



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**CONCRETO HIDRÁULICO RECICLADO COMO SUSTITUTO
PARCIAL DEL AGREGADO GRUESO NATURAL PARA LA
ELABORACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE
PARA VÍAS DE NIVEL DE TRÁNSITO MEDIO**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. WILSON SAUL MAQUERA MAQUERA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO – PERÚ

2024



Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

CONCRETO HIDRÁULICO RECICLADO COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL AGREGADO GRUESO NATURAL PARA LA ELABORACIÓN

AUTOR

WILSON SAUL MAQUERA MAQUERA

RECuento de palabras

29578 Words

RECuento de caracteres

153577 Characters

RECuento de páginas

149 Pages

Tamaño del archivo

3.6MB

Fecha de entrega

Aug 28, 2024 12:27 PM GMT-5

Fecha del informe

Aug 28, 2024 12:29 PM GMT-5

● 12% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 11% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 8% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)


Frank Lacue Córdova
DOCENTE UNIVERSITARIO
COD. UNA N° 2006511


vob
29/08/2024
Ing. Jaime Medina Leiva
DOCENTE UNIVERSITARIO
COD. UNA N° 910545
SUS DIRECTOR 1-201C

Resumen



DEDICATORIA

Quiero agradecer a Dios por haberme permitido alcanzar este punto y por haberme brindado la salud necesaria para alcanzar mis metas. También le agradezco por fortalecer mi corazón y por la satisfacción de haber tenido éxito a lo largo de esta etapa de aprendizaje.

A mis padres Enrique, Elena y mi familia, quienes fueron una fuente de amor y apoyo incondicional, y a todos aquellos que creyeron en mí a lo largo de este viaje académico.

A mi compañera de vida, Beatriz Canahuiri, quien fue mi apoyo incondicional y la razón de mi existencia e inspiración

A mis maestros, que me supieron orientar de manera idónea y acertada para alcanzar nuevas alturas en el mundo del conocimiento.

Wilson Saul Maquera Maquera



AGRADECIMIENTOS

Me gustaría manifestar mi más profundo agradecimiento a la Universidad Nacional del Altiplano, por las oportunidades, recursos y una educación de calidad que ha enriquecido mi vida académica.

Asimismo, agradezco a los catedráticos de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, pues valoro profundamente las lecciones que me han inculcado, su enorme apoyo y el ejemplo de entrega y dedicación que me han brindado.

Wilson Saul Maquera Maquera



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN	16
ABSTRACT.....	17
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	20
1.2.1. Problema general.....	20
1.2.2. Problemas específicos	20
1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	21
1.3.1. Hipótesis general.....	21
1.3.2. Hipótesis específicas	21
1.4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	22
1.4.1. Justificación práctica	22
1.4.2. Justificación ambiental.....	23
1.4.3. Justificación económica	23
1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	24
1.5.1. Objetivo general.....	24



1.5.2. Objetivos específicos.....	24
-----------------------------------	----

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	25
2.1.1. Antecedentes internacionales	25
2.1.2. Antecedentes nacionales	28
2.1.3. Antecedentes locales	31
2.2. MARCO TEÓRICO	32
2.2.1. Concreto hidráulico reciclado	32
2.2.2. Vías de tránsito medio.....	36
2.2.3. Mezcla asfáltica en caliente.....	37
2.3. MARCO CONCEPTUAL	48

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO.....	51
3.2. TIPO DE ESTUDIO	53
3.2.1. Tipo	53
3.2.2. Nivel.....	53
3.2.3. Enfoque	53
3.2.4. Diseño.....	54
3.3. VARIABLES	54
3.3.1. Definición conceptual de variables	54
3.3.2. Operacionalización de variables.....	55
3.4. POBLACION Y MUESTRA DEL ESTUDIO	55
3.4.1. Población.....	55



3.4.2. Muestra.....	55
3.5. DISEÑO ESTADÍSTICO	57
3.6. PROCEDIMIENTO.....	57
CAPÍTULO IV	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1. RESULTADOS PRELIMINARES	59
4.2. DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS	76
4.2.1. Caracterización de las mezclas asfálticas en caliente.....	77
4.2.2. Características de las mezclas asfálticas en caliente óptimas	102
4.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	111
4.3.1. Prueba de normalidad.....	111
4.3.2. Hipótesis específica “a”	121
4.3.3. Hipótesis específica “b”	122
4.3.4. Hipótesis específica “c”	125
4.3.5. Hipótesis específica “d”	126
4.3.6. Hipótesis específica “e”	127
4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	129
4.4.1. Relación de estabilidad y flujo de las MAC.....	130
4.4.2. Vacíos de las MAC	132
4.4.3. Densidad de las MAC	134
4.4.4. Resistencia retenida de las MAC	135
4.4.5. Resistencia conservada de las MAC	136
V. CONCLUSIONES.....	138
VI. RECOMENDACIONES	141
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	142



ANEXOS..... 147

Área: Transportes y gestión vial

Tema: Mezcla asfáltica con material reciclado.

Línea de investigación: Tecnología y diseño de pavimentos.

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 11 de setiembre de 2024



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1	Requisitos de agregado grueso para complementar agregado reciclado..... 39
Tabla 2	Requisitos de agregado fino para complementar agregado fino..... 39
Tabla 3	Granulometría para mezcla de agregados. 40
Tabla 4	Características de relación estabilidad/flujo. 43
Tabla 5	Vacíos en el agregado mineral para MAC..... 44
Tabla 6	Climas y temperaturas del distrito de Ilave año 2022..... 52
Tabla 7	Operacionalización de variables del estudio..... 55
Tabla 8	Muestra para la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico.56
Tabla 9	Muestra para la determinación de la resistencia conservada y retenida. 56
Tabla 10	Técnicas e instrumentos para recolectar datos de los indicadores de la investigación. 58
Tabla 11	Granulometría de la piedra chancada ½”..... 59
Tabla 12	Composición de partículas de la piedra chancada ½”..... 60
Tabla 13	Granulometría de la piedra chancada 3/8”..... 61
Tabla 14	Composición de partículas de la piedra chancada 3/8”..... 62
Tabla 15	Granulometría de la piedra chancada de ¼”..... 63
Tabla 16	Composición de partículas de la piedra chancada ¼”..... 64
Tabla 17	Granulometría de la arena natural..... 64
Tabla 18	Composición de partículas de la arena natural..... 65
Tabla 19	Granulometría del concreto reciclado..... 66
Tabla 20	Composición del concreto reciclado..... 67
Tabla 21	Granulometría del cemento..... 67
Tabla 22	Composición de partículas del cemento..... 68
Tabla 23	Granulometría de la combinación de agregados naturales. 69
Tabla 24	Composición de partículas de la combinación de agregados..... 70
Tabla 25	Granulometría de la combinación de agregados con 10 % de concreto reciclado..... 70
Tabla 26	Composición de partículas de la combinación de agregados con 10 % de concreto reciclado. 71



Tabla 27	Granulometría de la combinación de agregados con 20 % de concreto reciclado.....	72
Tabla 28	Composición de partículas de la combinación de agregados con 20 % de concreto reciclado.	73
Tabla 29	Granulometría de la combinación de agregados con 30 % de concreto reciclado.....	73
Tabla 30	Composición de partículas de la combinación de agregados con 30 % de concreto reciclado.	74
Tabla 31	Resultados de la caracterización del agregado fino.	75
Tabla 32	Resultados de la caracterización del agregado grueso.	76
Tabla 33	Análisis de las características para la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico de la MAC patrón.....	78
Tabla 34	Resumen de resultados de características de la MAC patrón.	79
Tabla 35	Análisis de las características para determinar del contenido óptimo de cemento asfáltico de la MAC con 10 % de concreto reciclado.	85
Tabla 36	Resumen de resultados de características de la MAC con 10 % de concreto reciclado.....	86
Tabla 37	Análisis de las características para la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico de la MAC con 20 % de concreto reciclado.	91
Tabla 38	Resumen de resultados de características de la MAC con 20 % de concreto reciclado.....	92
Tabla 39	Análisis de las características para la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico de la MAC con 30 % de concreto reciclado.	97
Tabla 40	Resumen de resultados de características de la MAC con 30 % de concreto reciclado.....	98
Tabla 41	Características de las MAC elaboradas con los contenidos óptimos de cemento asfáltico.....	103
Tabla 42	Datos del ensayo Marshall considerados para la prueba de normalidad....	112
Tabla 43	Datos de resistencia retenida y conservada considerados para prueba de normalidad.	114
Tabla 44	Prueba de normalidad de los datos de estabilidad/flujo.....	115
Tabla 45	Prueba de normalidad de los datos de vacíos de aire.....	116
Tabla 46	Prueba de normalidad de los datos de vacíos llenos de cemento asfáltico.	117
Tabla 47	Prueba de normalidad de los datos de VMA.....	118



Tabla 48	Prueba de normalidad de los datos de densidad.....	119
Tabla 49	Prueba de normalidad de los datos de resistencia retenida.	120
Tabla 50	Prueba de normalidad de los datos de resistencia conservada.	120
Tabla 51	ANOVA de un factor de los datos de estabilidad/flujo en las MAC.	122
Tabla 52	Prueba Kruskal-Wallis de los porcentajes de vacíos de aire en la MAC... 123	
Tabla 53	Prueba Kruskal-Wallis de los porcentajes de vacíos en el agregado mineral en la MAC.....	124
Tabla 54	Prueba Kruskal-Wallis de los porcentajes de vacíos llenos con asfalto. ...	125
Tabla 55	Prueba Kruskal-Wallis de las densidades en las MAC.	126
Tabla 56	Prueba Kruskal-Wallis de la resistencia retenida a la compresión.	127
Tabla 57	ANOVA de un factor de la resistencia conservada a tracción indirecta....	128



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1	Botadero informal en el distrito de Ilave de la provincia de El Collao. 19
Figura 2	Obtención de concreto reciclado. 35
Figura 3	Contenido óptimo de cemento asfáltico de los diferentes tipos de MAC. . 47
Figura 4	Localización geográfica del sitio donde se realizó la investigación..... 51
Figura 5	Distribución anual Climas y temperaturas del distrito de Ilave. 53
Figura 6	Curva granulométrica de la piedra chancada ½”..... 60
Figura 7	Curva granulométrica de la piedra chancada 3/8”..... 62
Figura 8	Curva granulométrica de la piedra chancada ¼”..... 63
Figura 9	Curva granulométrica de la arena natural..... 65
Figura 10	Curva granulométrica del concreto reciclado. 66
Figura 11	Curva granulométrica del cemento..... 68
Figura 12	Curva granulométrica de la combinación de agregados naturales. 69
Figura 13	Curva granulométrica de la combinación de agregados con 10 % de concreto reciclado. 71
Figura 14	Granulométrica de la combinación de agregados con 20 % de concreto reciclado. 72
Figura 15	Curva granulométrica de la combinación de agregados con 30 % de concreto reciclado. 74
Figura 16	Comparación de densidades según contenido de cemento asfáltico de la MAC patrón..... 80
Figura 17	Comparación de estabilidad según contenido de cemento asfáltico de la MAC patrón..... 80
Figura 18	Comparación de vacíos de aire según contenido de cemento asfáltico de la MAC patrón..... 81
Figura 19	Comparación de vacíos llenos de asfalto según contenido de cemento asfáltico de la MAC patrón..... 81
Figura 20	Comparación de vacíos en el agregado mineral según contenido de cemento asfáltico de la MAC patrón..... 82
Figura 21	Comparación del flujo según contenido de cemento asfáltico de la MAC patrón..... 82



Figura 22	Comparación de la relación estabilidad/flujo según contenido de cemento asfáltico de la MAC patrón.....	83
Figura 23	Comparación de densidades según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 10 % de concreto reciclado.....	86
Figura 24	Comparación de estabilidad según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 10 % de concreto reciclado.....	87
Figura 25	Comparación de vacíos de aire según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 10 % de concreto reciclado.....	87
Figura 26	Comparación de vacíos llenos de asfalto según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 10 % de concreto reciclado.	88
Figura 27	Comparación de vacíos en el agregado mineral según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 10 % de concreto reciclado.	88
Figura 28	Comparación del flujo según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 10 % de concreto reciclado.....	89
Figura 29	Comparación de la relación estabilidad/flujo según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 10 % de concreto reciclado.	89
Figura 30	Comparación de densidades según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 20 % de concreto reciclado.....	92
Figura 31	Comparación de estabilidad según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 20 % de concreto reciclado.....	93
Figura 32	Comparación de vacíos de aire según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 20 % de concreto reciclado.....	93
Figura 33	Comparación de vacíos llenos de asfalto según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 20 % de concreto reciclado.	94
Figura 34	Comparación de vacíos en el agregado mineral según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 20 % de concreto reciclado.	94
Figura 35	Comparación del flujo según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 20 % de concreto reciclado.....	95
Figura 36	Comparación de la relación estabilidad/flujo según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 20 % de concreto reciclado.	95
Figura 37	Comparación de densidades según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 30 % de concreto reciclado.....	98
Figura 38	Comparación de estabilidad según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 30 % de concreto reciclado.....	99



Figura 39	Comparación de vacíos de aire según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 30 % de concreto reciclado.....	99
Figura 40	Comparación de vacíos llenos de asfalto según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 30 % de concreto reciclado.	100
Figura 41	Comparación de vacíos en el agregado mineral según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 30 % de concreto reciclado.	100
Figura 42	Comparación del flujo según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 30 % de concreto reciclado.....	101
Figura 43	Comparación de la relación estabilidad/flujo según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 30 % de concreto reciclado.	101
Figura 44	Contenido óptimo de cemento asfáltico de los diferentes tipos de MAC.	104
Figura 45	Estabilidad de los diferentes tipos de MAC.	105
Figura 46	Flujo de los diferentes tipos de MAC.....	106
Figura 47	Relación estabilidad/flujo de los diferentes tipos de MAC.	106
Figura 48	Vacíos de aire de los diferentes tipos de MAC.	107
Figura 49	Vacíos llenos de cemento asfáltico de los diferentes tipos de MAC.....	108
Figura 50	Vacíos en el agregado mineral de los diferentes tipos de MAC.....	108
Figura 51	Densidad de los diferentes tipos de MAC.	109
Figura 52	Resistencia a la compresión retenida de los diferentes tipos de MAC.....	110
Figura 53	Resistencia a la tracción indirecta conservada de los diferentes tipos de MAC.....	111



ACRÓNIMOS

ANOVA:	Análisis de varianza.
CBR:	Coefficiente de rodamiento de California (California Bearing Ratio).
Cc:	Coefficiente de curvatura.
CR:	Concreto reciclado.
Cu:	Coefficiente de uniformidad.
EG:	Especificaciones Técnicas Generales para Construcción.
Ha:	Hipótesis alterna.
Ho:	Hipótesis nula.
IC:	Índice de contracción.
IP:	Índice de plasticidad.
LC:	Límite de contracción.
LL:	Límite líquido.
LP:	Límite plástico.
MAC:	Mezcla asfáltica en caliente.
MTC:	Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
RCA:	Agregado reciclado proveniente del concreto hidráulico reciclado.
VFA:	Vacíos llenos con asfalto.
VMA:	Vacíos del agregado mineral.



RESUMEN

Con la presente investigación se busca aprovechar los residuos de concreto en el distrito de Ilave, provincia de “El Collao” en Puno, reduciendo la dependencia de recursos naturales, además considerando que no existe en el Perú conocimiento del impacto en las propiedades de las mezclas asfálticas del concreto reciclado como parte del agregado. El objetivo fue evaluar al concreto reciclado como sustituto del agregado para un nivel de tránsito medio. Considerando una metodología del tipo aplicada, nivel explicativo y diseño experimental, la población correspondió a MAC sin y con reemplazo del agregado natural por concreto reciclado, la muestra comprendió 108 briquetas de MAC con reemplazo del agregado natural por concreto reciclado para el tramo de las cuadras 4 y 5 de la Av. República en Ilave, de cuales, 60 para obtener el óptimo contenido de cemento asfáltico (15 por grupo con cemento asfáltico de 7, 6.5, 6, 5.5 y 5 %) y 48 para la resistencia retenida y conservada (12 por grupo). El óptimo contenido de cemento asfáltico para la MAC fue 5.8 %, para la MAC con 10, 20 y 30 % de concreto reciclado fue 5.71, 5.76 y 5.80, esto siguiendo los lineamientos para vías de tránsito intermedio de las especificaciones técnicas generales para la construcción del MTC. Los mejores resultados corresponden a la MAC con 10 % de concreto reciclado con estabilidad de 1130 kg, flujo de 2.90 mm, relación estabilidad/flujo de 3850 kg/cm, vacíos de aire 4 %, vacíos llenos de asfalto de 74.5 %, VMA de 15.5 %, densidad de 2.26 g/cm³, resistencia retenida y conservada de 90.98 y 84.13 %, similares a la MAC convencional según el análisis estadístico. Se concluye que es posible usar concreto reciclado en 10 % para MAC tipo 1 con cemento asfáltico PEN 85/100 en 5.71 %.

Palabras clave: Agregado grueso, Agregado reciclado, MAC, Tránsito medio.



ABSTRACT

This research seeks to take advantage of concrete waste in the district of Ilave, province of 'El Collao' in Puno, reducing dependence on natural resources, and also considering that there is no knowledge in Peru of the impact on the properties of asphalt mixes of recycled concrete as part of the aggregate. The objective was to evaluate recycled concrete as a substitute for aggregate for a medium traffic level. Considering a methodology of the applied type, explanatory level and experimental design, the population corresponded to MAC without and with replacement of natural aggregate by recycled concrete, the sample comprised 108 briquettes of MAC with replacement of natural aggregate by recycled concrete for the section of blocks 4 and 5 of República Avenue in Ilave, of which, 60 to obtain the optimum asphalt cement content (15 per group with asphalt cement of 7, 6.5, 6, 5.5 and 5 %) and 48 for the retained and preserved strength (12 per group). The optimum asphalt cement content for the MAC was 5.8 %, for the MAC with 10, 20 and 30 % recycled concrete it was 5.71, 5.76 and 5.80, following the guidelines for intermediate traffic roads of the general technical specifications for construction of the MTC. The best results correspond to the MAC with 10 % recycled concrete with stability of 1130 kg, flow of 2.90 mm, stability/flow ratio of 3850 kg/cm, air voids 4 %, asphalt filled voids of 74.5 %, VMA of 15.5 %, density of 2.26 g/cm³, retained and preserved strengths of 90.98 and 84.13 %, similar to the conventional MAC according to the statistical analysis. It is concluded that it is possible to use recycled concrete at 10 % for MAC type 1 with asphalt cement PEN 85/100 at 5.71 %.

Keywords: Coarse aggregate, Recycled hydraulic concrete, Marshall, Asphalt mix, Medium traffic.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El tratamiento y disposición adecuada de los residuos de concreto hidráulico es un tema importante en la construcción y mantenimiento de carreteras tanto a nivel internacional, nacional y local, tocando específicamente a la ciudad de Ilave capital del distrito homónimo de la provincia de El Collao perteneciente al departamento peruano de Puno. Los residuos de concreto hidráulico generados durante la demolición y reconstrucción de carreteras u otras infraestructuras de ingeniería que ya hayan cumplido su tiempo de vida útil pueden contener una serie de contaminantes peligrosos, como metales pesados, productos químicos y otros que pueden filtrarse en el suelo y las fuentes de agua, por lo que esta clase de residuos pueden propiciar la ocurrencia de impactos medio ambientales significativos y afectar la salud humana. Debido a ello, es importante buscar alternativas que solucionen este problema orientadas a eliminar los impactos ocurridos por la mala disposición de los residuos de concreto hidráulico reciclado (Bastidas-Martínez et al., 2021, p. 76).

Los residuos de concreto hidráulico generan diversos problemas sociales y ambientales, incluyendo la contaminación del aire y del agua que afecta la salud humana, y la disminución de la calidad de vida debido al ruido y polvo, así como la desvalorización de propiedades cercanas. Ambientalmente, estos residuos contribuyen a la contaminación del suelo y del agua a través de la lixiviación y sedimentación, degradan el paisaje debido a vertederos ilegales y alteran los patrones naturales de erosión como se puede visualizar en la Figura 1. Además, ocupan espacio en vertederos y aumentan la demanda de recursos naturales al no ser reciclados o reutilizados adecuadamente.

Figura 1

Botadero informal en el distrito de Ilave de la provincia de El Collao.



La reutilización de residuos generados por actividades de demolición o extraídos de vertederos de concreto hidráulico para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente es una práctica común en la construcción de carreteras a nivel mundial. Esta práctica contribuye a reducir el volumen de residuos que acaban en vertederos tanto formales como informales, disminuyendo así los costos y el impacto ambiental asociados a su disposición (Lazo y Manrique, 2021, p. 13).

Sin embargo, cuando los residuos de concreto hidráulico se utilizan sin los debidos controles en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente, pueden afectar las características de la mezcla, la durabilidad de la carretera e incluso la seguridad del usuario, dado que, los residuos de concreto hidráulico pueden contener partículas grandes que no se mezclan adecuadamente con el asfalto y pueden causar agrietamiento y debilidad en la superficie de la carretera (Espino et al., 2019, p. 2).

Considerando ello, tal como establecen autores como Covilla-Valera et al. (2022, p. 165) se convierte en un propósito importante el evaluar y gestionar adecuadamente los residuos de concreto hidráulico en los procesos de fabricación de mezclas asfálticas en



caliente a fin de garantizar la calidad y seguridad de las vías, evitando los aspectos negativos del desecho de residuos de construcción y demolición, llegando a minimizar su impacto ambiental y el desperdicio de energía.

En ese contexto, la investigación plantea la siguiente interrogante: ¿Cuál es la variación de la relación de estabilidad y flujo, vacíos, densidad, resistencia retenida y la resistencia conservada en las mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio con concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural? Se busca ofrecer una alternativa para el tratamiento y uso del concreto hidráulico en la producción de mezclas asfálticas en caliente de elevada calidad para pavimentar dos cuadras de la Avenida República en la localidad de Ilave. De esta manera, identificar la dosis óptima de reemplazo de agregado grueso natural por residuos de concreto hidráulico que produce los mejores resultados en la mezcla.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema general

¿Cuál es el resultado de usar concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio?

1.2.2. Problemas específicos

¿Cómo varía la relación de estabilidad y flujo en mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio con concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural?



¿Cuánta es la variación de los vacíos en mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio con concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural?

¿Cuál es la variación de densidad en mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio con concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural?

¿Cómo varía la resistencia retenida en mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio con concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural?

¿Cuál es la variación de la resistencia conservada en mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio con concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural?

1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Hipótesis general

El concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio modifica sus propiedades.

1.3.2. Hipótesis específicas

La relación de estabilidad y flujo en mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio incrementa con la adición de concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural.



Los porcentajes de vacíos se modifican las mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio con la adición de concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural.

La densidad en las mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio incrementa con la adición de concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural.

La resistencia retenida en mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio incrementa con la adición de concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural.

La resistencia conservada en mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio incrementa con la adición de concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural.

1.4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

1.4.1. Justificación práctica

Esta investigación busca mejorar el tratamiento de la composición de la mezcla asfáltica en caliente a fin de abordar los problemas de deterioro prematuro observados en las carreteras. Se propone utilizar una calidad de asfalto superior, diseñado de manera más efectiva que el asfalto convencional, para garantizar resistencia a las variaciones climáticas en la región de Puno y así mejorar la durabilidad y la calidad de las superficies de las carreteras.



1.4.2. Justificación ambiental

En primer lugar, disminuye la cantidad de desechos de construcción y demolición que se envían a los vertederos, el cual ayuda a minimizar el impacto ambiental asociado con la eliminación de estos materiales. Además, al utilizar concreto reciclado, se reduce la necesidad de extraer y procesar nuevos recursos naturales, como áridos y piedra triturada, lo que disminuye la huella ecológica de la construcción y la pavimentación. Además, la utilización de concreto reciclado puede disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con la fabricación y el transporte de materiales de construcción, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático.

1.4.3. Justificación económica

El uso de materiales reciclados tiende a ser más económico que la adquisición de materiales nuevos, lo que puede reducir los costos totales de construcción y pavimentación. Además, al emplear concreto reciclado, se evitan los costos asociados con la eliminación de residuos de construcción y demolición, como los cargos por vertedero y los costos de transporte. Esto puede generar ahorros significativos en el presupuesto general del proyecto. Además, el uso de concreto reciclado puede contribuir a la reducción de los costos de mantenimiento a largo plazo, ya que estos materiales suelen tener propiedades de durabilidad similares o incluso mejores que los materiales convencionales.



