos una de las medianas de la TSR difiere entre los grupos (la incorporación de polvo de hierro fundido sí influye significativamente).

Tabla 75*Prueba de Kruskal- Wallis aplicado a la TSR*

Prueba	Valor p
Kruskal-Wallis	0.02129

Nota. La tabla muestra que la prueba presenta un valor $p < 0.05$; por lo tanto, se rechaza la H_0 , existiendo al menos una diferencia significativa en las medianas de la TSR entre los grupos. Sin embargo, esta prueba no identifica entre qué grupos existen dichas diferencias.

Consideraciones estadísticas

Dado que la prueba de Kruskal–Wallis presentó un valor $p < 0.05$, para identificar qué comparaciones muestran diferencias significativas se emplea la prueba Post-Hoc de

Dunn con ajuste de los valores p .

Prueba de Dunn (Post-Hoc)

- H_0 : Al comparar los grupos, no existe una diferencia significativa entre la mediana de la TSR de las muestras evaluadas.
- H_a : Al comparar los grupos, existe una diferencia significativa entre la mediana de la TSR de las muestras evaluadas.

Tabla 76

Resultados de la prueba de Dunn con valor p ajustado

Comparación	Z	Valor p no ajustado	Valor p ajustado
Patrón -17%	-1.021	0.3073	0.6147
Patrón 20%	-2.269	0.0233	0.1165
17% - 20%	-1.248	0.2121	0.6364
Patrón - 23%	-2.836	0.0046	0.0274
17% - 23%	-1.815	0.0696	0.2782
20% - 23%	-0.567	0.5706	0.5706

Nota. La tabla indica que existe una diferencia significativa entre el grupo patrón y el grupo con 23 % de polvo de hierro fundido; por lo tanto, se rechaza la H_0 .

Interpretación general

Los resultados indican que los datos de la TSR no cumplen con el criterio de distribución normal, de acuerdo con la prueba de Shapiro–Wilk, por lo que se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis. El análisis estadístico evidencia la existencia de diferencias significativas entre los grupos ($\text{valor } p < 0.05$), confirmando que la incorporación de polvo de hierro fundido influye de manera significativa en la TSR. En particular, la dosificación del 23% presenta un incremento estadísticamente significativo de la TSR en comparación con la mezcla patrón, efecto que, según las comparaciones múltiples realizadas mediante la prueba de Dunn, se atribuye directamente a la incorporación del aditivo.

e. Hipótesis específica 05

La incorporación de polvo de hierro fundido al 17%, 20%, 23% influye mejorando la resistencia al desgaste de la mezcla asfáltica en caliente, mediante el ensayo Cántabro.

La contrastación de la hipótesis se realiza mediante la prueba de Shapiro-Wilk, asociada al primer supuesto del ANOVA, con el fin de comprobar si los datos presentan una distribución normal, lo cual es un requisito clave antes de aplicar muchos análisis estadísticos paramétricos como ANOVA

Según los parámetros del ensayo Cántabro, se contrasta la resistencia al desgaste tanto de la mezcla asfáltica convencional como de la mezcla modificada con polvo de hierro fundido.

Se muestran a continuación los resultados obtenidos para las distintas mezclas evaluadas. La mezcla patrón, sin incorporación de polvo de hierro, registra una pérdida promedio de 3.83%. Sin embargo, al incorporar el aditivo, con 17% de polvo de hierro fundido la pérdida es de 2.37%; con 20%, a 1.25%; y con 23%, el valor es de 1.11%.

Resistencia al desgaste

Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk)

- H_0 : Los valores de la resistencia al desgaste presentan una distribución normal.
- H_a : Los valores de la resistencia al desgaste no presentan una distribución normal.