1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Objetivo general

Evaluar al concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio.

1.5.2. Objetivos específicos

Determinar la variación de la relación de estabilidad y flujo en mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio con concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural.

Establecer la variación de vacíos en mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio con concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural.

Hallar la variación de densidad en mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio con concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural.

Determinar la variación de la resistencia retenida en mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio con concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural.

Establecer la variación de la resistencia conservada en mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio con concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Antecedentes internacionales

Covilla-Valera et al. (2022) en su investigación que tiene como denominación “Evaluación del agregado de concreto reciclado como sustituto parcial de agregado pétreo natural en la producción de mezclas asfálticas”, indican como principal finalidad evaluar si es viable el uso del concreto hidráulico reciclado, obtenido de diversas fuentes viales, para poder ser parte de la mezcla asfáltica como sustituto del agregado natural.

El aspecto metodológico, consistió en la determinación de 4 tipos de agregados, uno natural y tres tipos de agregado reciclado, el primero provino de una vía con más de 20 años de antigüedad, mientras que los otros, provinieron de un tramo de ensayo en un estacionamiento de la Universidad del Norte. A los mencionados agregados se les determinó sus principales propiedades como la gravedad específica, la absorción, el desgaste, el micro-deval, 10 % finos y caras fracturadas; con lo cual, se desarrollaron briquetas con 15 %, 30 % y 45 %, que finalmente fueron sometidas al ensayo de módulo de rigidez.

Los resultados exponen que la absorción de los agregados naturales es 2 %, en el agregado fino y en el grueso; mientras que la cantidad de caras fracturadas, la cantidad obtenida en los agregados naturales fue de 77 – 86 %, por su parte en el agregado reciclado obtuvieron rangos de 95 % - 100 %. Con respecto al desgaste, en general, se puede denotar un menor porcentaje de esta propiedad



en el agregado natural. En referencia a la mezcla asfáltica, estimaron que, mientras se incrementa la cantidad de RCA (concreto hidráulico reciclado), el contenido óptimo de asfalto aumenta; concluyendo que, si es factible su uso en las mezclas asfálticas en caliente, siendo de preferencia considerar 15 % del material reciclado.

Bastidas et al. (2022) en su artículo de investigación denominada “Evaluación de una mezcla de concreto asfáltico con incorporación de agregados reciclados de concreto”, consideraron como principal finalidad establecer el impacto que puede poseer el uso del agregado reciclado (RCA) en las principales propiedades de mezclas de asfalto.

Para cumplir con el objetivo mencionado, la forma de consideración del agregado reciclado fue considerado en tres formas: la primera basada en la sustitución del agregado fino, la segunda en la sustitución del agregado grueso y la última como reemplazo total del fino y grueso. Con dicho procedimiento, se pudo elaborar briquetas de asfalto, las cuales fueron sometidas a cargas monotónicas mediante el ensayo Marshall, ensayo de tracción indirecta y finalmente desgaste de Cántabro.

Los resultados obtenidos en laboratorio dan a conocer que la estabilidad de la mezcla con agregado reciclado sustituido por el agregado fino no cumple los parámetros mínimos (9 kN). Similar condición, sucede con lo obtenido en el flujo, al considerar el material reciclado como agregado grueso, lo cual hace que solo este grupo pueda cumplir con la relación entre la estabilidad y el flujo. Con respecto al ensayo de tracción indirecta, los datos han demostrado que la mezcla con agregado natural alcanzó un valor de 747 kPa, mientras que las muestras que



fueron elaborados con sustitución del agregado grueso y el reemplazo total del agregado fino y grueso obtuvieron valores superiores (820 kPa y 875 kPa), determinando un comportamiento similar en el ensayo de desgaste por Cántabro. Finalmente, como principal conclusión establecieron que el empleo de material reciclado como parte del agregado grueso es factible en mezclas asfálticas; lo cual no es factible si se considera la sustitución total del agregado fino.

Espino et al. (2019) en su investigación denominada “Elaboración de mezclas asfálticas en caliente con adición de residuos de construcción y demolición (concreto hidráulico) en un 10 % y 20 % como sustitución de agregado pétreo natural”, consideró como principal objetivo establecer la dosificación adecuada en la que el uso del concreto reciclado puede ser aplicada a las mezclas asfálticas.

Para la determinación de tales objetivos se ha considerado como principal metodología sustituir el agregado en proporciones de 10 % y 20 % respecto al agregado grueso; con ello se crearon briquetas para posteriormente someterlas a las consideraciones del ensayo Marshall, sin embargo, previamente se debe de tener en cuenta que fue necesario la caracterización de los materiales que componen dicha mezcla.

Los resultados que obtuvieron muestran un comportamiento similar del flujo entre los grupos cuando estos poseen contenidos de cemento asfáltico comprendidos entre 6 % y 7 %. Con respecto a la estabilidad, los datos demuestran gran variabilidad entre los grupos, sin embargo, se puede destacar que se encontraron valores similares para los componentes del cemento asfáltico de 6.5 %. Concluyen mencionando que, el uso de las dosificaciones de 10 % y 20 % en



la mezcla de asfalto representa un menor peso específico del material, además, mantiene el comportamiento del flujo, y la estabilidad mejora conforme se adiciona el concreto como agregado, pues este presenta mayor rigidez que el agregado natural.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Lazo y Manrique (2021) en su estudio denominada “Desempeño de la mezcla asfáltica utilizando residuos de concreto como reemplazo parcial del agregado grueso”, consideró como principal finalidad de poder definir un diseño mediante el cual se puede utilizar el agregado reciclado como parte de las mezclas de asfalto.

Como parte de la metodología se consideró una investigación experimental, basada principalmente en la caracterización del material que posteriormente fue utilizado para la elaboración de briquetas o testigos de asfalto, para que mediante la aplicación del método Marshall, pueda determinarse las principales propiedades de la mezcla de asfalto, como son el porcentaje de vacío, la estabilidad, el flujo y la relación entre estos dos últimos parámetros.

Los resultados obtenidos han demostrado que el material reciclado presenta una adecuada granulometría, pues cumple con los parámetros recomendado por la norma CE 0.10, además obtuvo un valor del coeficiente de uniformidad de 47.22 y de curvatura de 2.15. En relación con el desgaste, demostraron que fue menor de lo establecido por la norma, obteniendo en promedio 30.02 %, por lo que se puede mencionar que este es factible para su uso como parte de mezclas asfálticas. Sobre el comportamiento en las mezclas asfálticas, los resultados denotaron que el uso parcial del agregado reciclado es



factible en proporciones que no superen los 35 %; concluyendo que dichas proporciones son recomendables en pavimentos urbanos, pues no compromete la durabilidad ni resistencia.

Malpartida y Soto (2021) en su investigación denominada como “Utilización de mezclas asfálticas en caliente recuperando el pavimento de concreto hidráulico en Avenida Héroes, distrito de Chupaca, Huancayo” tuvo la principal finalidad establecer la factibilidad del uso del concreto antiguo para la elaboración de una aleación que consiste en la mezcla del concreto y cemento asfáltico.

Como parte de la metodología de investigación, consideraron la caracterización de la resistencia del concreto, por lo que obtuvieron muestras mediante el ensayo de diamantina. Con dichos valores, procedieron a elaborar probetas de mezclas asfálticas que fueron sometidos al ensayo Marshall, para con ello determinar las propiedades como la estabilidad y el flujo.

Como principales resultados, ha demostrado la factibilidad del uso de los materiales reciclados de la av. Los Héroes en el distrito de Chupaca, en el que la mezcla con concreto reciclado obtuvo como contenido eficaz de asfalto un valor de 6.1 %, con un valor de vacíos de 4.6 %, un flujo de 3.3 mm, una estabilidad de 967 kg y un índice de rigidez de 2.932; valores que cumplen de manera satisfactoria con la normativa del MTC. Finalmente, concluye, que el uso de la materia reciclada como parte de las mezclas de asfalto es adecuada, pues cumple con las especificaciones de las normas vigentes.



Gomez y Gomez (2020) en su investigación denominada “Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas de una mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, en referencia a una mezcla patrón”, tuvo como principal objetivo establecer cuál es el comportamiento una mezcla que fue elaborada por una emulsión asfáltica de rotura lenta cuando esta se combina con los agregados reciclados.

Para tal fin consideraron una metodología experimental basada principalmente en la determinación de los principales parámetros de control establecidos por la normativa vigente, tales como la estabilidad, el flujo, la resistencia a inmersión - compresión, el módulo de rigidez y la tracción indirecta en mezclas con sustitución parcial del agregado grueso en 0 %, 25 %, 33.3 % y 50 %. Es importante mencionar que antes de la ejecución de los ensayos mencionados, también consideraron estudios de los agregados, para de esta manera poder cualificarlos y establecer si cumplen con los requisitos de las normas peruanas.

Como principales resultados han demostrado que la mezcla patrón tiene superior estabilidad en cerca del 18.18 % de las mezclas obtenidas con el reciclaje, mientras que los valores del flujo para mezclas recicladas son superiores en 24.29 % respecto la mezcla patrón. Con referencia a la resistencia de inmersión compresión, los datos finales dieron cuenta de que la muestra patrón es mayor en 1.55 % al valor obtenido de los grupos considerados en el reciclaje. Dichos valores, llevaron a establecer como conclusión que las mezclas asfálticas con material reciclado no difieren de manera significativa en todas las propiedades analizadas, además que los valores de todos los grupos analizados cumplen de



manera satisfactoria con los requisitos de la normativa peruana vigente, sobre todo al considerar el 33.3 % del reemplazo del agregado.

2.1.3. Antecedentes locales

Lipe y Valeriano (2023) desarrollaron una tesis de grado en la Universidad Nacional del Altiplano titulada “Influencia de la adición de pavimento reciclado en las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica y base granular en la Av. La Torre de la ciudad de Puno, 2021” teniendo el objetivo de establecer cuan influyente es el uso de un pavimento recuperado en las características mecánicas de una mezcla asfáltica y una capa granular para su uso en la pavimentación de la Av. La Torre en Puno.

Con ese fin implementaron una metodología en la que obtuvo asfalto reciclado de la Avenida La Torre en la Ciudad de Puno. Luego, procedió a realizar evaluaciones en laboratorio que abordaron la estabilidad y el flujo (mediante el ensayo Marshal), así como la resiliencia al deterioro causado por la humedad (mediante la prueba de Lottman modificado) en muestras de mezcla asfáltica. Además, analizó el índice de soporte CBR de una base granular. En el caso de la mezcla asfáltica, añadió pavimento asfáltico reutilizado en proporciones del 15 %, 25 %, 35 % y 45 % del peso absoluto de la mezcla, contrastándola con un ejemplar estándar MAC-1. Con respecto la capa granular, incorporó pavimento asfáltico recuperado en proporciones del 15 %, 30 %, 45 % y 60 % del peso absoluto de la mezcla, contrastándola con un ejemplar estándar de base granular. En total, utilizó 51 cilindros de mezcla asfáltica en los ensayos de Marshal y Lottman modificado, y realizó 15 pruebas de CBR para la base granular.



En consecuencia, obtuvo resultados revelando que la proporción óptima de pavimento asfáltico recuperado que se puede agregar a la mezcla asfáltica es del 39%. Esto condujo a mejoras significativas, aumentando la estabilidad en un 8.01%, reduciendo el flujo en un 14.89% y aumentando la resiliencia al deterioro causado por la humedad en un 4.59% en condiciones normales. En relación a la base granular, determinó que la cantidad máxima de pavimento asfáltico reciclado que se puede añadir es del 21% del peso total, mientras mantenga el índice CBR. El tesista concluyo que la incorporación de pavimento asfáltico recuperado en tanto la mezcla asfáltica como en la base granular no afecta negativamente sus características mecánicas.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Concreto hidráulico reciclado

La rápida urbanización y el crecimiento de la población provocan efectos adversos, como la explotación no sostenible de los recursos naturales, la degradación ambiental y el deterioro de amplias zonas. En particular, la industria de la construcción no sólo consume enormes recursos naturales, además de generar una gran proporción de residuos de construcción y demolición (RCD) en el proceso de renovación y reurbanización urbana. Por otra parte, la industria de la construcción se considera una de las industrias clave que tiene un alto potencial para la adopción de una economía circular. Por ejemplo, la industria de la construcción es encargado del aprovechamiento del 40 % del total de recursos energéticos y naturales consumidos por la economía mundial. Por lo tanto, la reutilización y el reciclaje de los residuos de construcción, así como la minimización de la generación de residuos de la industria de la construcción,



encajan bien en la promoción de prácticas de economía de reciclaje (Pham et al., 2024, p. 2).

El reciclado de los residuos de construcción y demolición de infraestructuras es un importante punto de debate en muchas partes del mundo. Con muchas de las principales carreteras y sistemas de infraestructuras llegando a una fase en la que los costes de mantenimiento y reparación justifican la sustitución de dichos sistemas, muchas autoridades están sustituyendo sus infraestructuras para mantener los niveles de servicio y fiabilidad necesarios, ante ello el reciclado de los residuos de concreto hidráulico reciclado se ha investigado a fondo en muchos estudios, ya que la sostenibilidad es cada vez más importante para los organismos de financiación de todo el mundo (Naser et al., 2022, p. 1).

En las últimas décadas, la industria de la construcción ha crecido rápidamente, sobre todo en los países en desarrollo, lo que ha provocado la extenuación de los recursos naturales y la generación de grandes cantidades de residuos de edificación y demolición. Los áridos de concreto reciclado constituyen la mayor parte de los residuos de concreto demolido. La fabricación de concreto a base de AR sustituyendo a los áridos naturales se ha promovido como una forma eficiente de utilizar los residuos de la construcción y conservar los recursos naturales (Kessal et al., 2022, p. 238).

En general, se cree que las malas características del concreto reciclado en comparación con el agregado natural, como la considerable absorción de agua, la mayor porosidad y la baja densidad, tienen un efecto adverso en las propiedades del concreto fresco y endurecido. Por lo tanto, el concreto reciclado se ha limitado principalmente a usos no estructurales en la actualidad. Además, la principal causa



de estas desventajas del concreto reciclado es el mortero adherido a los áridos. Este mortero forma una nueva zona de transición de interfaz entre sí y la nueva pasta de cemento, que se convierte en la región más débil del concreto con concreto reciclado. En consecuencia, el rendimiento del concreto con áridos reciclados debe mejorarse mediante el incremento de las propiedades del concreto reciclado a fin de facilitar la reutilización de este residuo a gran escala en el campo de la construcción. Varios investigadores han propuesto numerosas técnicas para intentar mejorar sus propiedades (Kessal et al., 2022, p. 239).

Entonces, los recursos residuales ofrecen las ventajas de ser rentables y ecológicos cuando se utilizan como materiales secundarios. Las investigaciones recientes se centran en la incorporación de materiales reciclados para mejorar las propiedades de la mezcla. Los materiales reciclados proceden de diversas fuentes, como residuos de la construcción, agrícolas e industriales. Estos diversos tipos de residuos incluyen residuos hospitalarios, residuos agrícolas, residuos plásticos, residuos industriales y residuos de construcción. La mayoría de estos residuos son no degradables (residuos plásticos, polímeros sintéticos, neumáticos de desecho, cámaras de neumáticos, etc.) o degradables (cáscaras de yuca procedentes de los residuos del procesado de la yuca). En las mezclas bituminosas tradicionales, suelen emplearse como sustitutos parciales o totales de los áridos gruesos, finos y de relleno mineral. Se está estudiando la viabilidad de utilizar varios materiales degradables como rellenos en el hormigón asfáltico. Por ejemplo, materiales como la ceniza de cáscara de arroz, la ceniza de semilla de dátil, las cáscaras de bígaro, la ceniza de hueso de vaca y las cáscaras de huevo molidas (Aladegboye et al., 2022, p. 2111).

En consecuencia, se tiene a continuación, el proceso de obtención de concreto reciclado:

Figura 2

Obtención de concreto reciclado.



Fuente: Kessal et al. (2022, p. 241).

Es dable mencionar que, para el desarrollo de la presente investigación fueron recogidos de un botadero ubicado en las afueras de la localidad de Ilave, en Puno, posteriormente fueron triturados mecánicamente de manera manual con una comba de 20 libras en el mismo lugar donde se reciclo el material. Este procedimiento se expone en el panel fotográfico adjunto en los anexos de la presente tesis.



2.2.2. Vías de tránsito medio

Actualmente, aproximadamente el 50 % de las carreteras del mundo son de tráfico medio y bajo. Por lo tanto, sorprende que para este tipo de caminos, que comprenden la mayoría de las carreteras del mundo, todavía falte información sobre sus impactos potenciales (Medinas et al., 2019, p. 341).

La cantidad de tráfico se define como la cantidad de vehículos que transitan por una sección o carril durante un periodo de tiempo determinado. Se expresa en unidades como vehículos por día, vehículos por hora, entre otras. La vía se diseña considerando este volumen de tránsito, que se calcula como la demanda diaria promedio que se espera atender hasta el cierre de la etapa de diseño. Este cálculo incluye el valor promedio actual de vehículos que emplea la vía diariamente, incrementado con una tasa de crecimiento anual. La recopilación de estos datos puede realizarse manualmente o mediante sistemas tecnológicos especializados (MTC, 2014, p. 62).

- El Índice Medio Diario (IMD)

Es la cantidad media de vehículos que atraviesan un punto específico a lo largo de un lapso determinado. Dependiendo del período considerado para medir este volumen, puede expresarse como índice medio diario anual (IMDA), índice medio diario mensual (IMDM) o índice medio diario semanal (IMDS) (MTC, 2018b, p. 103)

- Volumen horario de diseño (VHD)

El flujo de tráfico en cualquier carretera exhibe fluctuaciones significativas en los volúmenes de vehículos durante diferentes horas del día y a lo largo de cada



hora a lo largo del año. Se deduce que el Volumen Horario Diario (VHD) tiene en cuenta las demandas críticas, considerando las variaciones estacionales y diarias típicas de una carretera. Además, el VHD debe ser proyectado hacia el final del período de diseño para anticipar su evolución con el tiempo. El volumen horario proyectado corresponde a un porcentaje que varía entre el 12 % y el 18 % del Índice Medio Diario Anual (IMDA) estimado para el año de horizonte del proyecto (MTC, 2018b, p. 105).

2.2.3. Mezcla asfáltica en caliente

Las mezclas en caliente han ganado una notable atención en la industria de los pavimentos debido a su considerable posibilidad de reducir el consumo de energía; no obstante, han surgido preocupaciones sobre la durabilidad del material y el daño por humedad debido a las condiciones de baja temperatura en la mezcla y la compactación. Por ello, los investigadores han estudiado nuevos materiales alternativos, respetuosos con el medio ambiente, que puedan contribuir a un uso más eficiente de los recursos naturales. El uso de materiales reciclados (es decir, desechos generados en las actividades de construcción y demolición) en las capas de base o subbase de los firmes se considera una de las técnicas más significativas utilizadas hasta la fecha. Entre estos materiales se incluyen el concreto de áridos reciclados, el vidrio reciclado y el pavimento de asfalto reciclado. Varios estudios han investigado el uso de diferentes materiales marginales en las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente y han demostrado su eficacia en la mejora de las propiedades mecánicas y de alta temperatura, incluyendo la estabilidad, el flujo, el módulo elástico, la resistencia a la fatiga y el daño por humedad (Naser et al., 2022, p. 2).



Entonces la mezcla asfáltica en caliente representa un aglomerado asfáltico que es un material compuesto muy utilizado en la construcción de carreteras. También se conoce como concreto asfáltico o simplemente asfalto. Un compuesto está formado por elementos que pueden mejorar las propiedades físicas y químicas de los elementos por separado. La mezcla asfáltica en caliente se compone de áridos (piedra triturada, grava y arena) y ligante asfáltico (betún). Los áridos dan fuerza y estabilidad a la mezcla, mientras que el ligante asfáltico mantiene unidos los áridos y aporta flexibilidad (Al Kaaf & Ibeabuchi, 2023, p. 12259).

Los agregados que conformarán la mezcla asfáltica en caliente se dividen en dos grupos en función de sus tamaños siendo: gruesos y finos, estos deben cumplir con ciertas características tal como son plasmadas en el Manual de especificaciones técnicas generales para construcción del (MTC, 2013, p. 559).

Para el caso de los agregados gruesos a usarse en MAC para vías de un tránsito medio, que dicho sea de paso son aquellas cuyo valor de ejes equivalentes sea mayor a los 300 000 y menor o igual a los 3 000 000, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) señala en el segmento 436 del manual citado previamente que deben cumplirse los requisitos expuestos en la tabla a continuación:

Tabla 1

Requisitos de agregado grueso para complementar agregado reciclado.

Parámetro	Norma	Valor	Consideración
Desgaste en la máquina de Los Ángeles (%)	MTC E 207	25.00	Máximo
Desgaste Micro-Deval (%)	ASTM D 7428	25.00	Máximo
Durabilidad al sulfato de magnesio (%)	MTC E 209	18.00	Máximo
Partículas fracturadas mecánicamente - 1 cara (%)	MTC E 210	75.00	Mínimo
Partículas fracturadas mecánicamente - 2 caras (%)	MTC E 210	60.00	Mínimo
Resistencia al deslizamiento	ASTM E 303	0.45	Mínimo
Partículas chatas y alargadas (%)	ASTM D 4791	10.00	Máximo

Fuente: MTC (2013, p. 756).

De la misma manera, el MTC (2013, p. 756) expone que los agregados finos que vayan a ser usados en la conformación de mezclas asfálticas recicladas en caliente para toda pavimentación realizada para toda vía de tránsito medio en el Perú deben cumplir con las características apuntadas en la tabla adjunta líneas abajo.

Tabla 2

Requisitos de agregado fino para complementar agregado fino.

Parámetro	Norma	Valor	Consideración
Durabilidad al sulfato de magnesio (%)	MTC E 209	18.00	Máximo
Angularidad (%)	ASTM D 1252	45.00	Mínimo
Índice de plasticidad (%)	MTC E 111	NP	-
Equivalente de arena (%)	MTC E 114	50.00	Mínimo
Sales solubles totales (%)	MTC E 219	0.50	Máximo

Fuente: MTC (2013, p. 756).

Una vez que tanto los agregados finos como gruesos cumplan con los requisitos establecidos por el manual de especificaciones técnicas generales para edificación, es indicada una granulometría de acuerdo con la proporción máxima

nominal del agregado grueso. En la Tabla 3, se expone la granulometría requerida para MAC de diferentes tipos.

Tabla 3

Granulometría para mezcla de agregados.

Malla estandarizada		Porcentajes que pasan					
Tamiz	(mm)	MAC - 01		MAC - 02		MAC - 03	
1"	25.000	100					
3/4"	19.000	80	100	100			
1/2"	12.500	67	85	80	100		
3/8"	9.500	60	77	70	88	100	
N° 4	4.750	43	54	51	68	65	87
N° 10	2.000	29	45	38	52	43	61
N° 40	0.425	14	25	17	28	16	29
N° 80	0.180	8	17	8	17	9	19
N° 200	0.075	4	8	4	8	5	10

Fuente: MTC (2013, p. 759).

Respecto al material bituminoso, el segmento 415 del Manual de especificaciones técnicas generales para construcción del MTC (2013, p. 471) establece que su selección estará en función de la temperatura media anual de la zona, considerando así para la ciudad de Puno la opción de utilizar asfaltos de grados de penetración de 85 – 100 o de 120 – 150.

Al verificar que los componentes del asfalto cumplen con las directrices del MTC (2013, p. 570) será necesario determinar el diseño de la MAC, para lo cual el mismo manual en su sección 423 establece las características que debe cumplir la mezcla a fin de garantizar una buena calidad para su puesta en servicio. A continuación, se presentan estos parámetros considerados también para la medición de la calidad de la MAC en el desarrollo de la presente investigación: Estabilidad mínima de 5.44 kN, flujo entre 8 – 16 de 0.25 mm, porcentaje de



vacíos de 3 – 5, relación de polvo – asfalto entre 0.6 – 1.3, relación estabilidad/flujo de 1 700 – 4 000.