Tabla 77

Resultados de la resistencia al desgaste (%)

Resumen de desgaste (%)			
Patrón	17%- Polvo de hierro fundido	20%- Polvo de hierro fundido	23%- Polvo de hierro fundido
(P-1) - 4.00	(P-4) - 2.74	(P-7) - 1.16	(P-10) - 1.03
(P-2) - 3.25	(P-5) - 2.06	(P-8) - 1.19	(P-11) - 1.10
(P-3) - 4.24	(P-6) - 2.31	(P-9) - 1.39	(P-12) - 1.19

Nota. Resumen de los valores de la resistencia al desgaste en probetas patrón y modificadas

Tabla 78*Prueba de Shapiro Wilk para la resistencia al desgaste*

Grupo	Estadístico W	Valor p
Patrón	0.9187	0.4479
17%	0.9772	0.7104
20%	0.8460	0.2297
23%	0.9948	0.8624

Nota. Todos los grupos presentan valores $p > 0.05$; por lo tanto, no se rechaza la H_0 . Los datos de la ITS-húmedo presentan una distribución normal.

Consideraciones estadísticas

Dado que el valor $p > 0.05$, los datos cumplen la suposición de normalidad y permiten aplicar ANOVA, asumiendo que la homogeneidad de varianzas también se verifica.

Prueba de homogeneidad de varianzas

Para validar el uso de ANOVA se aplican las pruebas de Bartlett y Levene.

- H_0 : Las varianzas de la resistencia al desgaste son iguales entre los grupos.
- H_a : Al menos un grupo presenta una varianza de la resistencia al desgaste diferente.

Tabla 79*Estadísticos de homogeneidad de varianzas*

Prueba	Valor p
Barlett	0.1203
Levene	0.4463

Nota. El valor $p > 0.05$ en ambas pruebas y no se rechaza la H_0 . Las varianzas son homogéneas entre los grupos.

Consideración estadística

Dado que en las pruebas el valor $p > 0.05$ (lo que indica homogeneidad de varianzas), se opta por aplicar ANOVA en lugar de la prueba de Kruskal-Wallis.

ANOVA

- H_0 : No se presentan diferencias significativas en las medias de la resistencia al desgaste entre los grupos evaluados.

- H_a : Se presenta al menos una diferencia significativa en las medias de la resistencia al desgaste entre los grupos evaluados.

Tabla 80

Estadísticos descriptivos de la resistencia al desgaste

Grupo	Media	sd	cv (%)	Valor mínimo	Valor máximo
Patrón	3.8300	0.5160	13.50	2.5500	5.1100
17%	2.3700	0.3440	14.50	1.5200	3.2200
20%	1.2500	0.1250	10.00	0.9360	1.5600
23%	1.1100	0.0802	7.25	0.9070	1.3100

Nota. La tabla evidencia que la media de la resistencia al desgaste disminuye con el aumento del polvo de hierro fundido, pasando de 3.8300% a 1.1100%. Esta disminución indica que la mezcla mejora su resistencia al desgaste a medida que se adiciona polvo de hierro fundido. Además, la dispersión de los datos es baja.

Tabla 81

Resultados del ANOVA para la resistencia al desgaste

Fuente	SC	gl	CM	Valor F	Valor p	F crítico
Grupo	14.3244	3	4.7748	46.9192	0.0000201	4.0662

Nota. Se observa que el valor $F > F$ crítico y el valor $p < 0.05$; por lo tanto, se rechaza la H_0 , asumiendo que existen diferencias significativas entre los grupos.

Comparaciones múltiples (Tukey)

- H_0 : No se identifican diferencias significativas en las medias de la resistencia al desgaste al comparar los grupos.
- H_a : Al menos una media de la resistencia al desgaste difiere de manera significativa respecto a los demás grupos.

Tabla 82

Prueba de Tukey aplicado a la resistencia al desgaste

Polvo de hierro fundido	Media	Error estándar	Tukey		Confianza del 95%	
			Valor p	Valor mínimo	Valor máximo	
Patrón	17%	-1.4600	0.3617	0.00226	-2.2941	-0.6258
	20%	-2.5833	0.3617	0.00042	-3.4174	-1.7492
	23%	-2.7233	0.3617	0.00029	-3.5574	-1.8892
17%	Patrón	-1.4600	0.3617	0.00226	-2.2941	-0.6258
	20%	-1.1233	0.3617	0.01101	-1.9574	0.2892
	23%	-1.2633	0.3617	0.00556	-2.0974	-0.4292
20%	Patrón	-2.5833	0.3617	0.00042	-3.4174	-1.7492
	17%	-0.4100	0.6195	0.7098	-1.6243	0.8043
	23%	-0.1400	0.6195	0.94735	-0.9741	0.6941
23%	Patrón	-2.7233	0.3617	0.00029	-3.5574	-1.8892
	17%	-1.2633	0.3617	0.00556	-2.0974	-0.4292
	20%	-0.1400	0.6195	0.94735	-0.9741	0.6941

Nota. La tabla evidencia que la prueba no encuentra diferencias significativas en la resistencia al desgaste únicamente al comparar las mezclas con 20% y 23% de polvo de hierro fundido; por lo tanto, se rechaza la H_0 y se asume que existen diferencias significativas entre las medias de las distintas dosificaciones.

Interpretación general.

Los resultados indican que los datos del desgaste cumplen con los criterios de distribución normal y homogeneidad de varianzas, lo que justifica la aplicación del ANOVA. El análisis estadístico evidencia la existencia de diferencias significativas entre los grupos (valor $p < 0.05$), confirmando que la incorporación de polvo de hierro fundido influye de manera significativa en el desgaste. En particular, las dosificaciones del 17%, 20% y 23% presentan un incremento estadísticamente significativo del desgaste en comparación con la mezcla patrón, efecto que, de acuerdo con el análisis estadístico, se atribuye directamente a la incorporación del aditivo.

VI. Conclusiones

6.1. Conclusión del objetivo general

El análisis de la inclusión de polvo de hierro fundido en proporciones de 17%, 20% y 23% evidenció una influencia diferenciada en las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente. En función de los resultados obtenidos, se determinó que la incorporación del aditivo mejoró el comportamiento de los parámetros volumétricos y la resistencia al desgaste en todas las dosificaciones evaluadas, mientras que la resistencia al daño inducido por humedad presentó una mejora únicamente con la dosificación del 23%.

La resistencia a la deformación no mostró mejoras relevantes, aunque se mantuvo dentro de los límites aceptables, y la resistencia a la tracción indirecta presentó un comportamiento diferenciado, con incrementos en condición húmeda y disminuciones en condición seca. En conjunto, los resultados permitieron confirmar que la incorporación de polvo de hierro fundido resultó técnicamente viable, evidenciándose que el incremento de su contenido no garantiza mejoras simultáneas en todas las propiedades evaluadas, pero sí un comportamiento adecuado dentro de los rangos establecidos.

6.2. Conclusiones de los objetivos específicos

6.2.1. Conclusión del objetivo específico 1

Al calcular los parámetros volumétricos, se evidenció que la adición de polvo de hierro fundido generó mejoras en el comportamiento volumétrico de la mezcla asfáltica. La incorporación del aditivo en proporciones de 17%, 20% y 23% permitió una adecuada compactación y estabilidad interna, evidenciándose incrementos del PU de hasta 10.26%, así como reducciones de los VA de hasta 47.70%, manteniéndose dentro del rango normativo de 3–5%. Asimismo, el VMA, aunque disminuyó respecto al patrón, se mantuvo por encima del valor mínimo exigido de 14% en todas las dosificaciones evaluadas, lo que confirmó la influencia favorable del material en este tipo de parámetros.

6.2.2. Conclusión del objetivo específico 2

Al determinar la resistencia a la deformación, se evidenció que la adición de polvo de hierro fundido no produjo mejoras relevantes en la estabilidad ni en el flujo de la mezcla

asfáltica. No obstante, estos parámetros se mantuvieron dentro de los límites aceptables para todas las dosificaciones evaluadas, lo que indicó que la incorporación del aditivo no afectó negativamente la resistencia a la deformación permanente.

6.2.3. Conclusión del objetivo específico 3

Al cuantificar la resistencia a la tracción indirecta, se determinó que la adición de polvo de hierro fundido provocó un comportamiento diferenciado de la mezcla según su condición de evaluación. Las dosificaciones del 20% y 23% influyeron en la resistencia a la tracción indirecta, evidenciándose un aumento del desempeño en condición húmeda (incrementos de 3.13% y 4.13% para las dosificaciones del 20% y 23%, respectivamente) y una disminución en condición seca (reducciones aproximadas de 3.15% y 3.24%), lo que mostró que el incremento del contenido del aditivo mejoró la respuesta de la mezcla frente a la presencia de agua, aunque introdujo una limitación en la resistencia en condición seca.