Cabe mencionar que, además de centrarse en la sostenibilidad, el sector de los pavimentos asfálticos se dedica a la innovación en la construcción de pavimentos. Una técnica bien conocida para producir pavimentos duraderos consiste en combinar áridos con ligante asfáltico y aplicar calor y presión a la mezcla. La carga mineral es uno de los principales componentes de estas mezclas asfálticas (Aladegboye et al., 2022, p. 2110).

Método Marshall

El método Marshall de diseño de mezclas se utiliza para obtener la proporción de cada elemento que compone la mezcla asfáltica en caliente en caliente (Lv et al., 2020, p. 3).

Entonces, la técnica de diseño de mezclas Marshall se utiliza sobre todo para crear mezclas asfálticas que cumplan los requisitos internacionales. Sin embargo, debido a las duras condiciones ambientales y a las pesadas cargas de tráfico, varias de estas carreteras presentan graves problemas al poco tiempo de estar en uso, lo que supone un aumento de los costes de mantenimiento (Al Kaaf & Ibeabuchi, 2023, p. 12258).

De acuerdo MTC (2016, p. 589) el método emplea muestras de prueba estándares de 64 mm (2 ½”) de altura y 102 mm (4”) de diámetro; estos se calientan, combinan y compacta la mezcla de asfalto-agregado. Los principales factores del método son la densidad, análisis de vacíos, estabilidad y flujo de las muestras compactadas.



Relación estabilidad y flujo

La estabilidad de un pavimento de concreto asfáltico es la capacidad de soportar la deformación cuando se somete a cargas de tráfico en diferentes condiciones ambientales. Como condición, cuando se somete a cargas repetidas, un pavimento estable mantiene su forma y suavidad. A medida que aumenta la estabilidad, también aumenta la densidad, mientras que los espacios de aire disminuyen. Al aumentar el número de giros, el esfuerzo del compactador giratorio se incrementa a medida que aumenta el volumen de tráfico. Este aumento de los esfuerzos giratorios conduce a un aumento de la estabilidad. Por lo tanto, es esencial comprender la estabilidad y su papel en el rendimiento global del pavimento de concreto asfáltico. El análisis de la estabilidad y las especificaciones se detallan en los códigos de práctica pertinentes (Al Kaaf & Ibeabuchi, 2023, p. 12260).

La estabilidad, el flujo y la relación entre estos, son tres parámetros importantes en el análisis de la calidad de las mezclas asfálticas determinadas a través de la realización del ensayo Marshall en laboratorio. El flujo medio de las probetas evaluadas en el ensayo de estabilidad (F_m) tendrá que encontrarse entre el 90 % y el 110 % del valor que se obtenga en la mezcla que se apruebe como fórmula de trabajo (F_t) (MTC, 2013, p. 586).

$$0.9F_t \leq F_m \leq 1.10F_t$$

Puede estar el flujo medio dentro del rango establecido, pero si satisface la exigencia en relación al valor que se obtuvo de la fórmula de trabajo, será tarea del supervisor, comparar los resultados con la estabilidad y decidir si el tramo debe ser aceptado o rechazado (MTC, 2013, p. 586).

Al estar estos dos parámetros estrechamente relacionados respecto a su determinación a nivel de laboratorio, también debe cumplirse que el valor de esta relación se encuentre en el ámbito de los parámetros figados por el Manual de especificaciones técnicas generales para construcción del MTC (2013, p. 586).. Por ello, en la tabla a continuación se exponen los requisitos para estos tres parámetros de una MAC que será expuesta a un tránsito medio.

Tabla 4

Características de relación estabilidad/flujo.

Parámetro	Norma	Valor	Consideración
Número de golpes para compactación	MTC E 504	50	-
Estabilidad (kN)	MTC E 504	5.44	Mínimo
Flujo (0.25 mm)	MTC E 504	8 a 16	Intervalo
Relación estabilidad/flujo (kg/cm)	MTC E 504	1700 a 4000	-

Fuente: MTC (2013, p. 570).

Vacíos

La gradación de los áridos es una de las características en las que se basa la mezcla asfáltica para soportar cargas. La variabilidad en la gradación de los áridos en una integración asfáltica en caliente puede deberse a la producción en cantera, la mezcla, la colocación y la compactación. Para controlar la variabilidad, durante el diseño se determina la gama de áridos a utilizar. También se utilizan simulaciones numéricas para limitar la variabilidad de la gradación de los áridos. Los agregados finos y gruesos se compactan de manera diferente y, por lo tanto, afectan el número de vacíos de aire y cómo se interconectan en el pavimento, ya que tienen diferente empaquetamiento de partículas en la estructura (Kamau et al., 2023, p. 2).

Así, MTC (2013, p. 570) el expone que este parámetro debe encontrarse entre 3 a 5 % independientemente del tipo de mezcla. En el caso de este parámetro, el valor mínimo que debe presentar una mezcla estará en función de la proporción máxima del agregado grueso tal como expone la Tabla 5 correspondiente a este manual:

Tabla 5

Vacíos en el agregado mineral para MAC.

Malla estandarizada		Vacíos mínimos en el agregado mineral [VMA] (%)
Tamiz	(mm)	
2"	50.000	11.50
1 1/2"	37.500	12.00
1"	25.000	13.00
3/4"	19.000	14.00
1/2"	12.500	15.00
3/8"	9.500	16.00
N° 4	4.750	18.00
N° 8	2.360	21.00

Fuente: MTC (2013).

Resistencia

El aumento del volumen de tráfico combinado con un aumento de la temperatura climática provoca deterioro del pavimento. Estos factores afectan la durabilidad y el rendimiento de la mezcla asfáltica. La reducción de la resistencia y durabilidad de los pavimentos asfálticos debido a varios factores, se muestran como: deshilachado y desprendimiento que se producen debido a la mala unión agregado-aglomerante. La aparición de daños en la capa de pavimento asfáltico acelerará la posibilidad de que se produzcan otros tipos de deterioro en la mezcla, como surcos, grietas por fatiga y surcos estructurales debido a las altas tensiones



que llegan a los materiales no ligados y a los materiales de la base de la carretera (Abed et al., 2019, p. 2).

Así, es necesario mencionar a la resistencia a la compresión de una mezcla asfáltica en caliente que es definida como la capacidad que tiene el material para resistir esfuerzos axiales que lo comprimen a manera de simulación de las cargas del tráfico. En esa línea, la resistencia a la compresión retenida representa el porcentaje de la resistencia original que retiene la MAC al haber sido sumergida en agua, siendo determinadas de acuerdo a las consideraciones del reglamento MTC E 518 del Manual de ensayo de materiales del (MTC, 2016, p. 653). Los valores solicitados para las carpetas asfálticas de vías de tránsito medio son de 2.1 MPa (21 kg/cm²) y 75 % respectivamente (MTC, 2013, p. 570).

El otro tipo de resistencia solicitado se refiere a la resistencia conservada a la tracción indirecta, siguiendo el mismo concepto de la resistencia a la compresión conservada. En este caso, este parámetro requiere de un valor mínimo de 80 % tal como establece el Manual de especificaciones del (MTC, 2013, p. 570).

Para los ensayos se moldearán dos probetas de muestras como mínimo, para verificar su resistencia en el ensayo de laboratorio Marshall (MTC E 504); en forma paralela se determina la densidad media de 4 probetas moldeadas (D_e) (MTC, 2016, p. 583).

La estabilidad media de 4 probetas (E_m) debe ser al menos igual al 95 % de la estabilidad de la mezcla de la fórmula de trabajo (E_t) (MTC, 2013, p. 585).

$$E_m \geq 0.95E_t$$



También, la estabilidad de cada una de las probetas (E_i) tendrá que ser igual o mayor al 90 % del valor medio de estabilidad, solo se admitirá un valor individual que ese por debajo de ese límite (MTC, 2013, p. 586).

$$E_i \geq 0.95E_m$$

De incumplir alguna de estas exigencias se rechazará el tramo presentado en las muestras (MTC, 2013, p. 586).

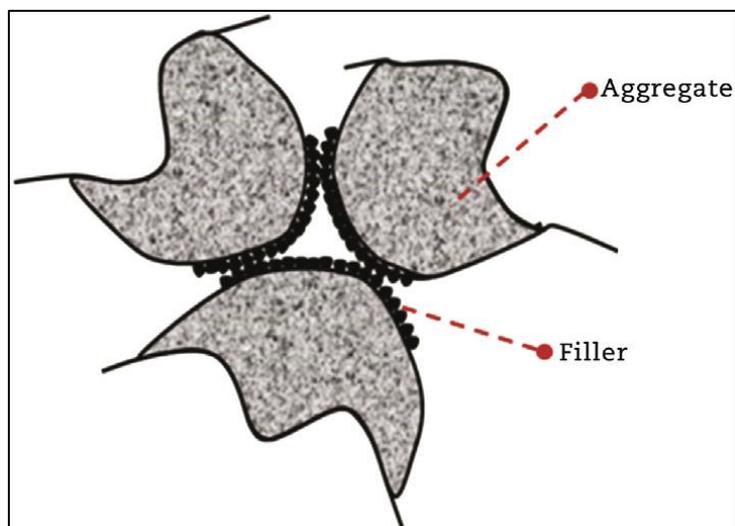
Relación polvo y asfalto

Las cargas minerales forman parte del esqueleto de áridos del pavimento y desempeñan un papel importante en las mezclas asfálticas porque rellenan los huecos de la mezcla de pavimentación y mejoran la cohesión del ligante asfáltico. Proporcionan puntos de contacto entre las partículas individuales y, por lo tanto, generalmente se considera que desempeñan la misma función que las partículas más gruesas a la hora de resistir las tensiones impuestas al pavimento. El relleno mineral en la mezcla asfáltica ofrece para la durabilidad de las mezclas asfálticas en el caso de acción del agua debido a sus características físicas, reduciendo la abertura de la estructura granular y dificultando así el ingreso del agua y del aire. Las propiedades mecánicas estaban fuertemente dictadas por el tipo y la cantidad de carga mineral. Además, la influencia del relleno mineral a escala de la masilla también se verificó con la ayuda de los ensayos de penetración y punto de reblandecimiento, confirmando la concordancia entre los resultados de los ensayos de penetración y punto de reblandecimiento, confirmando la concordancia entre los resultados de la mezcla y el filler (Choi et al., 2020, p. 252).

La proporción del polvo, entendiendo al polvo como el filler mineral, es calculado en función del porcentaje en peso del agregado pasante de la malla del tamiz estandarizado N° 200 y el componente de asfalto efectivo en el porcentaje de la mezcla sustrayendo el porcentaje de asfalto absorbido. En este caso, el Manual de especificaciones técnicas generales para construcción (MTC, 2013, p. 570) describe que la relación polvo – asfalto ha de estar entre 0.6 a 1.3.

Figura 3

Contenido óptimo de cemento asfáltico de los diferentes tipos de MAC.



Fuente: Choi et al., 2020 (p. 252)

Esta relación se refiere a la proporción de polvo mineral (también conocido como filler) y asfalto (ligante bituminoso) en la mezcla. El polvo mineral es el material fino que pasa a través de un tamiz de 0.075 mm, y su interacción con el asfalto determina diversas propiedades de la mezcla (Castro et al., 2020, p. 250).

- Efectos de una relación inadecuada

Exceso de polvo: Puede resultar en una mezcla demasiado rígida y difícil de compactar. Además, puede aumentar la susceptibilidad a la formación de grietas y fisuras debido a la falta de flexibilidad (Castro et al., 2020, p. 250).



Deficiencia de polvo: Puede resultar en una mezcla con demasiados vacíos, lo que reduce su estabilidad y resistencia. Además, una mezcla con pocos finos puede ser más susceptible a la acción del agua y al daño por humedad (Castro et al., 2020, p. 250).

Sin embargo, las propiedades mecánicas y volumétricas de las mezclas que incorporan concreto hidráulico reciclado son sólo dos factores a considerar al momento de analizar la viabilidad de su aplicación en prácticas reales. Sus implicaciones para la sostenibilidad medioambiental, debido a las razones mencionadas anteriormente, tampoco pueden descuidarse (Vega A et al., 2022, p. 924).

2.3. MARCO CONCEPTUAL

Aditivo mejorador de adherencia. – El aditivo que actúa como mejorador de adherencia en los asfaltos vienen a ser mezclas químicas que tienen en su composición grupos activos que al ser añadidos traen consigo la reducción de la tensión superficial por ende el betún se adhiere a la superficie de los agregados (NEO, 2023, p. 1).

Agregado bien graduado. – Es aquel agregado que presenta una gradación desde el tamaño máximo hasta el de un relleno mineral y que se encuentra centrado a una curva granulométrica “huso” especificada (MTC, 2018a, p. 3).

Agregado fino. – Corresponde al agregado cuya granulometría se ve regida a ciertas especificaciones técnicas, no obstante, es aquel que pasa la malla N° 4 (4.75 mm), pudiendo ser obtenido por medio de la desintegración natural o artificial (MTC, 2018a, p. 3).



Agregado grueso. – Es el agregado cuya granulometría sigue ciertas especificaciones técnicas, sin embargo, se retiene en la malla N° 4 (4.75 mm), pudiendo ser obtenido por medio de la desintegración natural o artificial (MTC, 2018a, p. 3).

Agregado reciclado. – Material graduado según especificaciones resultante del procesamiento de materiales de construcción recuperados y complementados con otros faltantes (MTC, 2018a, p. 3).

Asfalto. - Material cementante, que varía en color desde marrón oscuro hasta negro, compuesto principalmente por betunes naturales o derivados de la refinación del petróleo. El asfalto se encuentra en proporciones variables en la mayoría del crudo de petróleo (PAM, 2023, p. 1).

Base granular. - Compuesta por agregados triturados, proporciona soporte estructural a la capa de rodadura y ayuda a distribuir las cargas de tráfico hacia las capas inferiores (Lipe y Valeriano, 2023, p. 54).

Cemento asfáltico. - Un asfalto con flujo o sin flujo, especialmente preparado en cuanto a calidad o consistencia para ser usado directamente en la construcción de pavimentos asfálticos (MTC, 2018a, p. 7).

Filler. – Material fino que se emplea para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente con la finalidad de rellenar los vacíos, espesar la mezcla o como mejorador de adherencia, puede ser cal, cemento Portland, polvos de roca, entre otros (MTC, 2018a, p. 12).

Mezcla asfáltica: Es la capa superficial expuesta al tráfico, compuesta por una mezcla de asfalto y agregados. Proporciona una superficie lisa, resistente al desgaste y a las condiciones climáticas (Gelí, 2021, p. 28).



Pavimento flexible. – Contiene una superficie superior de mezcla asfáltica, una base granular y una subbase, todas asentadas sobre la subrasante. Es conocido por su capacidad de distribuir las cargas de manera gradual y su facilidad de reparación y mantenimiento (Vásquez, 2020, p. 36).

Subbase granular. – Formada por materiales granulares de menor calidad en comparación con la base, ayuda a distribuir las cargas y proporciona drenaje (Argumedo, 2019, p. 14).

Tránsito. – Es un factor para considerar que influye en la estructura de un pavimento, teniendo en cuenta las máximas presiones de contacto, velocidad de tránsito de vehículos, la canalización del tránsito, entre otros (Calva y Muñoz, 2022, p. 1).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO

Fue utilizado material reciclado del distrito de Ilave, ubicado en la provincia de El Collao, como reemplazo parcial del agregado grueso natural en la fabricación de la MAC. La mezcla asfáltica en caliente se preparó en un laboratorio en la Urb. San Mateo de Juliaca, perteneciente al distrito y provincia de San Román, en el departamento de Puno. Ilave se localiza a una elevación de 3862 msnm. en la meseta del Collao, al suroeste del lago Titicaca.

Figura 4

Localización geográfica del sitio donde se realizó la investigación.



Fuente: Alphabet Inc.(2023).

En el distrito de Ilave, el mes con la temperatura más alta registra un promedio de 16.8°C en noviembre, mientras que la temperatura más baja se alcanza en julio con -1.3°C como se muestra en la Tabla 6. Los mayores niveles de precipitación se observan típicamente en enero, con una media mensual de 173.72 mm, contribuyendo significativamente al régimen pluvial anual de la región.

Tabla 6

Climas y temperaturas del distrito de Ilave año 2022.

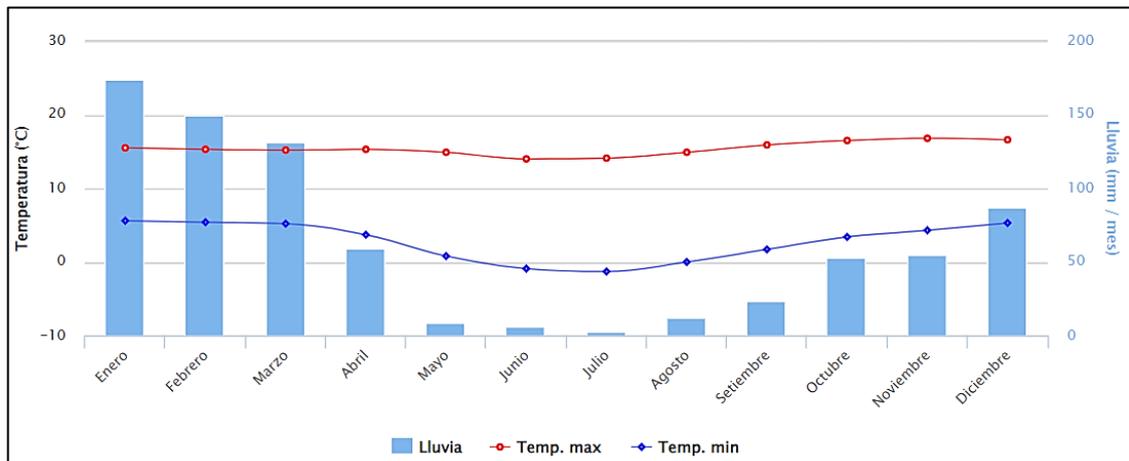
Mes	Temperatura Máxima °C	Temperatura Mínima °C	Precipitación (Lluvia) Ml.
Enero	15.5	5.6	174
Febrero	15.3	5.4	149
Marzo	15.2	5.2	131
Abril	15.3	3.7	59
Mayo	14.9	0.8	9
Junio	14	-0.9	6
Julio	14.1	-1.3	3
Agosto	14.9	0	12
Setiembre	15.9	1.7	23
Octubre	16.5	3.4	53
Noviembre	16.8	4.3	54
Diciembre	16.6	5.3	87

Fuente: SENAMHI (2022).

A continuación, en la Figura 5 presenta la variación anual de temperaturas en el distrito de Ilave. Se observa que de mayo a agosto las temperaturas caen por debajo de los 0 °C, de octubre a diciembre están por debajo de los 10 °C, y de enero a marzo superan los 10°C. En cuanto a la lluvia, se distribuye de manera uniforme con más de 100 mm al mes.

Figura 5

Distribución anual Climas y temperaturas del distrito de Ilave.



Fuente: SENAMHI (2022).

3.2. TIPO DE ESTUDIO

3.2.1. Tipo

La tesis contempló un tipo de investigación aplicada, puesto que su finalidad es la solución de problemas prácticos con la aplicación de la investigación básica (Bernal, 2010).

3.2.2. Nivel

Corresponde a un nivel explicativo, cuyo objetivo es el establecer las causas y efectos en el fenómeno de estudio (Hernández et al., 2014).

3.2.3. Enfoque

El estudio comprendió un método cuantitativo, considerando que emplea la recopilación de información con el propósito de verificar suposiciones utilizando mediciones numéricas y análisis estadístico. Esto permite identificar pautas de conducta y poner a prueba teorías (Hernández et al., 2014).

3.2.4. Diseño

Fue experimental, puesto que manipuló deliberadamente a la variable independiente, además que se contó con un grupo control o patrón con el cual se pudo determinar si las variaciones son significativas (Hernández et al., 2014).

3.3. VARIABLES

3.3.1. Definición conceptual de variables

Variable independiente (X): Concreto hidráulico reciclado.

Se trata de un material elaborado mediante la reutilización de concreto anteriormente utilizado, este procedimiento involucra la trituración y procesamiento del concreto previo para generar agregados reciclados, los cuales son empleados como elemento principal en la creación del nuevo concreto. El concreto hidráulico reciclado conserva muchas de las propiedades y características presentes en el concreto tradicional, tales como su resistencia y durabilidad, además de proporcionar ventajas adicionales como la reducción de desechos de construcción y la disminución en la extracción de recursos naturales (Tarazona, 2019) .

Variable dependiente (Y): Propiedades de la mezcla asfáltica en caliente.

El análisis de una mezcla asfáltica en caliente se enfoca en analizar sus características físicas y mecánicas, las cuales son cruciales para su desempeño. Dichas características abarcan la estabilidad, que ayuda a resistir deformaciones bajo carga; la flexibilidad, que permite adaptarse a las deformaciones sin sufrir fracturas; la resistencia estructural; los niveles de aire atrapado en la mezcla compactada, que inciden en su durabilidad; los vacíos presentes en los agregados minerales, los cuales afectan la permeabilidad y resistencia; el contenido de asfalto, que determina la cohesión y

adherencia de la mezcla; y la concentración de filler, la cual puede alterar las propiedades de la mezcla (Condezo & Prado, 2020).

3.3.2. Operacionalización de variables

Tabla 7

Operacionalización de variables del estudio.

Variable	Dimensiones	Indicador	Unidad
Variable independiente (X): Concreto hidráulico reciclado.	Dosificación de concreto hidráulico reciclado.	Sustitución del 0 %	(%)
		Sustitución del 10 %	(%)
		Sustitución del 20 %	(%)
		Sustitución del 30 %	(%)
Variable dependiente (Y): Propiedades de la mezcla asfáltica en caliente.	Variación de la relación estabilidad y flujo	Estabilidad	(kN)
		Flujo	(mm)
	Variación del porcentaje de vacíos	Vacíos con aire	(%)
		Vacíos llenos de asfalto	(%)
		Vacíos en el agregado mineral	(%)
	Variación de la resistencia	Resistencia conservada	(%)
		Resistencia retenida	(%)

3.4. POBLACION Y MUESTRA DEL ESTUDIO

3.4.1. Población

Corresponderá a las mezclas asfálticas en caliente diseñadas para vías de nivel de tránsito medio sin y con reemplazo del agregado natural por concreto hidráulico reciclado en el distrito de Ilave, provincia de “El Collao” y departamento de Puno.

3.4.2. Muestra

La muestra correspondió a un total de 108 unidades experimentales (briquetas) considerando las distintas mezclas asfálticas en caliente sin y con

reemplazo del agregado natural por concreto hidráulico reciclado para un tramo entre las cuadras 4 y 5 de la Av. República con coordenadas UTM 432066.81 E y 8222681.70 S.

Estas mezclas comprendieron a 4 tratamientos con la sustitución del 0, 10, 20 y 30 % de agregado grueso por concreto reciclado, donde se varió el contenido de cemento asfáltico desde 7 % a 5 % con modificaciones de 0.5 %, tal como se observa en la Tabla 8 haciendo un total de 60 briquetas para la obtención del contenido ideal de cemento asfáltico.

Tabla 8

Muestra para la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico.

	Contenido de cemento asfáltico (%)					Sub total
	7	6.5	6	5.5	5	
MAC patrón	3	3	3	3	3	15
MAC con 10 % CR	3	3	3	3	3	15
MAC con 20 % CR	3	3	3	3	3	15
MAC con 30 % CR	3	3	3	3	3	15
Total						60

Asimismo, para la obtención de la resistencia retenida y conservada se consideró 48 briquetas, variando la medición de la resistencia a compresión y tracción en su condición seca y húmeda para las mezclas con óptimo contenido de cemento asfáltico se acuerdo con los detalles que siguen:

Tabla 9

Muestra para la determinación de la resistencia conservada y retenida.

	Contenido de cemento asfáltico (%)	Resistencia a la compresión		Resistencia a la tracción		Total
		Muestra seca	Muestra húmeda	Muestra seca	Muestra húmeda	
MAC patrón	5.68	3	3	3	3	12
MAC con 10 % CR	5.71	3	3	3	3	12
MAC con 20 % CR	5.76	3	3	3	3	12
MAC con 30 % CR	5.80	3	3	3	3	12
Total						48



3.5. DISEÑO ESTADÍSTICO

Para llevar a cabo el análisis estadístico inferencial, se tomaron en cuenta los siguientes procedimientos; además, se decidió trabajar con un nivel de certeza del 95 % y un error permitido del 5 %:

- Se llevó a cabo la comparación de grupos mediante el análisis de varianza de un solo factor (ANOVA) en el caso de que los registros exhibieran una distribución normal.
- Se aplicó el estadístico de Kruskal-Wallis para comparar grupos en situaciones donde los datos no mostraban una distribución normal.