6.2.4. Conclusión del objetivo específico 4

Al evaluar la resistencia al daño inducido por humedad, se determinó que la adición de polvo de hierro fundido mejoró el comportamiento de la mezcla con la dosificación del 23%, evidenciándose una mayor capacidad de la mezcla para conservar su resistencia cuando fue sometida a la acción del agua, al incrementarse el TSR desde 81.11% en la mezcla patrón hasta 87.28% (+7.61%).

6.2.5. Conclusión del objetivo específico 5

Al examinar la influencia de la incorporación de polvo de hierro fundido, se evidenció que la adición del material mejoró la resistencia al desgaste de la mezcla asfáltica en todas las dosificaciones evaluadas, manifestándose en una reducción progresiva del material desprendido durante el ensayo, que disminuyó desde 3.83% en la mezcla patrón hasta valores comprendidos entre 2.37% y 1.11% con la incorporación del aditivo, lo que representó reducciones aproximadas del 38% al 71%, incluso al mayor porcentaje de adición analizado.

VII. Recomendaciones

Estas recomendaciones se basan en los resultados del estudio y se enfocan en la aplicación del polvo de hierro en obras reales.

En función del comportamiento observado en los ensayos realizados, se recomienda la incorporación de polvo de hierro fundido en la mezcla asfáltica en caliente, considerando que su adición influyó de manera diferenciada en cada una de las propiedades físicas y mecánicas evaluadas. La selección de la dosificación deberá realizarse en función del parámetro de desempeño que se desee priorizar, dado que no todas las propiedades respondieron de igual forma al incremento del contenido del aditivo. Para su implementación en obra, se recomienda realizar pruebas piloto en planta de asfalto, así como definir un plan riguroso de control de calidad, que permita asegurar una dosificación uniforme y una correcta homogeneización del material a escala industrial.

a. Respecto al primer objetivo específico, se recomienda la incorporación de polvo de hierro fundido en proporciones de 17%, 20% y 23%, dado que estas dosificaciones favorecieron una adecuada compactación y estabilidad interna, manteniéndose los valores dentro de los rangos establecidos en laboratorio. En obra, se recomienda controlar la densidad en campo, ajustar los procedimientos de compactación y verificar el contenido de vacíos, a fin de reproducir el comportamiento volumétrico observado en los ensayos de laboratorio.

b. Respecto al segundo objetivo específico, se recomienda la incorporación de polvo de hierro fundido hasta una dosificación del 23%, considerando que la estabilidad y el flujo no se vieron afectados negativamente por la adición del material y se mantuvieron dentro de los límites aceptables. Para su aplicación en obra, es fundamental controlar la temperatura de mezclado, transporte y compactación, así como los tiempos de mezclado en planta, con el fin de conservar la trabajabilidad de la mezcla y evitar deformaciones prematuras en servicio.

c. Respecto al tercer objetivo específico, se recomienda evaluar de manera conjunta el comportamiento de la mezcla en condición seca y húmeda al seleccionar la dosificación del polvo de hierro fundido, considerando que las dosificaciones del 20% y 23% mejoraron el

desempeño en condición húmeda, aunque presentaron una disminución de la resistencia en condición seca. En obra, se recomienda asegurar un adecuado sistema de drenaje, una correcta adherencia entre agregado y ligante asfáltico, así como realizar controles durante la construcción para minimizar posibles pérdidas de resistencia en condición seca.

d. Respecto al cuarto objetivo específico, se recomienda priorizar la dosificación del 23% de polvo de hierro fundido, dado que esta proporción mostró una mayor capacidad de la mezcla para conservar su resistencia frente a la acción del agua. Para su aplicación en obra, se recomienda verificar la adecuada compactación, evitar la presencia de humedad durante la colocación y asegurar una correcta impermeabilización de la estructura del pavimento, con el fin de reproducir el desempeño observado en laboratorio.

e. Respecto al quinto objetivo específico, se recomienda la incorporación de polvo de hierro fundido en proporciones de 17%, 20% y 23%, considerando que en todas las dosificaciones evaluadas se evidenció una reducción del material desprendido durante el ensayo. En obra, se sugiere reforzar los controles granulométricos, asegurar una distribución homogénea del polvo de hierro fundido y realizar tramos de prueba para evaluar el comportamiento frente al tránsito y al desgaste superficial en condiciones reales de servicio.

VIII. Referencias

- Agencia Europea de Medio Ambiente. (19 de julio de 2022). *Lograr un transporte más sostenible en Europa*. <https://www.eea.europa.eu/es/articulos/lograr-un-transporte-mas-sostenible>
- Aguilar Esquivel, K., y Chauca Quispe, C. (2022). *Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente PEN 85/100, con respecto a la mezcla asfáltica en caliente PEN 85/100 adicionando grafito* [Tesis de pregrado, Universidad Andina del Cusco]. Repositorio de la Universidad Andina del Cusco. <https://repositorio.uandina.edu.pe/handle/20.500.12557/5051>
- Aguirre Garrido, J. A. (2022). *Influencia del uso de escoria siderúrgica en la mezcla asfáltica en caliente para pavimentos flexibles, Nuevo Chimbote, 2022* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Digital Institucional Universidad César Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/114139>
- Aliaga, M. (26 de setiembre de 2020). *Peso específico: concepto, ejemplos y relación con densidad*. Scribd. <https://es.scribd.com/document/477593207/Peso-Especifico-Concepto-ejemplos-y-relacion-con-densidad>
- Antala. (22 de marzo de 2021). *¿Qué es el desgaste de maquinaria y cómo prevenirlo? Antala industria*. <https://www.antala.es/que-es-desgaste-maquinaria/>
- Alquera. (2023). *Polvos de hierro* (v. 1). <https://www.alquera.com/wp-content/uploads/2018/12/ALQ0008-Polvos-de-Hierro-Espanol-v.1-09.10.2023-re.2020.878.pdf>
- Álvarez García, K. M., y Arciniegas Ríos, J. P. (2017). *Diseño de mezcla de concreto hidráulico con residuos industriales (polvo de hierro) como aditivo para aligerar el peso de elementos estructurales y mejorar su resistencia a la compresión* [Tesis de pregrado, Universidad Libre Seccional Pereira]. <https://core.ac.uk/download/pdf/233044476.pdf>
- Ávila Parra, L., y Velasco Díaz, C. (2021). *Evaluación experimental de diferentes aditivos aplicados en una mezcla MDC - 19* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional de la Universidad Católica de Colombia. <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/e940db76-e5cb-446e-8571-05365c08ba3e/content>
- Asphalt Institute. (23 de setiembre de 2011). *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. Scribd. <https://es.scribd.com/document/66112307/MS-22-Principios-de-Construccion-de-Pavimentos-de-Mezcla-Asfalticas>
- Baena Paz, G. (2017). *Metodología de la investigación* (3.ª ed.). Grupo Editorial Patria. http://www.biblioteca.cij.gob.mx/Archivos/Materiales_de_consulta/Drogas_de_Abuso/