3.6. PROCEDIMIENTO

La recolección de datos contempló a la observación experimental como técnica, mientras que, los instrumentos fueron fichas donde se anotaron cada uno de los valores productos de los ensayos de laboratorio en concordancia con las normas del Manual de ensayos de materiales (MTC, 2016) y las políticas establecidas por el laboratorio de asfalto, estos se indican en la Tabla 10.

Un aspecto importante, es que la calibración de los instrumentos estuvo a cargo del laboratorio, siendo validados mediante certificados que se anexan al final de la investigación.



Tabla 10

Técnicas e instrumentos para recolectar datos de los indicadores de la investigación.

Dimensión	Indicador	Técnica	Instrumento
Relación estabilidad y flujo	Estabilidad (kN)	Observación experimental	Ficha de recolección de datos - MTC E 504
	Flujo (mm)	Observación experimental	Ficha de recolección de datos - MTC E 504
Vacíos	Vacíos con aire (%)	Observación experimental	Ficha de recolección de datos - MTC E 505
	Vacíos llenos de asfalto (%)	Observación experimental	Ficha de recolección de datos - MTC E 504
	Vacíos en el agregado mineral (%)	Observación experimental	Ficha de recolección de datos - MTC E 504
Resistencia	Resistencia conservada (%)	Observación experimental	Ficha de recolección de datos - MTC E 513
	Resistencia retenida (%)	Observación experimental	Ficha de recolección de datos - MTC E 518

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS PRELIMINARES

Previamente a la elaboración y ensayo de las mezclas asfálticas en caliente, fue necesaria realizar la caracterización de los agregados que compondrían la combinación en la elaboración de la MAC para vías de tránsito medio.

De esta manera, en la Tabla 11 se exponen los resultados de la clasificación granulométrica realizada sobre el espécimen de piedra chancada de ½". Aquí se aprecia que este agregado presenta una mayoría de partículas de ½" con un 61.2 %, no obstante, también se presentan cantidades considerables de material de 3/8" y ¾", sumado a pequeñas cantidades de partículas más pequeñas.

Tabla 11

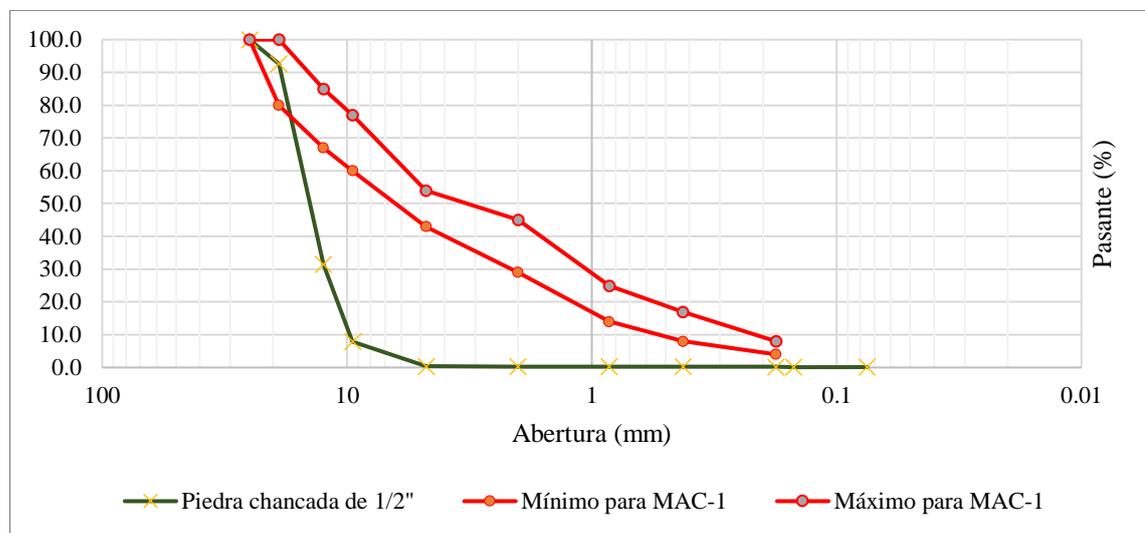
Granulometría de la piedra chancada ½".

Tamices		Peso retenido (g)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante (%)
Pulgadas	(mm)				
1"	25	0.0	0.0	0.0	100.0
¾"	19	476.5	7.4	7.4	92.6
½"	12.5	3956.4	61.2	68.5	31.5
3/8"	9.5	1522.3	23.5	92.1	7.9
N° 04	4.75	488.9	7.6	99.6	0.4
N° 10	2.00	3.7	0.1	99.7	0.3
N° 20	0.85	1.2	0.0	99.7	0.3
N° 40	0.425	0.8	0.0	99.7	0.3
N° 80	0.177	2.1	0.0	99.8	0.2
N° 100	0.15	6.0	0.1	99.8	0.2
N° 200	0.075	2.5	0.0	99.9	0.1
< N° 200	Fondo	7.4	0.1	100.0	0.0

En esa línea, la siguiente figura adjunta la curva granulométrica correspondiente a este material, apreciando justamente lo descrito previamente, dado que se presenta una distribución acomodada a la izquierda de la curva lo que indica una gran cantidad de partículas de gran tamaño y teniendo pasantes mínimos de tamaños mayores a los 9.5 mm (tamiz de 3/8”).

Figura 6

Curva granulométrica de la piedra chancada 1/2”.



Asimismo, la Tabla 12 expone la composición de partículas de este árido grueso confirmando así la tendencia visualizada, con un 99.6 % de su material clasificado como gravas y apenas un 0.3 % y 0.1 % de arenas y finos.

Tabla 12

Composición de partículas de la piedra chancada 1/2”.

Característica	Valor
Peso total (g)	6467.8
Gravas (%)	99.6
Arena (%)	0.3
Pasante de la malla N° 200 (%)	0.1

La Tabla 13, exhibe los resultados de la caracterización granulométrica realizada con el material correspondiente a la piedra chancada de 3/8". En este caso puede observarse que el 100 % del material es pasante de la malla de 1/2", empezando a tener retenidos con las mallas de 3/8", N° 4, N° 10 y cantidades mínimas en las mallas de menores diámetros.

Tabla 13

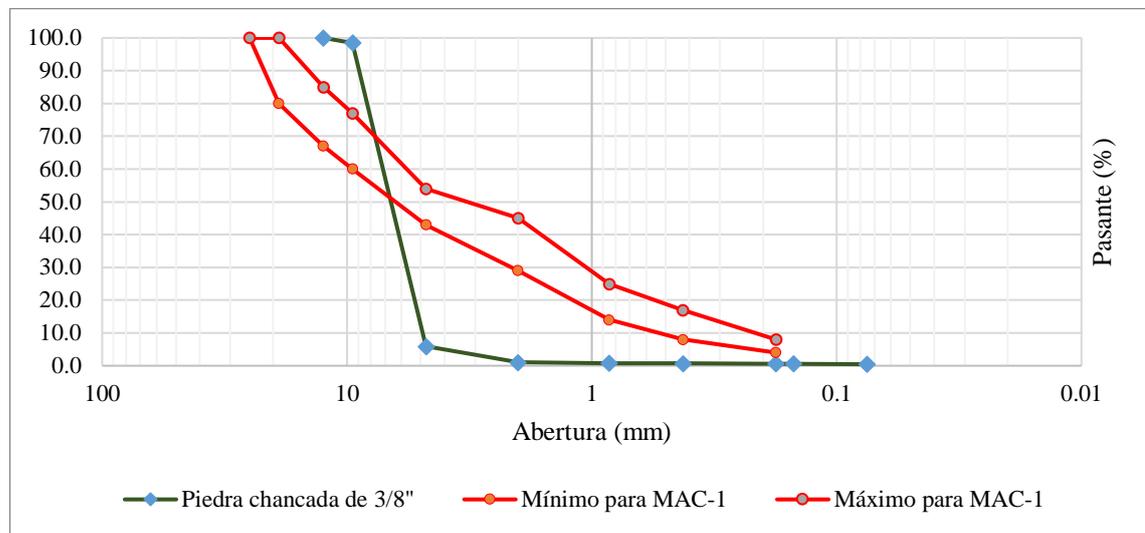
Granulometría de la piedra chancada 3/8".

Tamices		Peso retenido (g)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante (%)
Pulgadas	(mm)				
1/2"	12.5	0.0	0.0	0.0	100.0
3/8"	9.5	87.1	1.5	1.5	98.5
N° 04	4.75	5275.1	92.6	94.1	5.9
N° 10	2.00	278.5	4.9	99.0	1.0
N° 20	0.85	11.8	0.2	99.2	0.8
N° 40	0.425	3.4	0.1	99.3	0.7
N° 80	0.177	5.6	0.1	99.4	0.6
N° 100	0.15	1.6	0.0	99.4	0.6
N° 200	0.075	8.9	0.2	99.5	0.5
< N° 200	Fondo	25.8	0.5	100.0	0.0

En la Figura 7, se anexa la curva granulométrica correspondiente a la piedra chancada de 3/8", observando nuevamente una gran cantidad de material de partículas de tamaños superiores a los 2 mm (malla N° 10), propio de un material que será usado como agregado grueso en la composición de una MAC.

Figura 7

Curva granulométrica de la piedra chancada 3/8”.



En consecuencia, la Tabla 14 tiene la composición de partículas que presenta el material de piedra chancada de 3/8”, teniendo un 94.1 % de gravas siendo el material predominante como se exige para piedra chancada, un 5.4 % de arena y apenas un 0.5 % de partículas finas.

Tabla 14

Composición de partículas de la piedra chancada 3/8”.

Característica	Valor
Peso total (g)	5697.8
Gravas (%)	94.1
Arena (%)	5.4
Pasante de la malla N° 200 (%)	0.5

A continuación, se presenta el resultado del análisis granulométrico a nivel de laboratorio desarrollado para la piedra chancada de ¼” usado en la conformación de la combinación de agregados para la MAC de la presente tesis. Es así como, se visualiza que este material presenta partículas que en su mayoría pueden clasificarse dentro de las arenas con gran cantidad de pasantes de la malla N° 4, en ese sentido, estos agregados constituyen a los agregados finos necesarios para la integración de agregados de la MAC.

Tabla 15

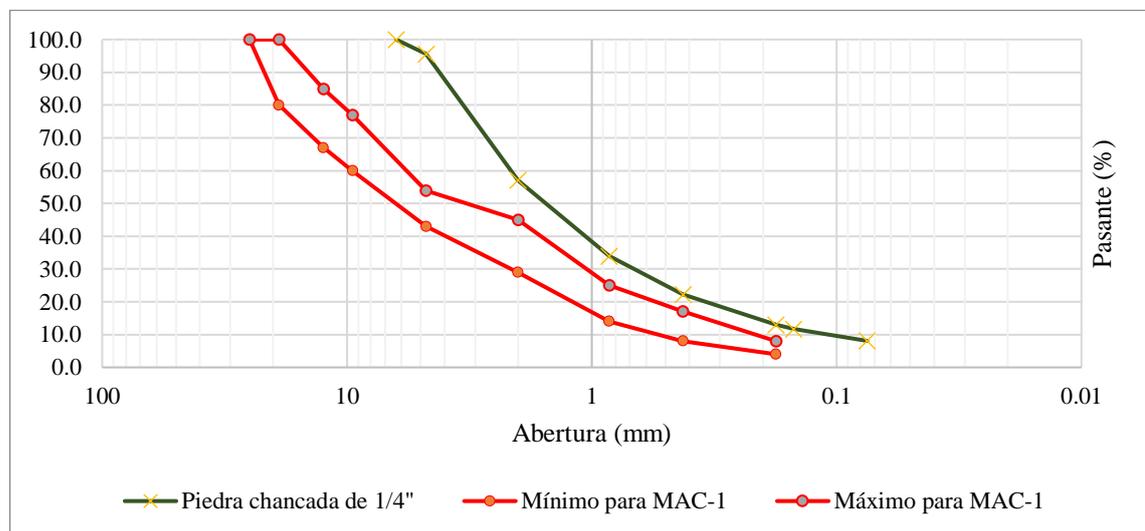
Granulometría de la piedra chancada de 1/4”.

Tamices		Peso retenido (g)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante (%)
Pulgadas	(mm)				
1/4"	6.3	0.0	0.0	0.0	100.0
N° 04	4.75	44.7	4.4	4.4	95.6
N° 10	2.00	394.1	38.6	42.9	57.1
N° 20	0.85	236.8	23.2	66.1	33.9
N° 40	0.425	119.2	11.7	77.8	22.2
N° 80	0.177	94.5	9.2	87.0	13.0
N° 100	0.15	12.9	1.3	88.3	11.7
N° 200	0.075	37.2	3.6	91.9	8.1
< N° 200	Fondo	82.5	8.1	100.0	0.0

Según lo expuesto en la Figura 8, la curva granulométrica de la piedra chancada de 1/4”. Aquí se nota que, a diferencia de los otros materiales analizados, la curva no tiende a una distribución extrema hacia la izquierda ni la derecha siendo un indicador de la presencia de partículas de arena.

Figura 8

Curva granulométrica de la piedra chancada 1/4”.



Así, la Tabla 16 confirma lo expresado anteriormente mostrando que la composición de las partículas de este material tiene tan solo un 4.4 % de gravas, un 87.6 % de arenas y un 8.1 % de partículas finas, todo ello constituyendo la muestra de 1021.9 gramos.

Tabla 16

Composición de partículas de la piedra chancada ¼”.

Característica	Valor
Peso total (g)	1021.9
Gravas (%)	4.4
Arena (%)	87.6
Pasante de la malla N° 200 (%)	8.1

Además del material procesado en la planta chancadora, fue utilizado agregado fino natural tal como es explicado en la sección 415 del Manual de Especificaciones Técnicas Generales del MTC (2013). De esta manera, la Tabla 17 expresa los resultados de la evaluación de la granulométrica efectuado para la arena natural, teniendo de esta manera partículas retenidas a partir de la malla N° 4 (7.6 %), hasta los tamaños inferiores como las mallas N° 100 (7.9 %), la malla N° 200 (6.0 %) y el fondo (1.3 %).

Tabla 17

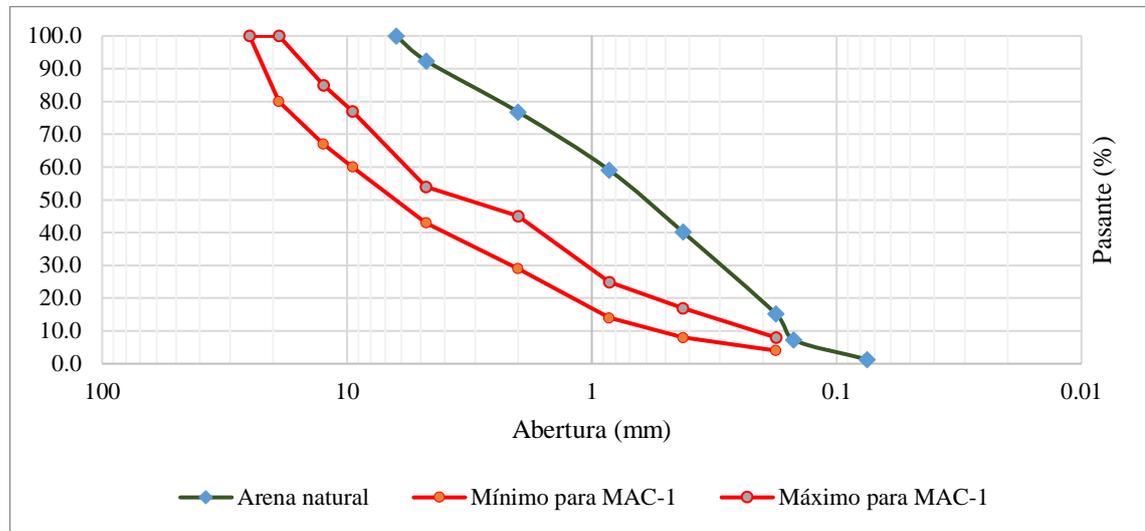
Granulometría de la arena natural.

Tamices		Peso retenido (g)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante (%)
Pulgadas	(mm)				
1/4"	6.3	0.0	0.0	0.0	100.0
N° 04	4.75	78.0	7.6	7.6	92.4
N° 10	2	160.2	15.6	23.2	76.8
N° 20	0.85	182.6	17.8	40.9	59.1
N° 40	0.425	194.1	18.9	59.8	40.2
N° 80	0.177	257.3	25.0	84.8	15.2
N° 100	0.15	81.5	7.9	92.7	7.3
N° 200	0.075	61.6	6.0	98.7	1.3
< N° 200	Fondo	13.0	1.3	100.0	0.0

Es así como, se presenta la Figura 9 donde se expone la curva granulométrica correspondiente a este material, teniendo una distribución de pasantes simétrica, lo que indica que las partículas pertenecen a una clasificación de arenas.

Figura 9

Curva granulométrica de la arena natural.



Seguidamente, se tiene el resumen de la composición del agregado fino natural expuesto en la Tabla 18. Es así como, se presenta un 7.6 % de gravas, un 91.2 % de arenas y solo un 1.2 % de material fino.

Tabla 18

Composición de partículas de la arena natural.

Característica	Valor
Peso total (g)	1028.3
Gravas (%)	7.6
Arena (%)	91.2
Pasante de la malla N° 200 (%)	1.2

La Tabla 19, expone la granulometría del concreto reciclado, este material presenta una gran cantidad de gravas es decir el 97.7 %, arena tan solo 2 % y 0.3 % de material pasante de la malla N° 200.

Tabla 19

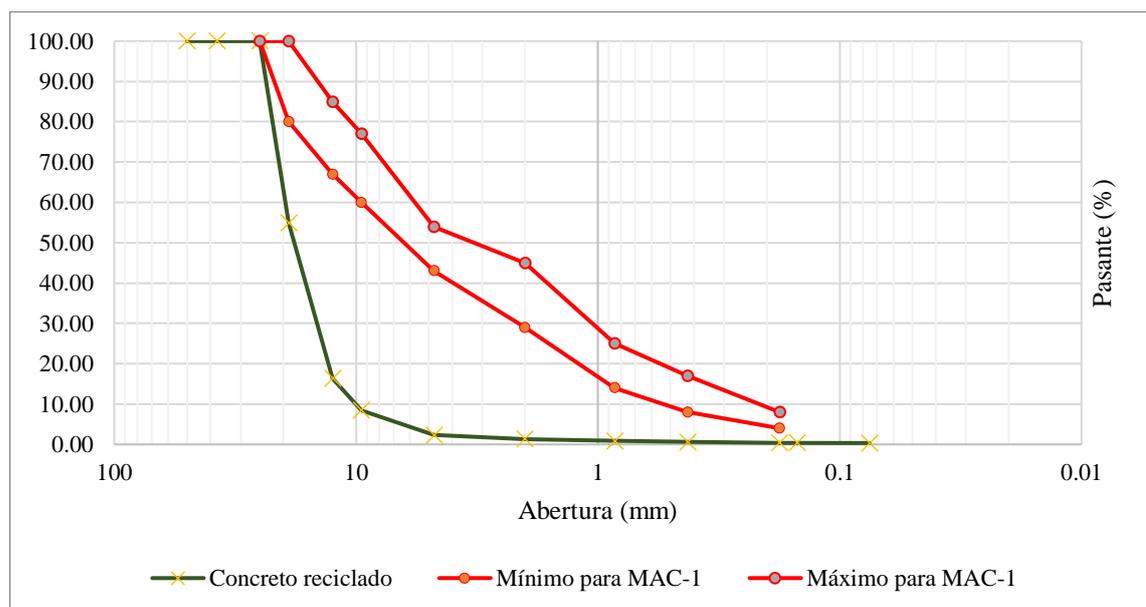
Granulometría del concreto reciclado.

Tamices		Peso retenido (g)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante (%)
Pulgadas	(mm)				
3"	75				
2 1/2"	63				
2"	50	0.0	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	37.5	0.0	0.00	0.00	100.00
1"	25	0.0	0.00	0.00	100.00
3/4"	19	12779.9	45.07	45.07	54.93
1/2"	12.5	10942.2	38.59	83.66	16.34
3/8"	9.5	2230.2	7.87	91.53	8.47
N° 04	4.75	44.7	6.13	97.66	2.34
N° 10	2	291.8	1.03	98.68	1.32
N° 20	0.85	135.3	0.48	99.16	0.84
N° 40	0.425	62.0	0.22	99.38	0.62
N° 80	0.177	52.6	0.19	99.57	0.43
N° 100	0.15	6.3	0.02	99.59	0.41
N° 200	0.075	19.5	0.07	99.66	0.34
< N° 200	Fondo	97.2	0.34	100.00	0.00

De igual manera, en la posterior figura se denota la curva granulométrica del concreto reciclado:

Figura 10

Curva granulométrica del concreto reciclado.



De la misma manera, la Tabla 20 presenta que la composición de este material es de un 97.7 % de gravas y apenas un 2 % de arenas, mientras que, el peso específico aparente es de 2.503 g/cm³ y la absorción de 4.50 %.

Tabla 20

Composición del concreto reciclado.

Característica	Valor
Peso total (g)	28355
Gravas (%)	97.7
Arena (%)	2
Pasante de la malla N° 200 (%)	0.3
Peso específico de masa (g/cm ³)	2.253
Peso específico de la masa saturada superficialmente seca (g/cm ³)	2.353
Peso específico aparente (g/cm ³)	2.503
Absorción (%)	4.50

La Tabla 21, expone la granulometría del cemento que en el caso de la presente investigación fue utilizado como el filler de la MAC. Este filler presenta partículas altamente finas, teniendo pocos retenidos en las mallas N° 100 y N° 200 con 1.2 % y 1.9 % respectivamente, con un 96.9 % de pasantes de la malla N° 200, constituyéndose como un material apto para fungir como el filler en la mezcla asfáltica.

Tabla 21

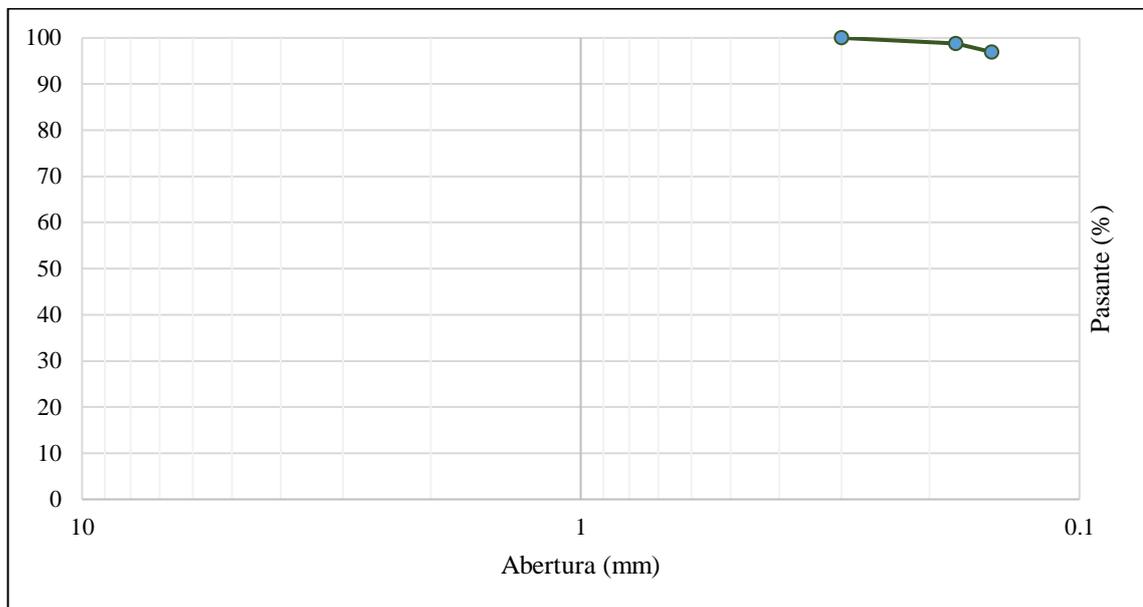
Granulometría del cemento.