Articulos/metodologia%20de%20la%20investigacion.pdf

- Cáceres Torrejón, K. L. (2024). *Evaluación de las propiedades mecánicas y físicas de las mezclas asfálticas usando conchas de abanico triturado como filler* [Tesis de pregrado, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo]. Repositorio de Tesis USAT. <https://tesis.usat.edu.pe/handle/20.500.12423/8017>
- Calva Herrera, L. O. (2020). *Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente incorporando escoria de acero* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio Institucional Universidad Señor de Sipán. <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/8688>
- Castillo Alcázar, A. (2021). *Comportamiento físico-mecánico de base estabilizada con emulsión asfáltica de las canteras Río Tambo y Talamolle de la provincia General Sánchez Cerro - Moquegua* [Tesis de pregrado, Universidad Señor de Sipán]. Repositorio de la Universidad Católica Santa María. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/79f253a0-6967-4fb0-8fc8-6bdd7b5bde1c>
- Castro Taks, A. (2018). *Elaboración de fichas*. <https://investigar1.wordpress.com/wp-content/uploads/2010/05/elaboracion-de-fichas.pdf>
- Chávez, R. (2020). *Deformación y resistencia de los materiales*. Scribd. <https://es.scribd.com/document/471416316/Deformacion-y-resistencia-de-los-materiales>
- Condori, J. (2024, 21 de noviembre). *Agregado grueso: características, granulometría*. Libre Ingeniería Civil. <https://www.libreingenieriacivil.com/2024/11/agregado-grueso-caracteristicas.html>
- Córdova Carbajal, J. J., y Sánchez Llontop, D. O. (2021). *Evaluación de la resistencia mecánica a la deformación permanente de una mezcla asfáltica convencional con gradación MAC Tipo II y ASTM 3515, Tarapoto 2021* [Tesis de pregrado, Universidad Científica del Perú]. Repositorio Universidad Científica del Perú. <http://repositorio.ucp.edu.pe/items/95bc7178-35a8-4adf-b0e6-a0764bcc1fc4>
- Conarsac. (2 de mayo de 2023). *Agregados de construcción: descubre qué tipos hay*. <https://conarsac.com/blog/agregados-de-construccion/>
- Dagnino, J. (2014). *Análisis de varianza*. <https://revistachilenadeanestesia.cl/P11/revchilanestv43n04.07.pdf>
- Delgado Llatas, S. (2021). *Influencia en propiedades mecánicas en mezcla asfáltica incorporando escoria de acero - fibra de bagazo de caña de azúcar, Chiclayo 2021* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Digital Institucional Universidad César Vallejo. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCVV_20a068fad20c37f8b97649aff77407bd

- Ecoasfalt. (15 de marzo de 2023). *Consecuencias del asfalto en mal estado de conservación*.
<https://www.ecoasfalt.es/consecuencias-del-asfalto-en-mal-estado-de-conservacion/>
- García, A. C., Saval, J. M., Baeza, F., y Tenza, A. J. (2009). *Práctica de materiales de construcción*.
https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/10998/3/Pr%C3%A1ctica%20N%C2%BA%203%20_Granulometria%20I_.pdf
- Garnica, P., Delgado, H., y Sandoval, C. D. (2005). *Análisis comparativo de los métodos de Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas*.
<https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt271.pdf>
- Garnica Anguas, P., Delgado Alamilla, H., Gómez López, J. A., Alonso Romero, S., y Alonso Alarcón Orta, H. (2004). *Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas* (Publicación Técnica N.º 246). Instituto Mexicano del Transporte.
<https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt246.pdf>
- Garrote, E. (2006). *El ensayo de tracción indirecta*.
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3324/55872-8.pdf>
- Idrogo Montalvo, C., y Hurtado Pérez, L. A. (2023). *Caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de mezcla asfáltica en caliente usando fibra de corchorus capsularis y caucho granulado* [Tesis de pregrado, Universidad Señor de Sipán]. Repositorio Institucional Universidad Señor de Sipán.
<https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/11880>
- Instituto Asteco. (19 de septiembre de 2018,). *Qué es el desgaste por abrasión y cómo combatirlo*. Instituto Asteco. <https://institutoasteco.com/asteco/desgaste-por-abrasion/>
- Hernández González, O. (2021). *Aproximación a los distintos tipos de muestreo no probabilístico que existen*. *Revista Cubana de Medicina General Integral*, 37(3).
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-21252021000300002
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.).
https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf
- Laboratorio de Ingeniería Civil. (2013). *Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta (INV E-725-13)*.
<https://www.labicivil.com/Media/pdfs/INV%20E-725-13%20EVALUACIÓN%20DE%20LA%20SUSCEPTIBILIDAD%20AL%20AGUA%20DE%20LAS%20MEZCLAS%20DE%20CONCRETO%20ASFÁLTICO%20UTILIZANDO%20LA%20PRUEBA%20DE%20TRACCIÓN%20INDIRECTA.pdf>
- López, P. (2004). *Población, muestra y muestreo*. *Punto Cero*, 9(8), 69-74.
http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-02762004000100012&lng=es&tlng=es.