Tamices		Peso retenido	Retenido parcial	Retenido	Pasante
Pulgadas	(mm)	(g)	(%)	acumulado (%)	(%)
N° 80	0.177	0.0	0.0	0.0	100.0
N° 100	0.15	2.0	1.2	1.2	98.8
N° 200	0.075	3.0	1.9	3.1	96.9
< N° 200	Fondo	158.4	96.9	100.0	0.0

La curva granulométrica del filler está constituida por una pequeña línea acomodada a la derecha del gráfico conforme se expone en la siguiente imagen:

Figura 11

Curva granulométrica del cemento.



De la misma manera, la Tabla 22 presenta que la composición de este material es de un 96.9 % de material fino y apenas un 3.1 % de arenas.

Tabla 22

Composición de partículas del cemento.

Característica	Valor
Peso total (g)	163.4
Gravas (%)	0.0
Arena (%)	3.1
Pasante de la malla N° 200 (%)	96.9

Posteriormente, fue elaborada la integración de los agregados a fin de conformar la MAC, de modo que se presenta la Tabla 23, con las características granulométricas de este material además de las especificaciones de material pasante mínimo y máximo para cada tamiz en función de las exigencias para una MAC-1 en concordancia al segmento 423 del Manual de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción del MTC (2013).

Tabla 23

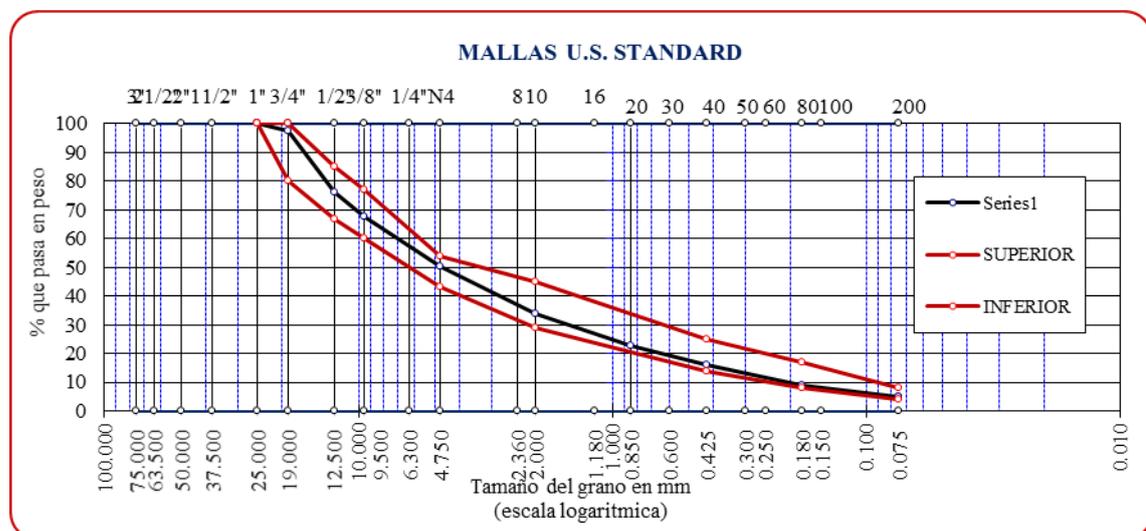
Granulometría de la combinación de agregados naturales.

Tamices		Peso retenido (g)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante (%)	Especificaciones	
Pulgadas	(mm)					Mínimo	Máximo
1"	25	0.0	0.0	0.0	100.0	100.0	100.0
3/4"	19	760.0	1.5	1.5	98.5	80.0	100.0
1/2"	12.5	10022.0	19.7	21.1	78.9	67.0	85.0
3/8"	9.5	5081.0	10.0	31.1	68.9	60.0	77.0
N° 04	4.75	9145.0	17.9	49.0	51.0	43.0	54.0
N° 10	2	358.2.0	16.0	65.0	34.9	29.0	45.0
N° 20	0.85	263.1	11.8	76.8	23.2		
N° 40	0.425	161.5	7.2	84.0	16.0	14.0	25.0
N° 80	0.177	146.1	6.5	90.6	9.4	8.0	17.0
N° 100	0.15	48.3	2.2	92.7	7.3		
N° 200	0.075	55.8	2.5	95.2	4.8	4.0	8.0
< N° 200	Fondo	106.8	4.8	100.0	0.0		

Como se observa en la Figura 12, la curva granulométrica de la integración de agregados desarrollada para su análisis en esta tesis. Es así como, se aprecia que esta curva se encuentra dentro de los límites establecido por el MTC (2013), lo que indica que se trata de un material apto para este tipo de usos.

Figura 12

Curva granulométrica de la combinación de agregados naturales.



Seguidamente, la Tabla 24 presenta el resumen de la composición de esta mezcla de agregados, teniendo así un 49.0 % de grava, 46.2 % de arena y un 4.8 % de partículas finas.

Tabla 24

Composición de partículas de la combinación de agregados.

Característica	Valor
Peso total (g)	51000.0
Gravas (%)	49.0
Arena (%)	46.2
Pasante de la malla N° 200 (%)	4.8

La Tabla 25, presenta los resultados de la caracterización de la combinación de agregados con un 10 % de concreto reciclado. Al igual que en el análisis de la combinación estándar, se presentan los porcentajes de retenidos y pasantes en conjunto con los límites de material pasante para una MAC-1.

Tabla 25

Granulometría de la combinación de agregados con 10 % de concreto reciclado.

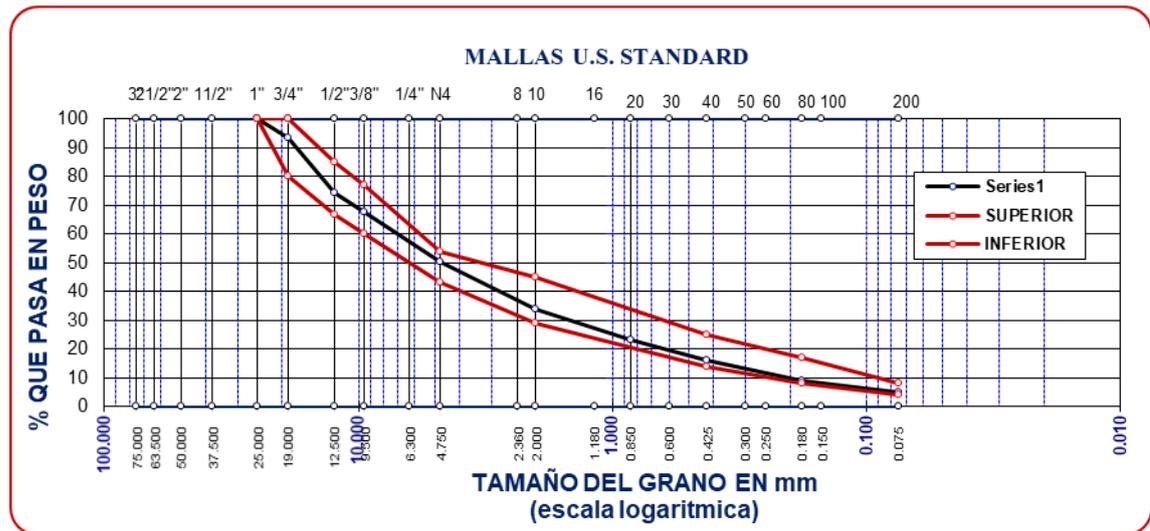
Tamices		Peso retenido (g)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante (%)	Especificaciones	
Pulgadas	(mm)					Mínimo	Máximo
1"	25	0.0	0.0	0.0	100.0	100.0	100.0
3/4"	19	1825.0	6.1	6.1	93.9	80.0	100.0
1/2"	12.5	5537.0	18.5	24.5	75.5	67.0	85.0
3/8"	9.5	2353.0	7.8	32.4	67.6	60.0	77.0
N° 04	4.75	5644.0	18.8	51.2	48.8	43.0	54.0
N° 10	2	298.5	15.2	66.4	34.9	29.0	45.0
N° 20	0.85	193.4	9.9	76.3	23.7		
N° 40	0.425	132.3	6.8	83.1	16.9	14.0	25.0
N° 80	0.177	162.6	8.3	91.3	8.7	8.0	17.0
N° 100	0.15	40.3	2.1	93.4	6.6		
N° 200	0.075	28.7	1.5	94.9	5.1	4.0	8.0
< N° 200	Fondo	100.5	5.1	100.0	0.0		

En esa línea, en la Figura 13 se adjunta la curva granulométrica correspondiente a la integración de agregados con 10 % de CR, en este caso también se cumplen con los

requerimientos de la sección 423 de la EG-2013 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Figura 13

Curva granulométrica de la combinación de agregados con 10 % de concreto reciclado.



Sumado a ello, este resultado se corrobora con el resumen de la composición de la combinación de agregados, presentando un 51.2 % de gravas, 43.7 % de arena y un 5.1 % de material fino.

Tabla 26

Composición de partículas de la combinación de agregados con 10 % de concreto reciclado.

Característica	Valor
Peso total (g)	30000.0
Gravas (%)	51.2
Arena (%)	43.7
Pasante de la malla N° 200 (%)	5.1

En la Tabla 27, se presenta la caracterización granulométrica de la integración de agregados con un 20 % de concreto reciclado. En este caso, se procuró que también sean alcanzados valores óptimos para la composición de una MAC-1.

Tabla 27

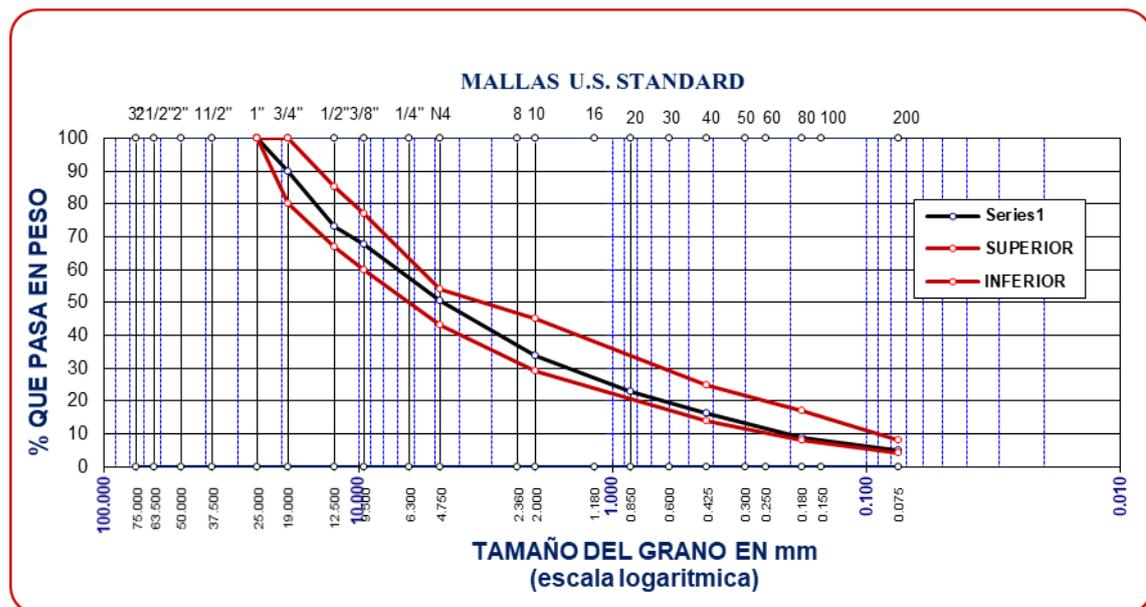
Granulometría de la combinación de agregados con 20 % de concreto reciclado.

Tamices		Peso retenido (g)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante (%)	Especificaciones	
Pulgadas	(mm)					Mínimo	Máximo
1"	25	0.0	0.0	0.0	100.0	100.0	100.0
3/4"	19	2876.7	9.6	9.6	90.4	80.0	100.0
1/2"	12.5	5039.5	16.8	26.4	73.6	67.0	85.0
3/8"	9.5	2103.8	7.0	33.4	66.6	60.0	77.0
N° 04	4.75	5036.4	16.8	50.2	49.8	43.0	54.0
N° 10	2	305.6	17.5	67.7	34.9	29.0	45.0
N° 20	0.85	173.4	9.9	77.7	22.3		
N° 40	0.425	117.5	6.7	84.4	15.6	14.0	25.0
N° 80	0.177	123.5	7.1	91.5	8.5	8.0	17.0
N° 100	0.15	31.6	1.8	93.3	6.7		
N° 200	0.075	26.7	1.5	94.8	5.2	4.0	8.0
< N° 200	Fondo	89.9	5.2	100.0	0.0		

Estos resultados se destacan mejor en la Figura 14, donde la curva granulométrica presenta un ajuste óptimo para cumplir con los límites establecidos para una MAC-1, por ello puede ser usada en la conformación de estos materiales al menos para vías de un tránsito medio.

Figura 14

Granulométrica de la combinación de agregados con 20 % de concreto reciclado.



La Tabla 28, exhibe que esta combinación presenta un 50.2 % de gravas, 44.7 % de arena y un 5.2 % de filler.

Tabla 28

Composición de partículas de la combinación de agregados con 20 % de concreto reciclado.

Característica	Valor
Peso total (g)	30000.0
Gravas (%)	50.2
Arena (%)	44.7
Pasante de la malla N° 200 (%)	5.2

La última combinación de agregados elaborada en la etapa de laboratorio de la presente tesis consistió en la combinación de agregados con un 30 % de concreto reciclado. La granulometría de este material se exhibe en la siguiente tabla, presentando una cantidad de material pasante simétrica en las mallas intermedias, presentando así también en todos los casos valores de pasantes que cumplen con las especificaciones para una MAC-1.

Tabla 29

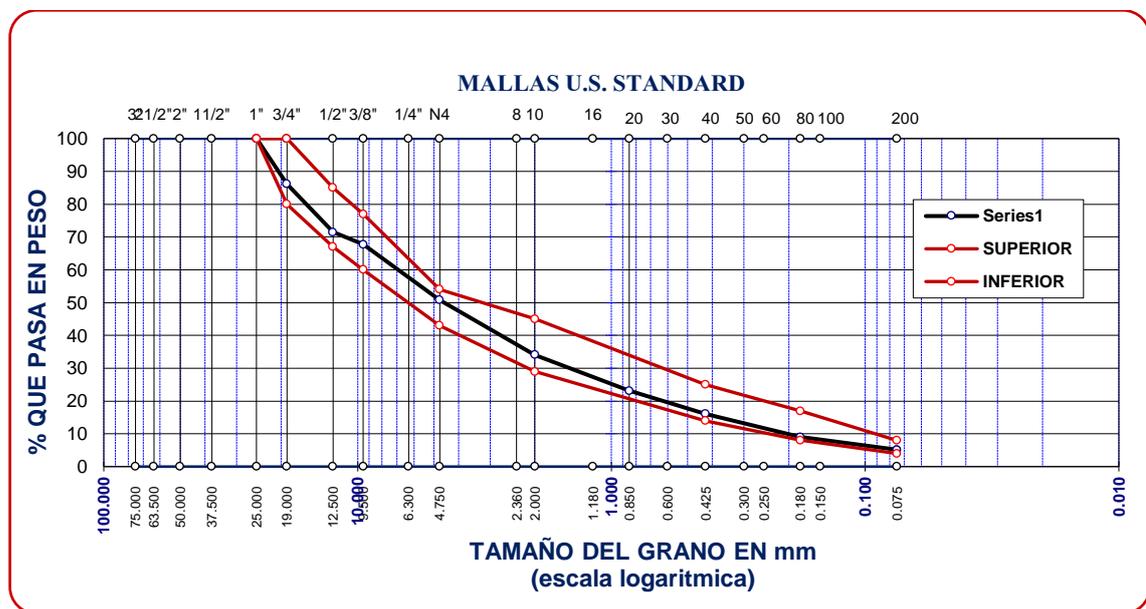
Granulometría de la combinación de agregados con 30 % de concreto reciclado.

Tamices		Peso retenido (g)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante (%)	Especificaciones	
Pulgadas	(mm)					Mínimo	Máximo
1"	25	0.0	0.0	0.0	100.0	100.0	100.0
3/4"	19	4014.0	13.4	13.4	86.6	80.0	100.0
1/2"	12.5	4129.0	13.8	27.1	72.9	67.0	85.0
3/8"	9.5	1319.0	4.4	31.5	68.5	60.0	77.0
N° 04	4.75	5036.0	17.7	49.2	50.8	43.0	54.0
N° 10	2	473.9	20.3	69.5	30.5	29.0	45.0
N° 20	0.85	235.5	10.1	79.6	20.4		
N° 40	0.425	120.7	5.2	84.8	15.2	14.0	25.0
N° 80	0.177	158.7	6.8	91.6	8.4	8.0	17.0
N° 100	0.15	36.3	1.6	93.1	6.9		
N° 200	0.075	42.8	1.8	95.0	5.0	4.0	8.0
< N° 200	Fondo	117.4	5.0	100.0	0.0		

Es así como, en la Figura 15 se exhibe la curva granulométrica correspondiente a este componente con 30 % de CR, evidenciando el ajuste de este material a las especificaciones y, por lo tanto, siendo apto para la conformación de mezclas asfálticas en caliente.

Figura 15

Curva granulométrica de la combinación de agregados con 30 % de concreto reciclado.



Se detalla en la Tabla 30 la síntesis de la composición de agregados del material con un 30 % de concreto reciclado. Es así como se destaca un 49.2 % de grava, 45.7 % de arena y 5.0 % de filler.

Tabla 30

Composición de partículas de la combinación de agregados con 30 % de concreto reciclado.

Característica	Valor
Peso total (g)	30000.0
Gravas (%)	49.2
Arena (%)	45.7
Pasante de la malla N° 200 (%)	5.0

Sumada a la caracterización granulométrica realizada, fueron desarrollados los ensayos de cada uno de las especificaciones exigidas en el segmento 423 del Manual de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción del MTC (2013) para los agregados a usarse en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente.

Por ello, la Tabla 31 presenta los resultados de los ensayos realizados al agregado fino. Aquí se evidencia que, en todos los casos se cumplen con los requerimientos estipulados por la EG-2013 para materiales que conformarán mezclas en altitudes superiores a los 3000 m.s.n.m., lo que designa a estos materiales como aptos para su uso en la composición de mezclas asfálticas en caliente en el Perú.

Tabla 31

Resultados de la caracterización del agregado fino.

Propiedad	Resultado	Especificación técnica
Pasante de la malla N° 40	Límite líquido (%)	No presenta
	Límite plástico (%)	No presenta
	Índice de plasticidad (%)	No presenta
Pasante de la malla N° 200	Límite líquido (%)	31
	Límite plástico (%)	No presenta
	Índice de plasticidad (%)	No presenta
Peso específico de masa (g/cm ³)	2.564	
Peso específico de la masa saturada superficialmente seca (g/cm ³)	2.620	
Peso específico aparente (g/cm ³)	2.715	
Equivalente de arena (%)	73.00	Mínimo de 70 %
Índice de durabilidad (%)	67.00	Mínimo de 35 %
Azul metileno	6.75	Máximo de 8
Angularidad	43.70	Mínimo de 40 %
Durabilidad al sulfato de sodio y sulfato de magnesio (%)	1.90	Máximo de 18 %
Sales solubles (%)	0.152	Máximo de 0.5 %
Absorción	2.20	
Adhesividad	Grado 7	Mínimo 4

Asimismo, la Tabla 32 expone los resultados del análisis hecho al agregado grueso para la conformación de la MAC en la presente investigación. Al igual que con el agregado fino, aquí se aprecia en todos los casos que el material satisface las condiciones orientados a la conformación de mezclas asfálticas en caliente elaboradas con el fin de la conformación de vías a más de 3000 m.s.n.m. siendo aptas para esta aplicación.

Tabla 32

Resultados de la caracterización del agregado grueso.

Propiedad	Resultado	Especificación técnica
Desgaste (%)	17	Máximo de 35 %
Una cara fracturada (%)	94.5	Mínimo de 90 %
Dos o más caras fracturadas (%)	89.5	Mínimo de 70 %
Partículas chatas y alargadas (%)	8.4	Máximo de 10 %
Peso específico de masa (g/cm ³)	2.515	
Peso específico de la masa saturada superficialmente seca (g/cm ³)	2.561	
Peso específico aparente (g/cm ³)	2.637	
Absorción (%)	1.9	
Inalterabilidad (%)	3	Máximo de 15 %
Índice de durabilidad (%)	85	Mínimo de 35 %
Recubrimiento (%) al PEN 85/100	100	
Adherencia	+95	
Sales solubles (%)	0.093	Máximo de 0.5 %

Asimismo, se indica que las características del filler (cemento), del asfalto y del aditivo mejorador de adherencia se exponen en el Anexo 3, donde se puede apreciar que todos estos cumplen con las especificaciones demandadas para su uso en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente.

4.2. DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS

Se llevó a cabo pruebas en el laboratorio para identificar las propiedades de las mezclas asfálticas en caliente, considerando para ello los parámetros establecidos en la



sección 423 del Manual de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción del MTC.

4.2.1. Caracterización de las mezclas asfálticas en caliente

Este análisis comprendió la realización del ensayo Marshall para la determinación de elementos óptimos de cemento asfáltico con el cual fueron desarrolladas cada una de las mezclas asfálticas en función de los porcentajes de sustitución del agregado grueso por concreto reciclado.

En este contexto, es importante destacar que se utilizó un cemento asfáltico PEN 85/100, diseñado para un tiempo de vida útil de 20 años. Además, dado que se destinaba a la construcción de la capa de rodadura para carreteras de tránsito medio, las briquetas fueron compactadas con 50 golpes por cada lado.

Mezcla asfáltica en caliente patrón

En primera instancia fue determinada la granulometría con la que se desarrolló la MAC patrón estando adjunta en la Tabla 33, seguidamente, fueron realizados ensayos a diferentes muestras (incluyendo el ensayo Marshall) para la determinación de la calidad de mezclas con diferentes contenidos de asfalto. Es así como, la Tabla 33 contiene los resultados de las pruebas realizadas a escala de laboratorio a fin de la obtención del porcentaje óptimo de cemento asfáltico considerando los valores de 5.0, 5.5, 6.0, 6.5 y 7.0 %.

Tabla 33

Análisis de las características para la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico de la MAC patrón.

Propiedades	Contenido de cemento asfáltico														
	7.00%	6.50%	6.00%	5.50%	5.00%										
Agregado grueso (%)	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00										
Agregado fino (%)	48.00	48.00	48.00	48.00	48.00										
Filler de la mezcla (%)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00										
Tamaño máximo del agregado (pulgada)	1	1	1	1	1										
Agregado grueso en peso de la muestra (%)	46.50	46.75	47.00	47.25	47.50										
Agregado fino en peso de la muestra (%)	44.64	44.88	45.12	45.36	45.60										
Filler en peso de la muestra (%)	1.86	1.87	1.88	1.89	1.90										
Peso específico máximo (g/cm ³)	2.33	2.34	2.36	2.37	2.39										
Porcentaje de vacíos de aire (%)	1.60	1.50	1.20	1.90	3.10	2.90	4.60	4.80	4.60	6.50	6.30	6.40			
Gravedad específica Bulk de la mezcla compactada (g/cm ³)	2.543	2.543	2.543	2.543	2.543										
Peso específico aparente del agregado total (g/cm ³)	2.676	2.676	2.676	2.676	2.676										
Peso específico efectivo del agregado total (g/cm ³)	2.609	2.609	2.609	2.609	2.609										
Asfalto absorbido por el agregado (%)	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03										
Asfalto efectivo (%)	6.05	5.54	5.04	4.53	4.02										
Densidad máxima teórica RICE (g/cm ³)	2.353	2.369	2.386	2.403	2.421										
Densidad (g/cm ³)	2.28	2.29	2.29	2.29	2.28	2.28	2.29	2.26	2.26	2.26	2.23	2.24	2.23		
Vacíos en el agregado mineral en la mezcla compactada (VMA) (%)	7	0	8	5	0	5	7	0	5	1	4	8	3	9	
Vacíos en el agregado mineral en la mezcla compactada (VMA) (%)	16.3	16.2	16.0	15.6	15.8	15.6	15.5	15.4	15.3	15.8	16.0	15.9	16.4	16.4	
Vacíos llenados con cemento asfáltico (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Vacíos llenados con cemento asfáltico (%)	90.2	90.8	92.7	87.9	86.4	87.8	79.8	80.3	81.0	70.9	70.1	70.7	60.6	61.4	60.8
Flujo (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Flujo (mm)	3.81	3.56	3.81	3.30	3.30	3.30	2.79	3.05	2.54	2.03	2.29	2.29	1.52	1.52	1.78
Estabilidad corregida (kg)	761	771	750	866	877	950	950	961	929	845	856	898	711	742	731
Relación estabilidad/flujo (kg/cm)	199	216	196	262	265	287	340	315	365	415	374	392	466	486	411
Relación estabilidad/flujo (kg/cm)	6	9	9	3	5	8	2	3	9	8	2	7	6	6	3



A partir de los datos obtenidos, fue posible confeccionar la Tabla 34, donde se presentan los valores promedio adquiridos en cada uno de los parámetros evaluados.

Tabla 34

Resumen de resultados de características de la MAC patrón.

Propiedad	Cemento asfáltico (%)				
	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
Densidad (g/cm ³)	2.240	2.263	2.287	2.293	2.292
Estabilidad (kg)	728	866	947	898	761
Vacíos de aire (%)	6.4	4.7	3.0	2.0	1.4
Vacíos llenos de cemento asfáltico (%)	60.9	70.6	80.4	87.4	91.2
Vacíos en el agregado mineral (%)	16.3	15.9	15.4	15.7	16.2
Flujo (mm)	1.61	2.20	2.79	3.30	3.73
Relación estabilidad/flujo (kg/cm)	4548	3942	3405	2719	2045

Teniendo este resumen de datos, fueron elaborados los gráficos de comparación del valor de cada parámetro en función del contenido de cemento asfáltico, lo que posteriormente sirvió para la determinación del contenido óptimo de asfalto en consideración tanto del desempeño de la mezcla como de los parámetros indicados por el Ministerios de Transportes y Comunicaciones en la EG-2013. Los gráficos de comparación se presentan a continuación:

Figura 16

Comparación de densidades según contenido de cemento asfáltico de la MAC patrón.

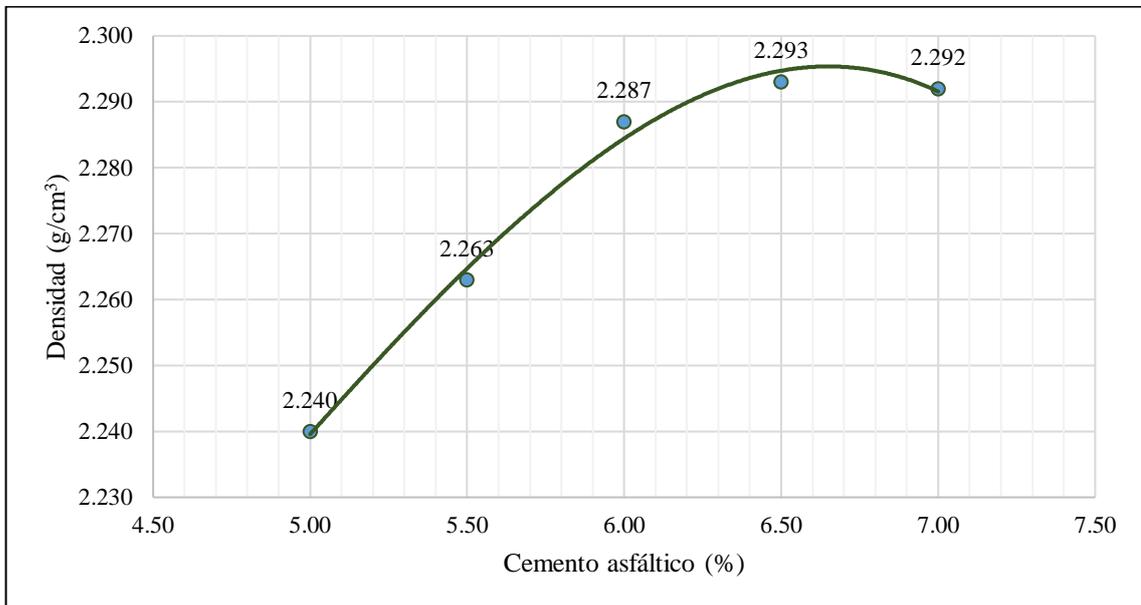


Figura 17

Comparación de estabilidad según contenido de cemento asfáltico de la MAC patrón.

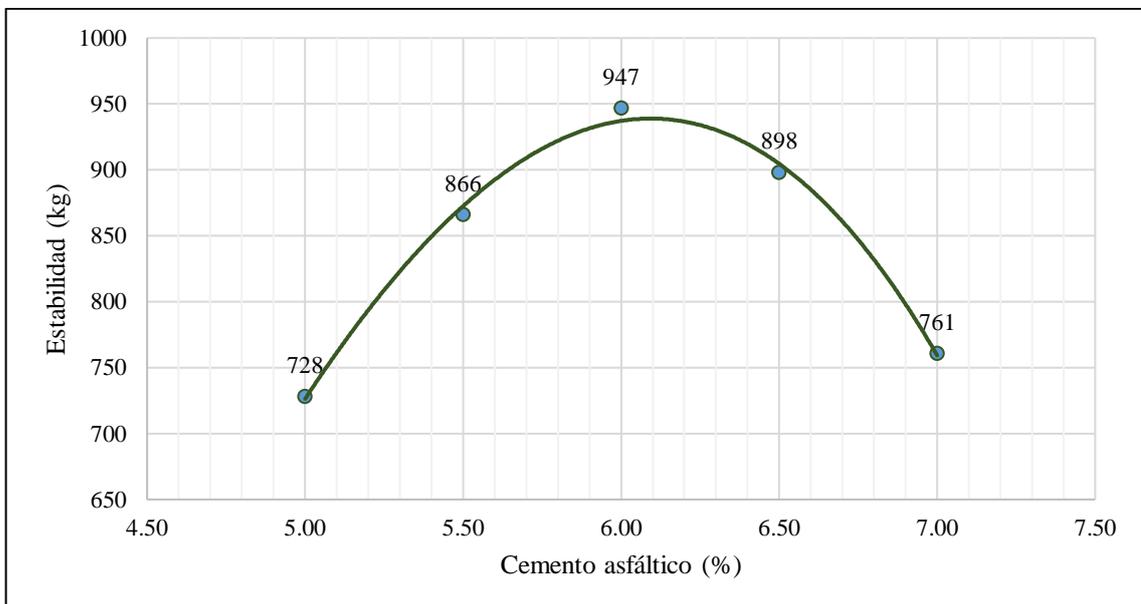


Figura 18

Comparación de vacíos de aire según contenido de cemento asfáltico de la MAC patrón.

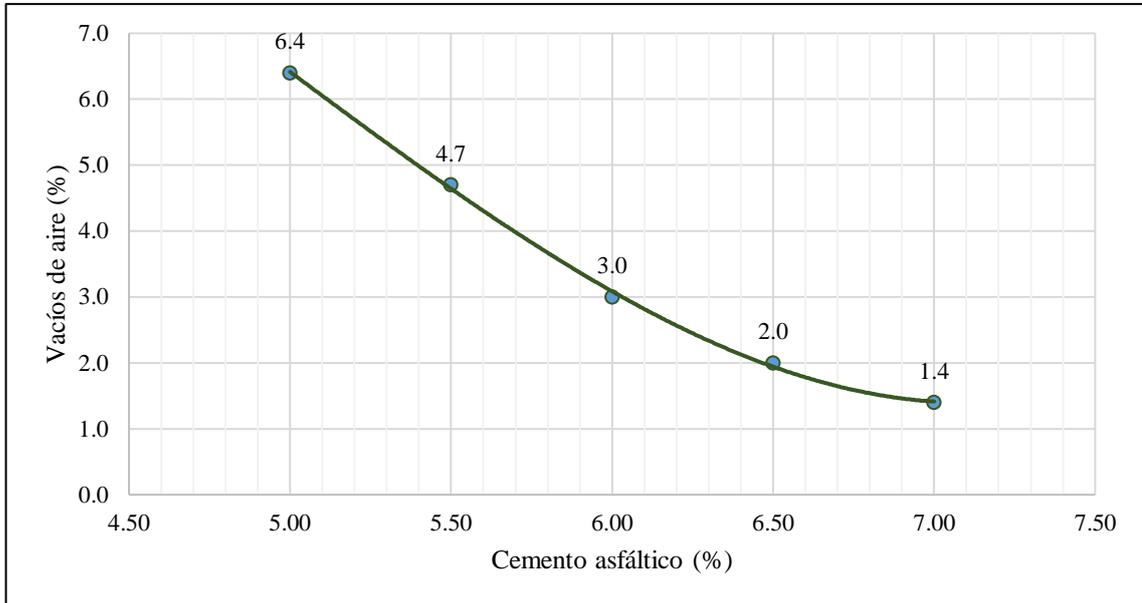


Figura 19

Comparación de vacíos llenos de asfalto según contenido de cemento asfáltico de la MAC patrón.

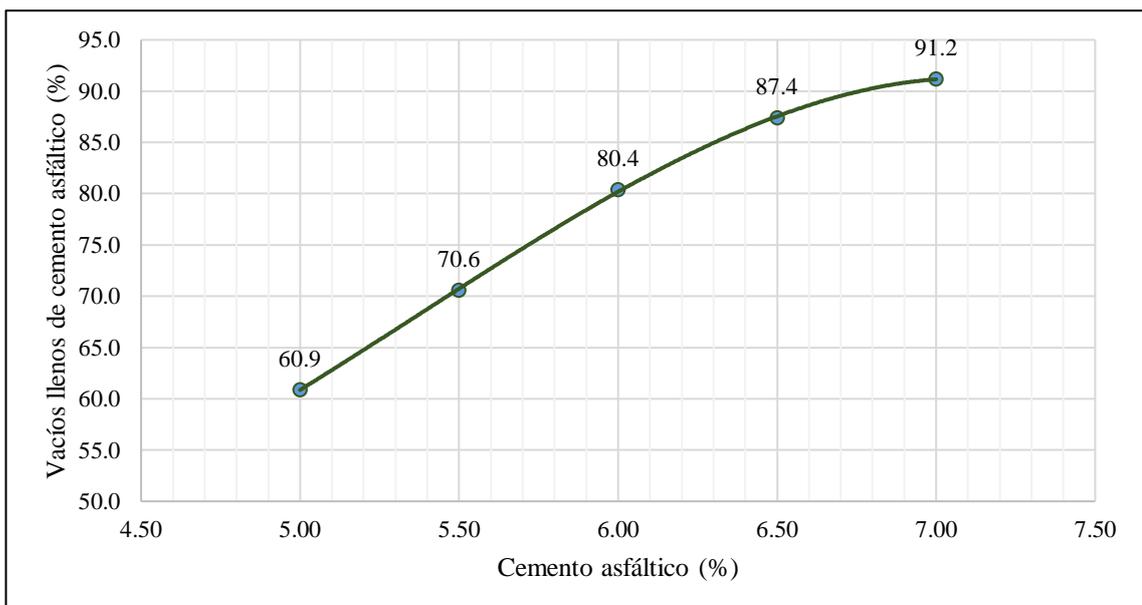


Figura 20

Comparación de vacíos en el agregado mineral según contenido de cemento asfáltico de la MAC patrón.

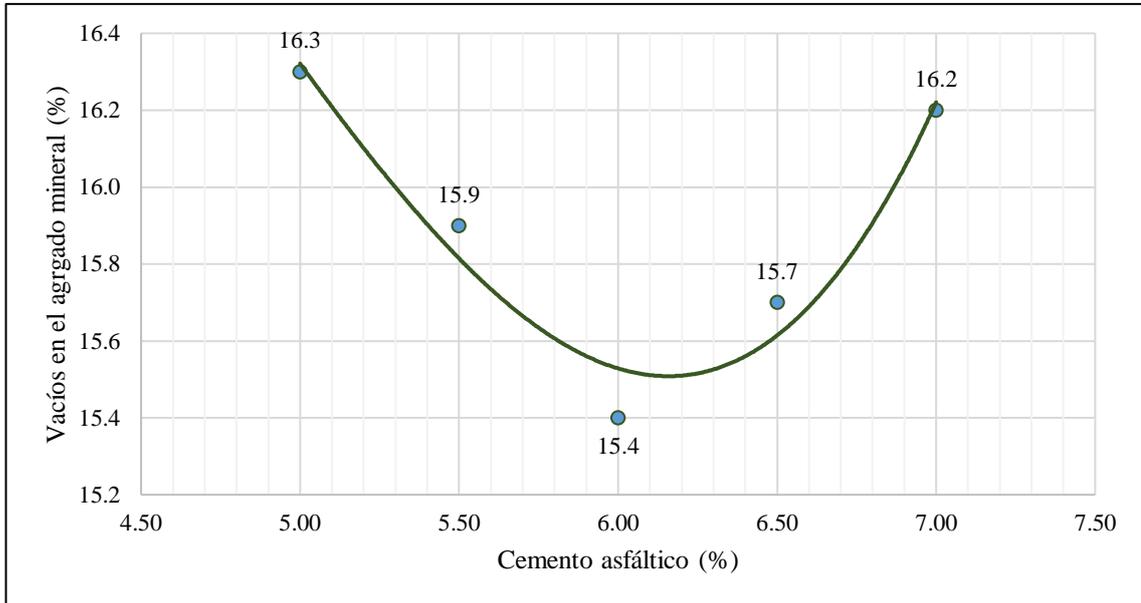


Figura 21

Comparación del flujo según contenido de cemento asfáltico de la MAC patrón.

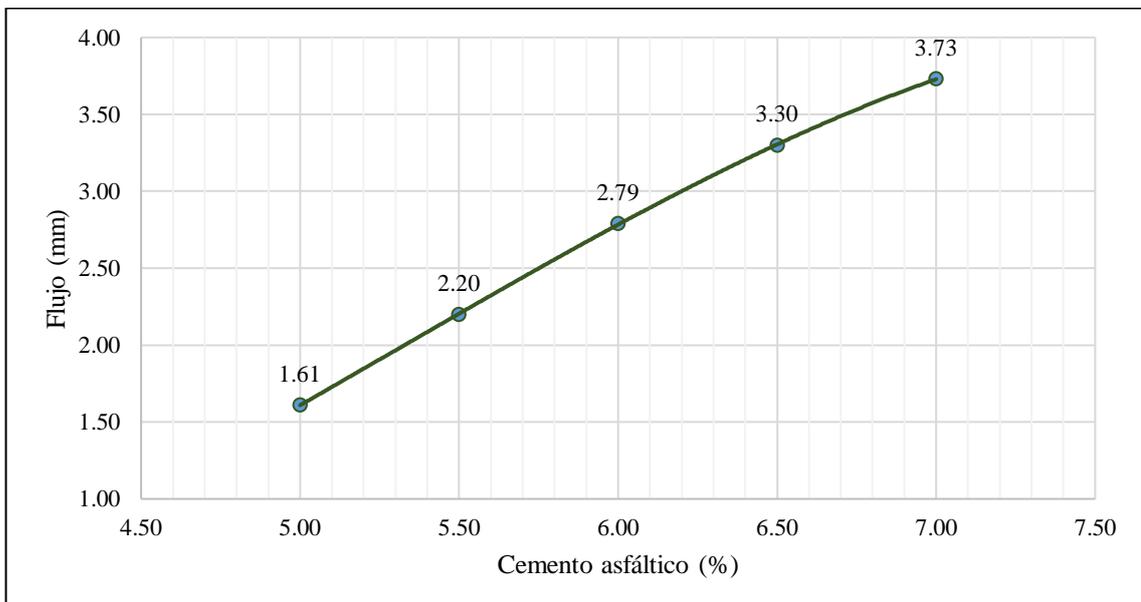
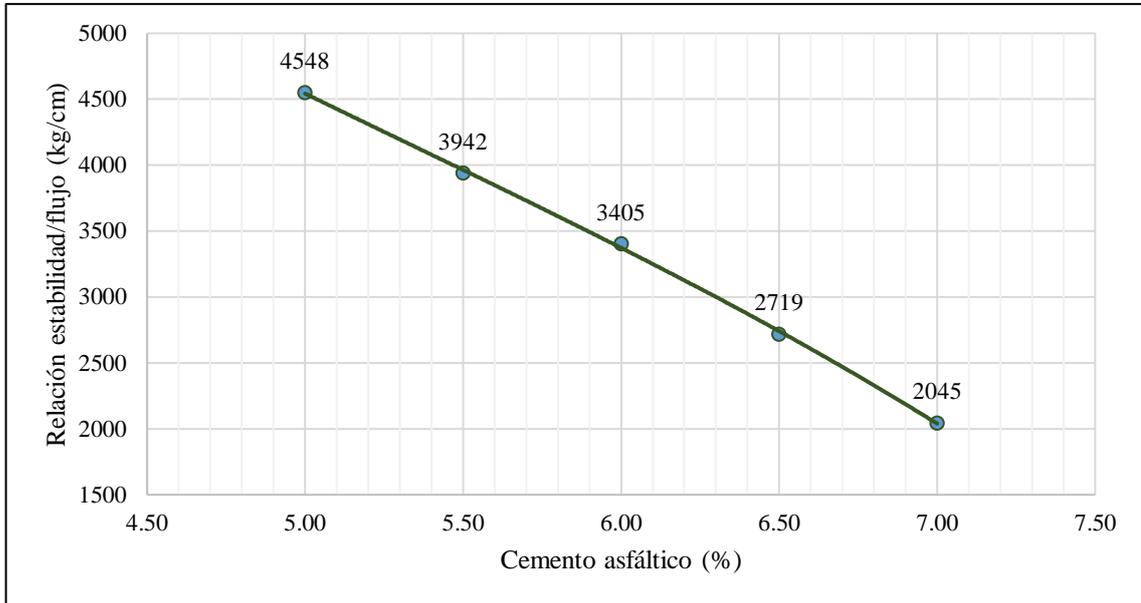


Figura 22

Comparación de la relación estabilidad/flujo según contenido de cemento asfáltico de la MAC patrón.



Así, pudo definirse el componente óptimo de cemento asfáltico para la elaboración de la mezcla asfáltica en caliente convencional en 5.68 %, con lo que fueron elaboradas nuevas muestras para la determinación de las características exigidas en el segmento 423 del Manual de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción del MTC (2013). Esto permitió la elaboración de llegar a los resultados expuestos en la Tabla 41.

Mezcla asfáltica en caliente con 10 % de concreto reciclado

Al igual que con la MAC patrón, también fue necesaria la identificación del contenido óptimo de cemento asfáltico. Esto bajo el entendido de que la variación del agregado grueso en la mezcla asfáltica puede conducir a la obtención de características distintas principalmente a las cualidades que el agregado reciclado aporta al agregado. En la siguiente página se presentan los resultados de



la caracterización de las MAC con 10 % de concreto reciclado para los contenidos de cemento asfáltico de 5.0 a 7.0 %.

Tabla 35

Análisis de las características para determinar del contenido del contenido óptimo de cemento asfáltico de la MAC con 10 % de concreto reciclado.

Propiedades	Contenido de cemento asfáltico				
	7.00%	6.50%	6.00%	5.50%	5.00%
Agregado grueso (%)	51.20	51.20	51.20	51.20	51.20
Agregado fino (%)	46.80	46.80	46.80	46.80	46.80
Filler de la mezcla (%)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Tamaño máximo del agregado (pulgada)	1	1	1	1	1
Agregado grueso en peso de la muestra (%)	47.62	47.87	48.13	48.38	48.64
Agregado fino en peso de la muestra (%)	43.52	43.76	43.99	44.23	44.46
Filler en peso de la muestra (%)	1.86	1.87	1.88	1.89	1.90
Peso específico máximo (g/cm ³)	2.30	2.32	2.34	2.35	2.38
Porcentaje de vacíos de aire (%)	1.00	0.90	1.30	2.00	2.00
Gravedad específica Bulk de la mezcla compactada (g/cm ³)	2.514	2.514	2.514	2.514	2.514
Peso específico aparente del agregado total (g/cm ³)	2.674	2.674	2.674	2.674	2.674
Peso específico efectivo del agregado total (g/cm ³)	2.594	2.594	2.594	2.594	2.594
Asfalto absorbido por el agregado (%)	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
Asfalto efectivo (%)	5.84	5.33	4.82	4.32	3.81
Densidad máxima teórica RICE (g/cm ³)	2.341	2.358	2.374	2.391	2.408
Densidad (g/cm ³)	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27
Vacíos en el agregado mineral en la mezcla compactada (VMA) (%)	15.9	15.9	16.2	15.5	15.5
Vacíos llenados con cemento asfáltico (%)	93.8	94.2	91.9	86.9	87.2
Flujo (mm)	4.06	4.06	3.81	3.81	3.81
Estabilidad corregida (kg)	950	824	813	105	111
Relación estabilidad/flujo (kg/cm)	233	202	213	277	293
	9	7	5	1	7
	7	5	1	7	6
	6	7	6	7	6
	1	6	1	6	0
	6	0	5	7	7

Seguidamente, la Tabla 36 presenta el resumen de la tabla presentada anteriormente, indicando los promedios obtenidos por las principales propiedades de la MAC con 10 % de concreto reciclado.

Tabla 36

Resumen de resultados de características de la MAC con 10 % de concreto reciclado.

Propiedad	Cemento asfáltico (%)				
	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
Densidad (g/cm ³)	2.215	2.241	2.268	2.273	2.271
Estabilidad (kg)	860	1073	1168	1084	863
Vacíos de aire (%)	6.7	4.8	3.0	1.9	1.1
Vacíos llenos de cemento asfáltico (%)	58.7	69.7	80.5	87.5	93.3
Vacíos en el agregado mineral (%)	16.3	15.8	15.2	15.5	16.0
Flujo (mm)	1.86	2.54	3.30	3.81	3.98
Relación estabilidad/flujo (kg/cm)	4626	4241	3538	2845	2167

Esto permitió la elaboración de gráficos de comparación, considerando el valor promedio obtenido en cada parámetro en función del porcentaje de cemento asfáltico con el que fue constituida cada muestra. Estos resultados se presentan en las figuras adjuntas a continuación:

Figura 23

Comparación de densidades según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 10 % de concreto reciclado.

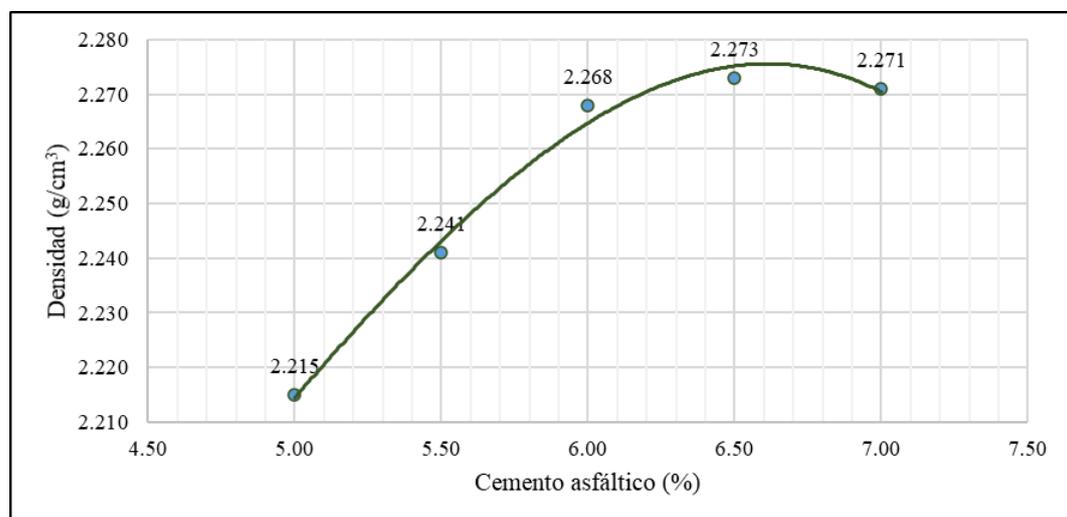


Figura 24

Comparación de estabilidad según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 10 % de concreto reciclado.