- Mariano Bravo, G. M. (2021). *Mezcla asfáltica SMA, fibra, ceniza del bagazo de caña de azúcar y su desempeño mecánico* [Tesis de posgrado, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio Institucional de la Universidad Ricardo Palma. <https://repositorio.urp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/25c8459e-3964-48b3-9eb5-2c0fe4c5a736/content>
- Martínez, C. (2012). *Estadística y muestreo* (13.^a ed.). <http://ies-booklick.s3.amazonaws.com/1626728222781-Estadistica-MuestreoCiro1-198.pdf>
- Maylle, A., y Ávila, P. (2023). Elaboración de un diseño de mezcla para la estabilización de un suelo con emulsión asfáltica tipo CSS-1h y pavimento asfáltico reciclado (RAP) basado en el procedimiento de Marshall modificado. *Infraestructura Vial*, 25(44), 1-17. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S2215-37052023000100001&script=sci_abstract&lng=es
- Medina, C., Solorio, S., y Sánchez, G. (2011). *Investigación clínica: Diseños epidemiológicos*. <https://www.medigraphic.com/pdfs/imss/im-2011/im1111k.pdf>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2018). *Glosario de términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4980603/Glosario%20de%20T%C3%A9rminos%20de%20Uso%20Frecuente%20en%20los%20Proyectos%20de%20Infraestructura%20Vial.pdf?v=1692114711>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú. (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 del Perú. (2016). *Manual de Carreteras – Manual de ensayo de materiales* [Archivo PDF]. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2010). *Norma Técnica CE.010 Pavimentos Urbanos*. https://cdn-web.construccion.org/normas/files/tecnicas/Pavimentos_Urbanos.pdf
- Morcote Catolico, C. A. (2019). *Evaluación del desempeño mecánico de mezclas asfálticas con escorias de acero* [Tesis de posgrado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Universidad Nacional. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76481>
- Novoa Bedoya, A. C. (2020). *Estudio del uso de escoria como agregado grueso en mezclas asfálticas densas para pavimentos* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional de la Universidad Católica de Colombia. <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/0b473d64-2ba3-4736->

aa5c-de6f065bf771/content

- Olgúin de la Mora, D. F. (2016). *Proceso de producción de agregados pétreos y su control de calidad* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional de la UNAM. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/11125/1/Proceso%20de%20Producci%C3%B3n%20de%20Agregados%20P%C3%A9treos%20y%20su%20Control%20de%20Calidad.pdf>
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. (2023). *Guía sobre la adecuada gestión de residuos con enfoque de economía circular para la industria de fundición: Guía de residuos sólidos y material de descarte*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/6236473/5490421-guia-sobre-la-adecuada-gestion-de-residuos-con-enfoque-de-economia-circular-para-la-industria-de-fundicion.pdf?v=1713971275>
- Padilla, A. (2004). *Mezclas asfálticas*. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-14.pdf?sequence=14>
- Polania Rodríguez, J. L. (2021). *Aprovechamiento de residuos del sector industrial en la producción de mezclas asfálticas para la infraestructura vial* [Tesis de pregrado, Fundación Universidad de América]. Repositorio Fundación Universidad de América. <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8404>
- Quispe Torres, G. (2022). *Desempeño óptimo de una mezcla asfáltica en caliente modificada con Polímero Styrene Butadiene Styrene* [Tesis de posgrado, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio Institucional de la Universidad Ricardo Palma. <https://repositorio.urp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/552122a1-a6a7-4f89-90a7-762282b930e9/content>
- Radio Programas del Perú. (16 de julio de 2024). *Carreteras olvidadas: El precio de la negligencia en la infraestructura vial peruana*. RPP Noticias. <https://rpp.pe/economia/economia/cual-es-el-estado-de-las-pistas-y-carreteras-en-el-peru-informe-noticia-1557854>
- Ramírez, K. J. (01 de marzo de 2025). *Laboratorio de concreto N°3: Pesos unitarios de los agregados y el contenido de humedad*. Slideshare. <https://es.slideshare.net/slideshow/laboratorio-de-concreto-n3los-pesos-unitarios-de-los-agregados-y-el-contenido-de-humedad/66379484>
- Reliance Foundry. (2023). *Introducción al hierro fundido: historia, tipos, propiedades y usos*. https://www.reliance-foundry.com/blog/hierro-fundido-es?srsId=AfmBOorhirEy0-2-zuSf63eJYRzYoGPsbqjrqypa3NnE_EiesBhQ69
- Rengifo Gonzales, J. A., y Vargas Villaca, M. A. (2017). *Análisis comparativo entre pavimento*