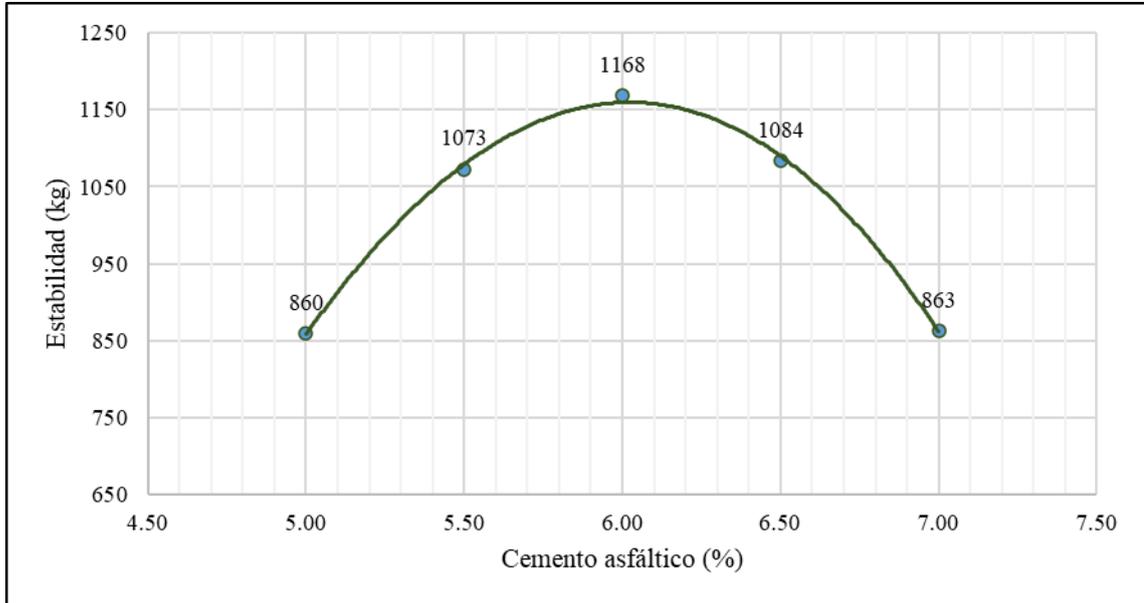


Figura 25

Comparación de vacíos de aire según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 10 % de concreto reciclado.

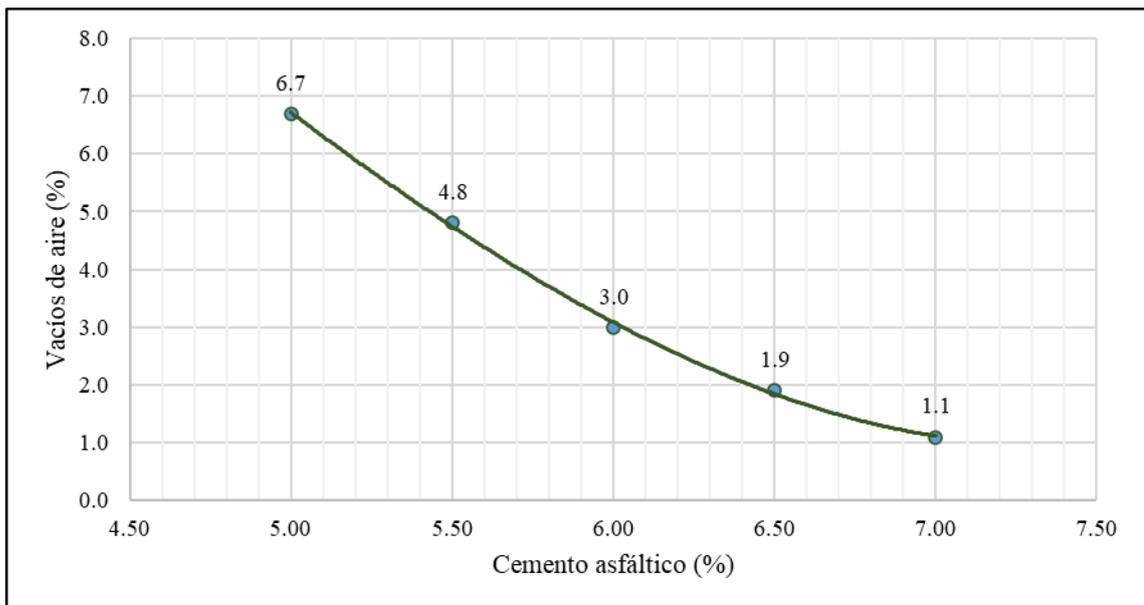


Figura 26

Comparación de vacíos llenos de asfalto según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 10 % de concreto reciclado.

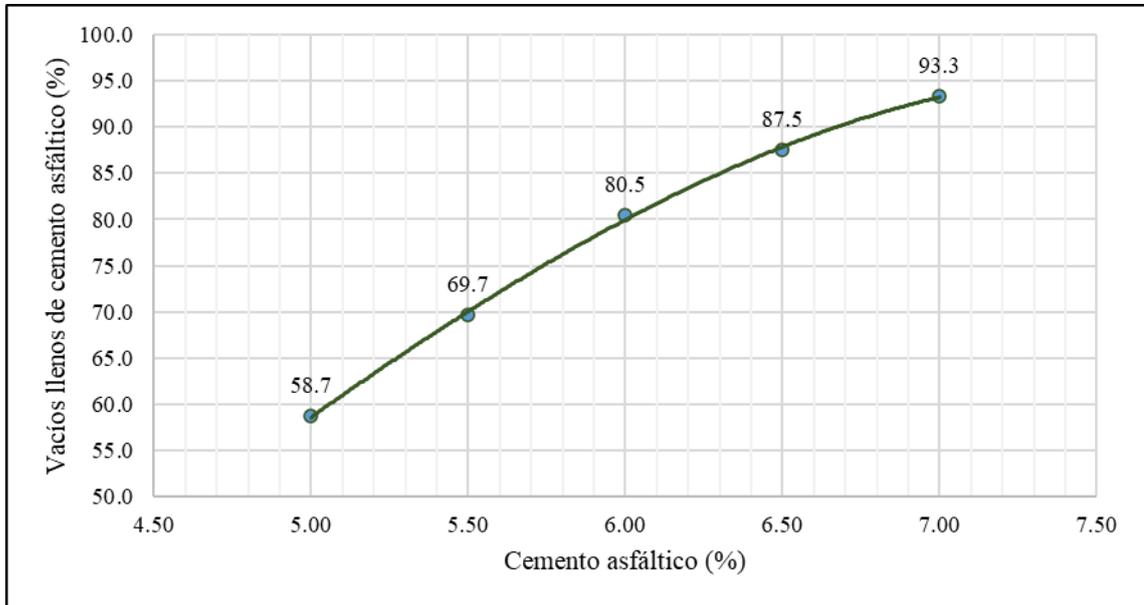


Figura 27

Comparación de vacíos en el agregado mineral según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 10 % de concreto reciclado.

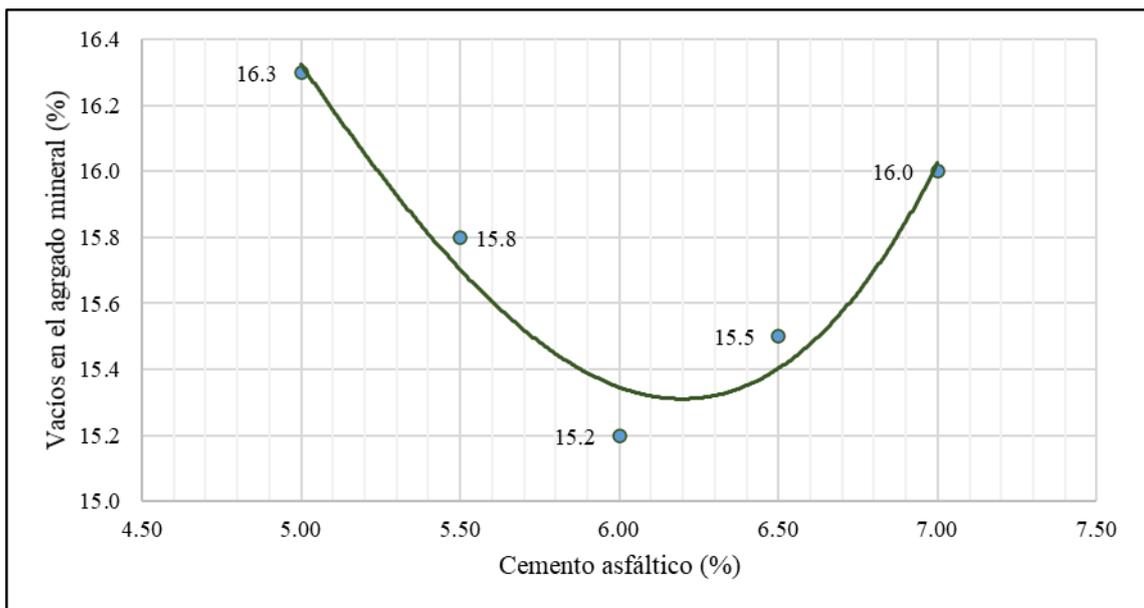


Figura 28

Comparación del flujo según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 10 % de concreto reciclado.

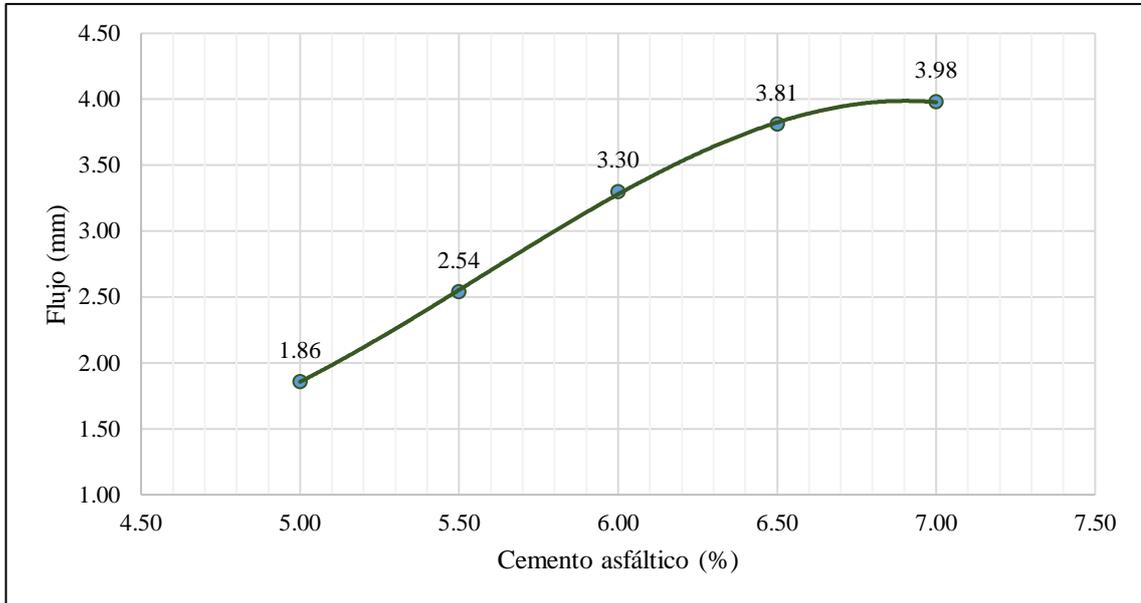
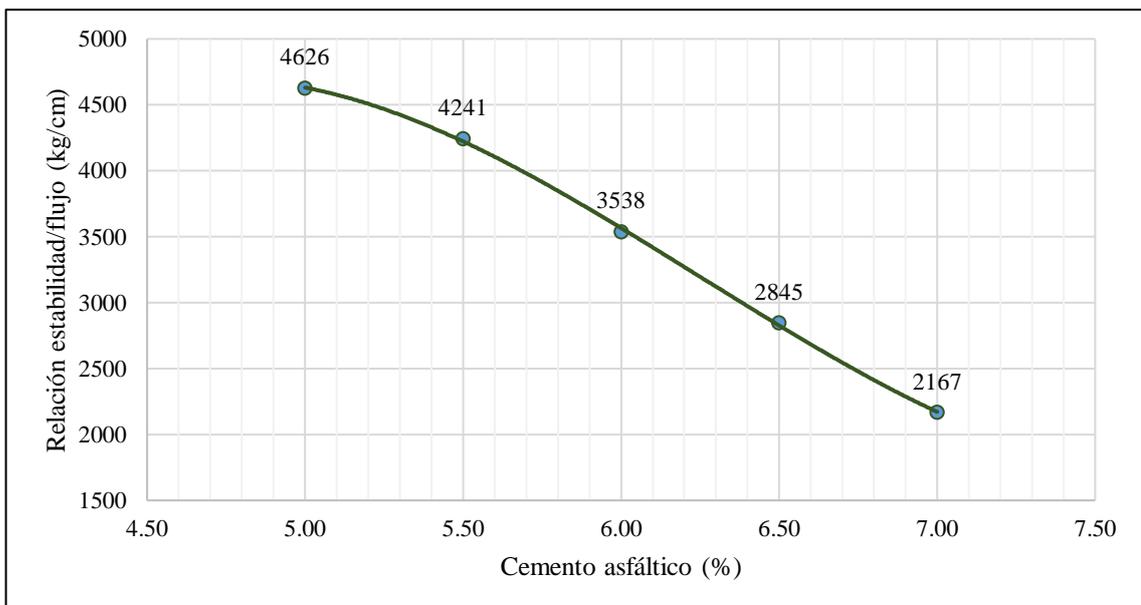


Figura 29

Comparación de la relación estabilidad/flujo según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 10 % de concreto reciclado.



Tal como fue previsto y en concordancia con lo explicado anteriormente, para este caso el valor del contenido óptimo de asfalto varía con respecto a lo



obtenido para la MAC sin la adición del material reciclado, llegando a ser de un 5.71 %. En otras palabras, se dio un aumento en el valor necesario de asfalto.

Mezcla asfáltica en caliente con 20 % de concreto reciclado

En línea con lo desarrollado previamente, también se hizo el análisis por medio de ensayos de laboratorio a muestras de MAC con la inclusión de un 20 % de partículas de concreto reciclado en sustitución del agregado grueso. Esto con el objetivo de determinar las relaciones de la mezcla asfáltica debido a la adición de un material alternativo en su composición, con lo que se podrá determinar el contenido óptimo de asfalto para posteriormente evaluar estas muestras y compararlas con otras MAC.

Por ello, en la siguiente página de la presente tesis se dispone la Tabla 37, con los resultados adquiridos para cada criterio analizado de las muestras con 5.0, 5.5, 6.0, 6.5 y 7.0 % de cemento asfáltico.

Tabla 37

Análisis de las características para la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico de la MAC con 20 % de concreto reciclado.

Propiedades	Contenido de cemento asfáltico													
	7.00%	6.50%	6.00%	5.50%	5.00%									
Agregado grueso (%)	49.80	49.80	49.80	49.80	49.80									
Agregado fino (%)	48.20	48.20	48.20	48.20	48.20									
Filler de la mezcla (%)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00									
Tamaño máximo del agregado (pulgada)	1	1	1	1	1									
Agregado grueso en peso de la muestra (%)	46.31	46.56	46.81	47.06	47.31									
Agregado fino en peso de la muestra (%)	44.83	45.07	45.31	45.55	45.79									
Filler en peso de la muestra (%)	1.86	1.87	1.88	1.89	1.90									
Peso específico máximo (g/cm ³)	2.28	2.30	2.32	2.38	2.36									
Porcentaje de vacíos de aire (%)	1.50	1.40	1.70	2.10	3.10	4.90	6.50	6.60	6.90					
Gravedad específica Bulk de la mezcla compactada (g/cm ³)	2.490	2.490	2.490	2.490	2.490									
Peso específico aparente del agregado total (g/cm ³)	2.657	2.657	2.657	2.657	2.657									
Peso específico efectivo del agregado total (g/cm ³)	2.574	2.574	2.574	2.574	2.574									
Asfalto absorbido por el agregado (%)	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34									
Asfalto efectivo (%)	5.76	5.25	4.74	4.24	3.73									
Densidad máxima teórica RICE (g/cm ³)	2.326	2.342	2.358	2.375	2.392									
Densidad (g/cm ³)	2.24	2.24	2.23	2.24	2.22	2.22	2.20	2.20	2.19					
Vacíos en el agregado mineral en la mezcla compactada (VMA) (%)	3	7	9	7	6	8	7	6	5	4	6			
Vacíos llenados con cemento asfáltico (%)	16.2	16.1	16.4	15.6	15.7	15.1	15.5	15.2	15.5	15.7	15.6	15.9	15.9	16.2
Flujo (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Estabilidad corregida (kg)	90.5	91.3	89.5	86.5	88.2	86.4	79.8	77.5	79.4	68.6	67.9	68.5	58.9	57.5
Relación estabilidad/flujo (kg/cm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3.56	3.81	3.81	3.30	3.56	3.30	3.05	2.79	3.30	2.54	2.79	2.79	2.03	2.03
	954	1035	924	1015	1045	995	1106	1127	1167	1086	1157	1117	995	1025
	2684	2716	2425	3075	2939	3013	3630	4033	3535	4276	4141	3996	4896	4647

Tal como se hizo previamente, se adjunta la Tabla 38, con los promedios de las principales propiedades de la MAC con 20 % de concreto reciclado.

Tabla 38

Resumen de resultados de características de la MAC con 20 % de concreto reciclado.

Propiedad	Cemento asfáltico (%)				
	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
Densidad (g/cm ³)	2.202	2.224	2.244	2.249	2.243
Estabilidad (kg)	988	1120	1133	1018	971
Vacíos de aire (%)	6.7	4.9	3.2	2.0	1.6
Vacíos llenos de cemento asfáltico (%)	58.4	68.3	78.9	87.0	90.4
Vacíos en el agregado mineral (%)	16.0	15.6	15.3	15.6	16.2
Flujo (mm)	2.12	2.71	3.05	3.39	3.73
Relación estabilidad/flujo (kg/cm)	4676	4138	3733	3009	2608

Asimismo, se exhiben los gráficos de comparación de los valores de cada parámetro evaluado en laboratorio en función de los valores de cemento asfáltico, a partir de los cuales pudo definirse el valor de cemento asfáltico óptimo para esta MAC.

Figura 30

Comparación de densidades según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 20 % de concreto reciclado.

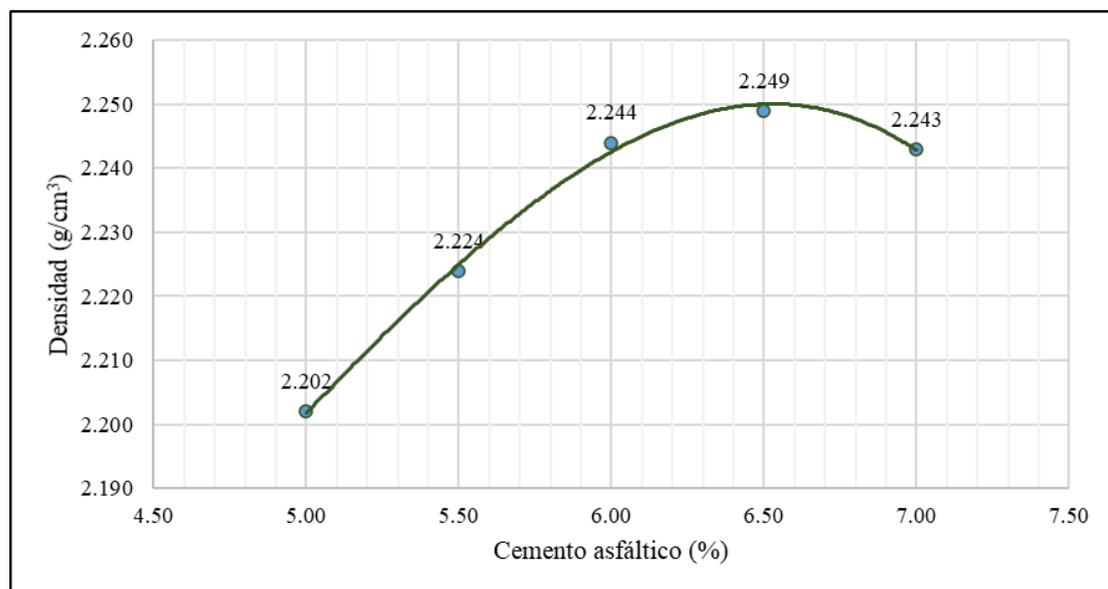


Figura 31

Comparación de estabilidad según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 20 % de concreto reciclado.

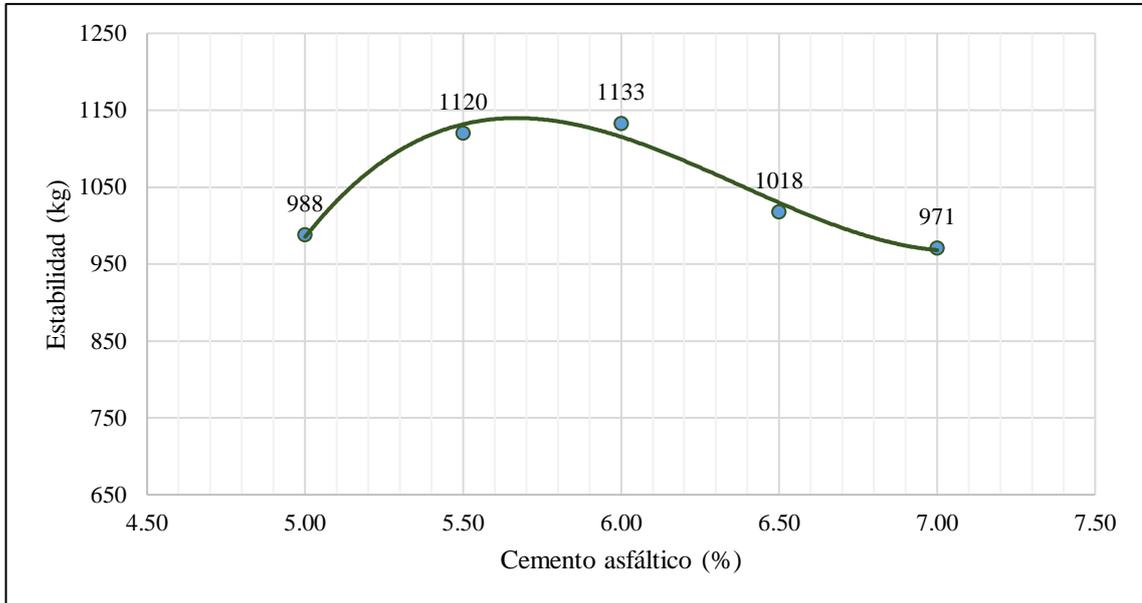


Figura 32

Comparación de vacíos de aire según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 20 % de concreto reciclado.

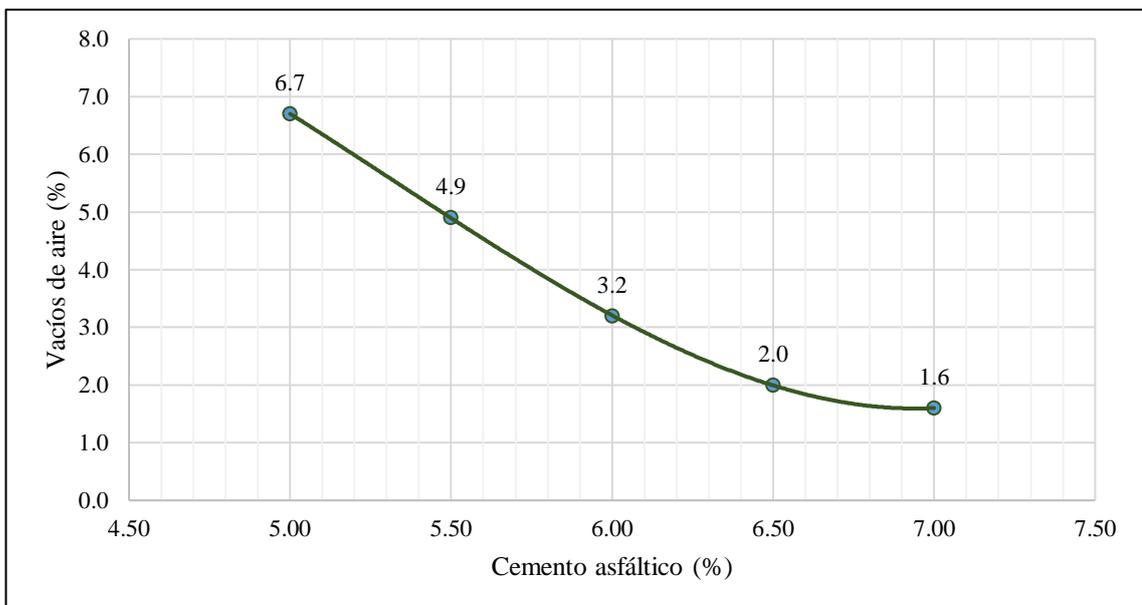


Figura 33

Comparación de vacíos llenos de asfalto según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 20 % de concreto reciclado.

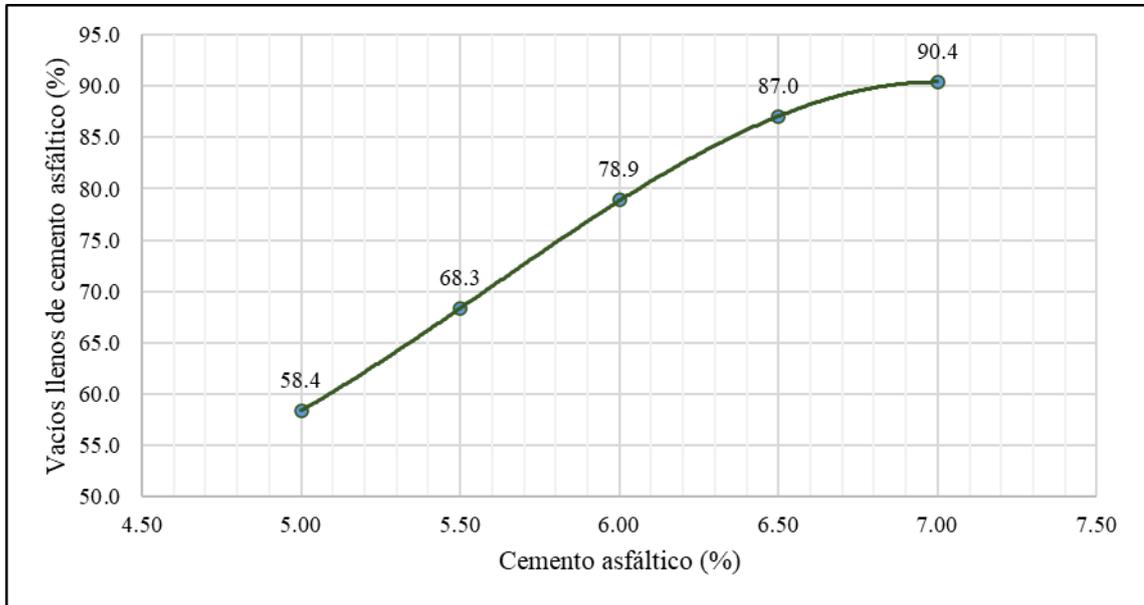


Figura 34

Comparación de vacíos en el agregado mineral según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 20 % de concreto reciclado.

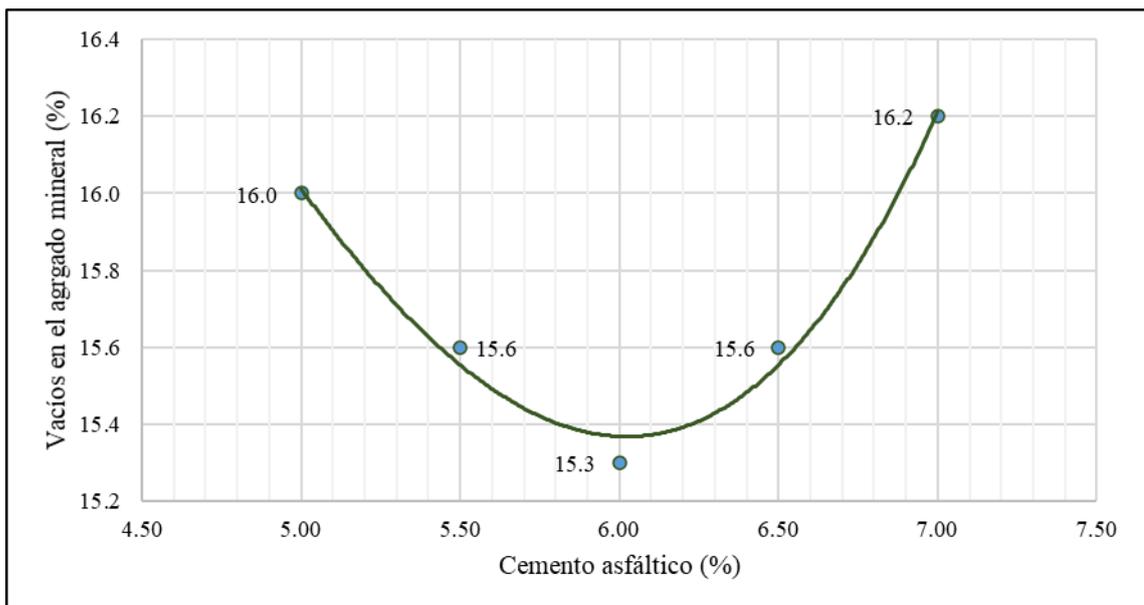


Figura 35

Comparación del flujo según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 20 % de concreto reciclado.

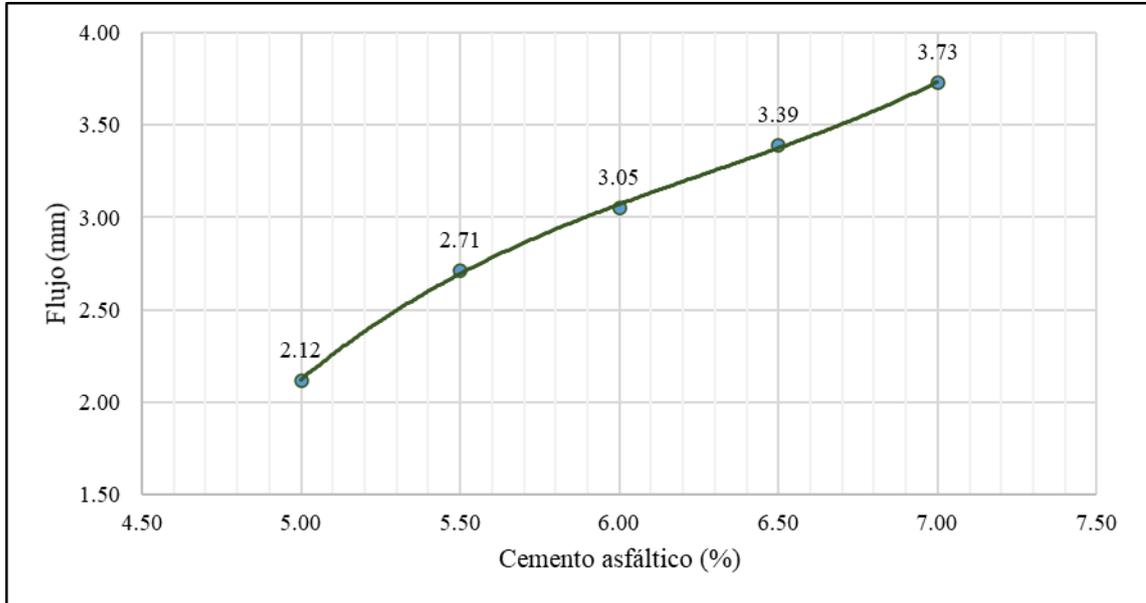
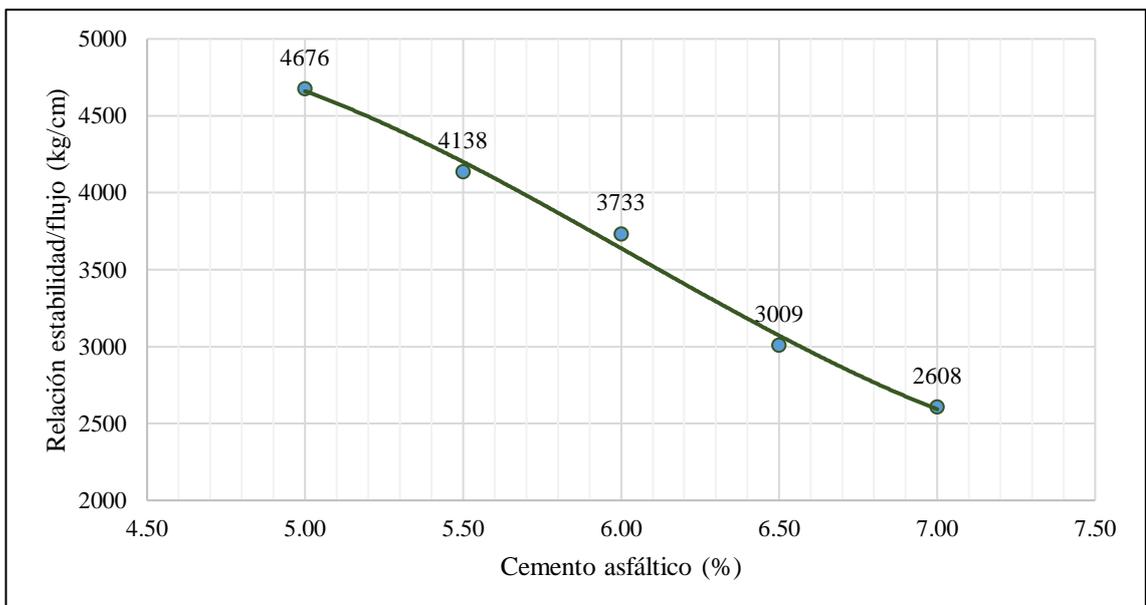


Figura 36

Comparación de la relación estabilidad/flujo según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 20 % de concreto reciclado.





Una vez analizados los resultados de la MAC con 20 % de concreto reciclado a nivel de laboratorio, fue determinado que su valor de cemento asfáltico óptimo es igual a 5.76 %, dado que permite la obtención de una mezcla asfáltica en caliente de una calidad conforme a las exigencias del segmento 423 del Manual de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción del MTC (2013).

Mezcla asfáltica en caliente con 30 % de concreto reciclado

Por último, la Tabla 39 contiene los resultados de las pruebas en escala de laboratorio realizados con el fin de determinar las propiedades y el óptimo contenido de cemento asfáltico para la MAC con la sustitución del 30 % de agregado grueso por concreto reciclado.

Tabla 39

Análisis de las características para la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico de la MAC con 30 % de concreto reciclado.

Propiedades	Contenido de cemento asfáltico				
	7.00%	6.50%	6.00%	5.50%	5.00%
Agregado grueso (%)	49.20	49.20	49.20	49.20	49.20
Agregado fino (%)	48.80	48.80	48.80	48.80	48.80
Filler de la mezcla (%)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Tamaño máximo del agregado (pulgada)	1	1	1	1	1
Agregado grueso en peso de la muestra (%)	45.76	46.00	46.25	46.49	46.74
Agregado fino en peso de la muestra (%)	45.38	45.63	45.87	46.12	46.36
Filler en peso de la muestra (%)	1.86	1.87	1.88	1.89	1.90
Peso específico máximo (g/cm ³)	2.23	2.26	2.28	2.31	2.33
Porcentaje de vacíos de aire (%)	1.60	1.60	2.20	2.90	3.40
Gravedad específica Bulk de la mezcla compactada (g/cm ³)	2.473	2.473	2.473	2.473	2.473
Peso específico aparente del agregado total (g/cm ³)	2.647	2.647	2.647	2.647	2.647
Peso específico efectivo del agregado total (g/cm ³)	2.560	2.560	2.560	2.560	2.560
Asfalto absorbido por el agregado (%)	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41
Asfalto efectivo (%)	5.69	5.18	4.68	4.17	3.66
Densidad máxima teórica RICE (g/cm ³)	2.316	2.332	2.348	2.364	2.381
Densidad (g/cm ³)	2.198	2.198	2.208	2.206	2.186
Vacíos en el agregado mineral en la mezcla compactada (VMA) (%)	17.40	17.30	16.50	16.10	16.10
Vacíos llenados con cemento asfáltico (%)	90.50	91.60	90.60	87.60	81.60
Flujo (mm)	3.05	3.30	3.30	3.05	2.79
Estabilidad corregida (kg)	731	833	802	985	1086
Estabilidad/flujo (kg/cm)	2399	2522	2430	3231	3289
				3364	4141
				3730	4871
				4254	4715
				5131	5072
				5072	4892

Con ello, se muestra la Tabla 40, con el resumen de resultados considerando tan solo los promedios de las principales propiedades de la MAC con 30 % de concreto reciclado en función de los análisis de laboratorio.

Tabla 40

Resumen de resultados de características de la MAC con 30 % de concreto reciclado.

Propiedad	Cemento asfáltico (%)				
	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
Densidad (g/cm ³)	2.173	2.189	2.211	2.208	2.199
Estabilidad (kg)	1065	1208	1161	1032	789
Vacíos de aire (%)	6.6	5.2	3.2	2.2	1.6
Vacíos llenos de cemento asfáltico (%)	60.0	68.4	79.8	86.8	90.9
Vacíos en el agregado mineral (%)	16.5	16.4	16.0	16.5	17.3
Flujo (mm)	2.12	2.62	2.88	3.13	3.22
Relación estabilidad/flujo (kg/cm)	5032	4613	4040	3295	2450

Con esta tabla, fue posible confeccionar cada uno de los gráficos de comparación presentados a continuación:

Figura 37

Comparación de densidades según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 30 % de concreto reciclado.

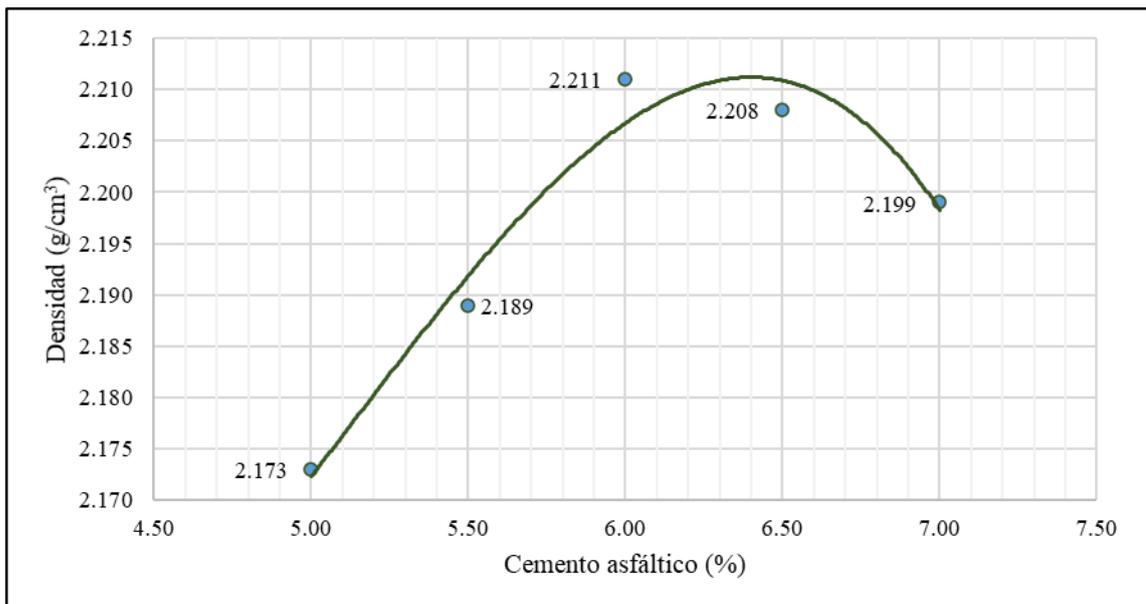


Figura 38

Comparación de estabilidad según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 30 % de concreto reciclado.

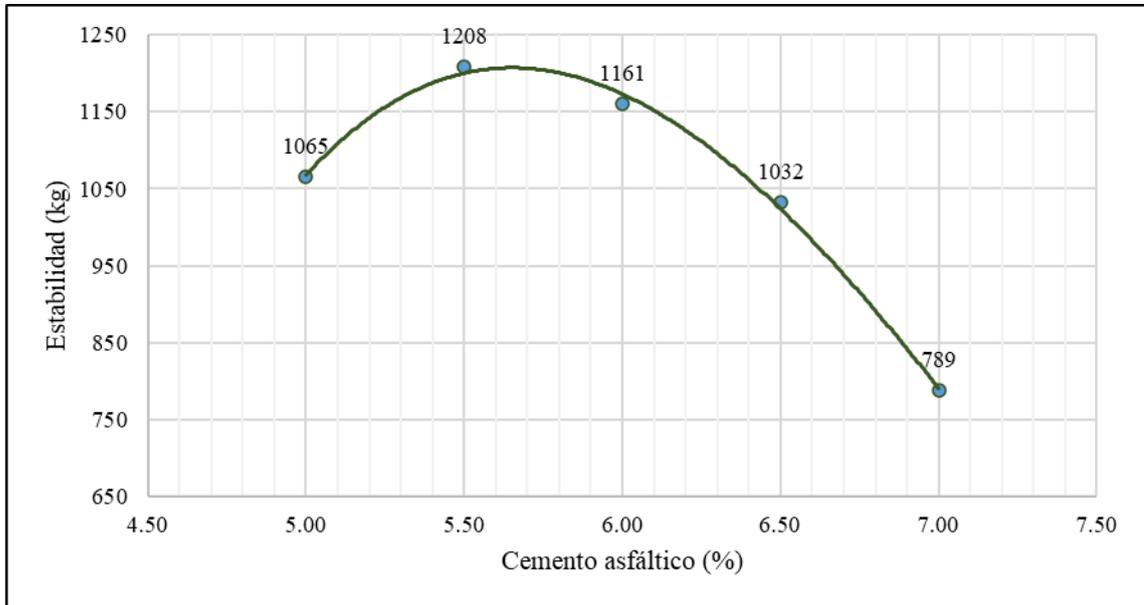


Figura 39

Comparación de vacíos de aire según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 30 % de concreto reciclado.

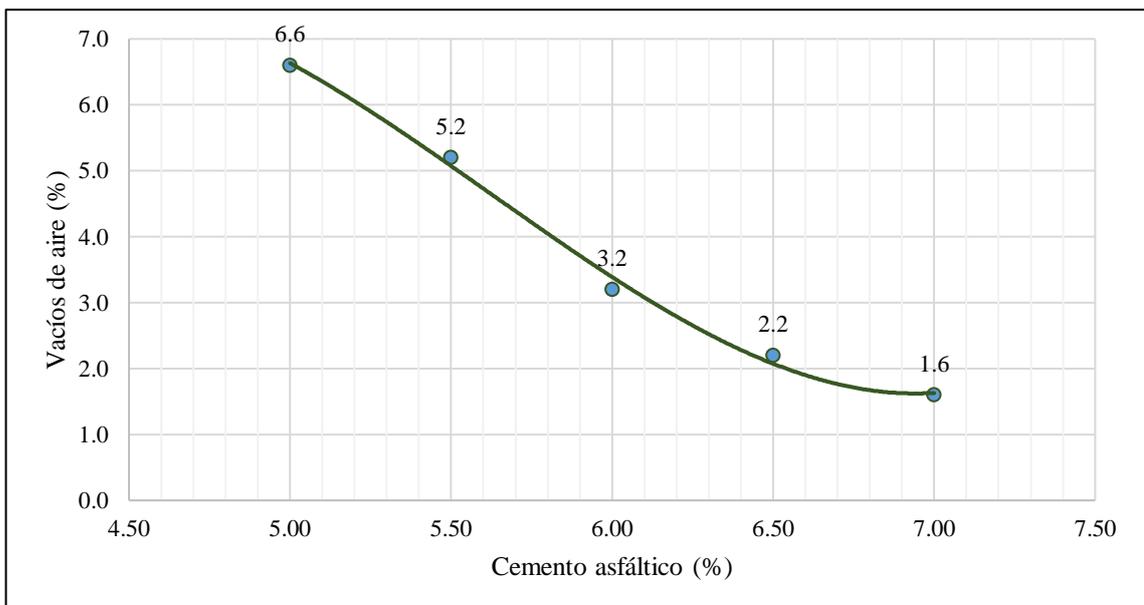


Figura 40

Comparación de vacíos llenos de asfalto según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 30 % de concreto reciclado.

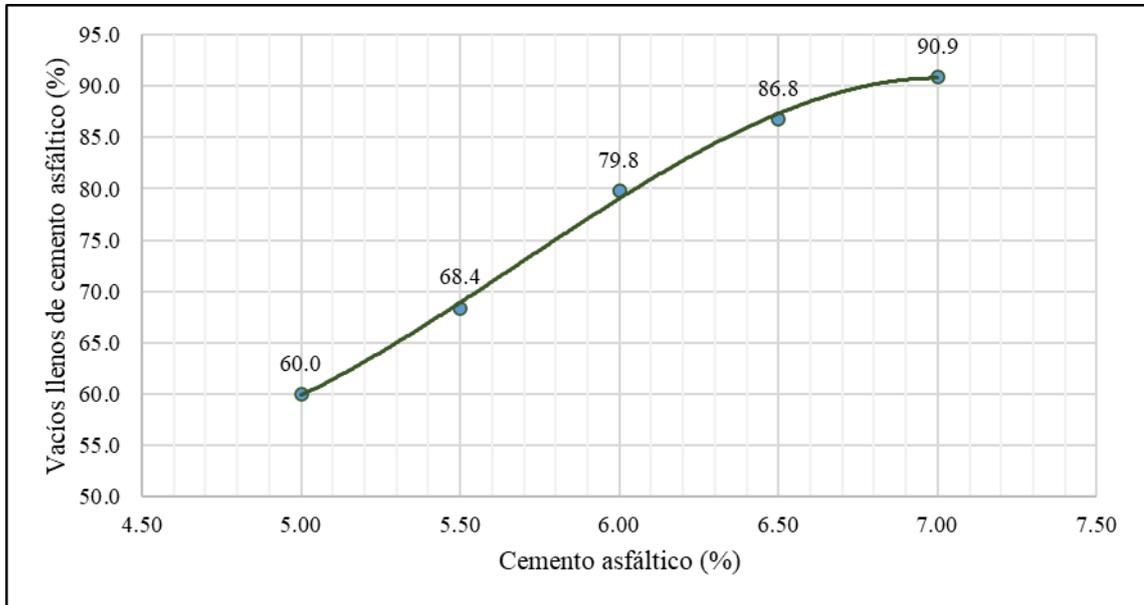


Figura 41

Comparación de vacíos en el agregado mineral según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 30 % de concreto reciclado.

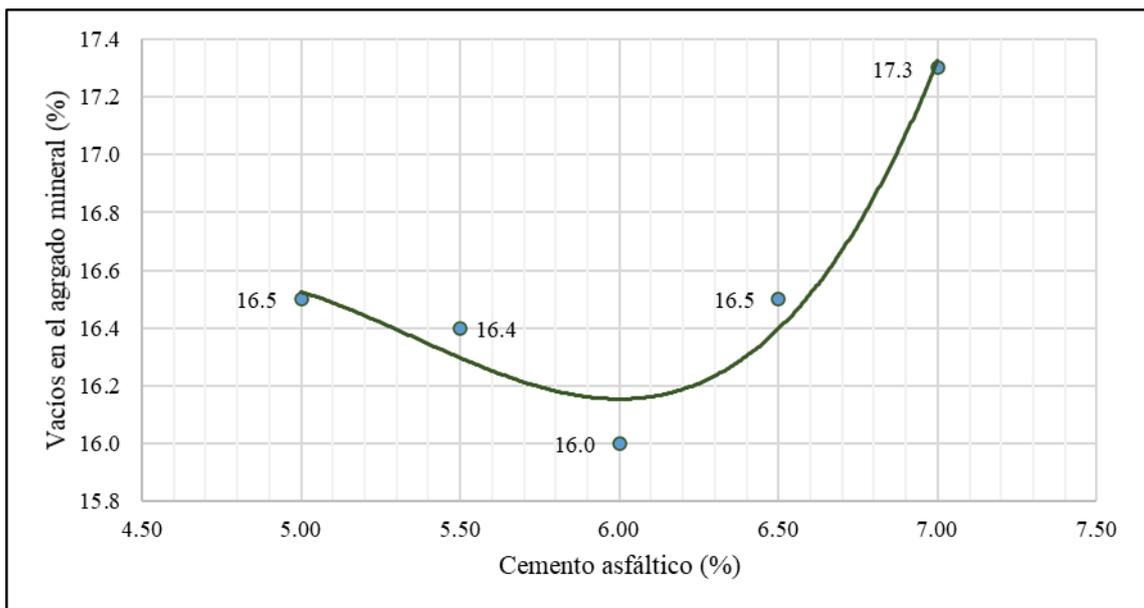


Figura 42

Comparación del flujo según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 30 % de concreto reciclado.