- flexible convencional y pavimento flexible reciclado en las cuadras 1-29 de la avenida La Paz San Miguel - Lima.* [Tesis de pregrado, Universidad de San Martín de Porres]. Repositorio USMP. <https://repositorio.usmp.edu.pe/handle/20.500.12727/3520>
- Revista Costos. (20 de noviembre de 2023). *Aditivos para pavimentos: Productos y soluciones de la construcción.* <https://revista-ps.costosperu.com/aditivos-para-pavimentos/>
- Robles, J. (2024). *Diseño de mezcla asfáltica: Parámetros volumétricos.* Studocu. <https://www.studocu.com/latam/document/universidad-nacional-de-ingenieria-nicaragua/materiales-de-construccion/disenio-de-mezcla-asfaltica-parametros-volumetricos-250602/130564103>
- Rodriguez Padilla, A. (2004). *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista* [Tesis de pregrado, Universitat Politècnica de Catalunya Barcelona]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3334>
- Román Baca, C. A., y García Surco, A. D. (2023). *Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de una mezcla asfáltica en caliente PEN 85/100 modificada con escorias de hierro en reemplazo de agregado fino de la cantera Morro Blanco–Cusco-2023* [Tesis de pregrado, Universidad Andina del Cusco]. Repositorio Digital Universidad Andina del Cusco. <https://repositorio.uandina.edu.pe/item/27e83317-d412-464c-a564-9b5655540a7e>
- Romero, J. (25 de julio de 2019). *Lottman AASHTO T 283.* Scribd. <https://es.scribd.com/document/419742013/Lottman-Aashto-t-283-2003>
- Santa Cruz Veliz, P. L. (2021). *Análisis de nuevas mezclas asfálticas en caliente utilizando material asfáltico reciclado de la Av. Andrés Avelino Cáceres - Provincia de Concepción 2020* [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio Institucional Continental. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/9328>
- Silvestre Velasquez, D. F. (2017). *Comparación técnica y económica entre las mezclas asfálticas tradicionales y reforzadas con plástico reciclado en la ciudad de Lima-2017* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio de la Universidad César Vallejo. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/1506/Silvestre_VDF.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sociedad de Comercio Exterior del Perú. (28 de febrero de 2020). *Infraestructura vial: gobiernos subnacionales estancados. COMEXPERÚ.* <https://www.comexperu.org.pe/articulo/infraestructura-vial-gobiernos-subnacionales-estancados>
- Universidad tecnológica de los Andes. (2019). Reglamento de investigación (Versión 6.0, Art.

10). <https://transparencia.utea.edu.pe/download/EJE-GOBIERNO-Y-GESTION/DOCUMENTOS-DE-GESTION/REGLAMENTOS/AB957-REGLAMENTO-DE-INVESTIGACION-2019-VERSION-6.0.pdf>

Venegas Tello, D., y Zúñiga Rodríguez, C. A. (2023). *Caracterización mecánica de una mezcla asfáltica usando la cal hidratada y el polvo de ladrillo como relleno mineral* [Tesis de pregrado, Universidad Señor de Sipán] Repositorio Institucional Universidad Señor de Sipán. <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/12087>

Vizcarra Condori, Y. J. (2016). *Diseño de mezcla asfáltica con emulsión* [Tesis de pregrado, Universidad José Carlos Mariátegui, Moquegua – Perú] Repositorio Universidad José Carlos Mariátegui. <https://repositorio.ujcm.edu.pe/handle/20.500.12819/458>

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes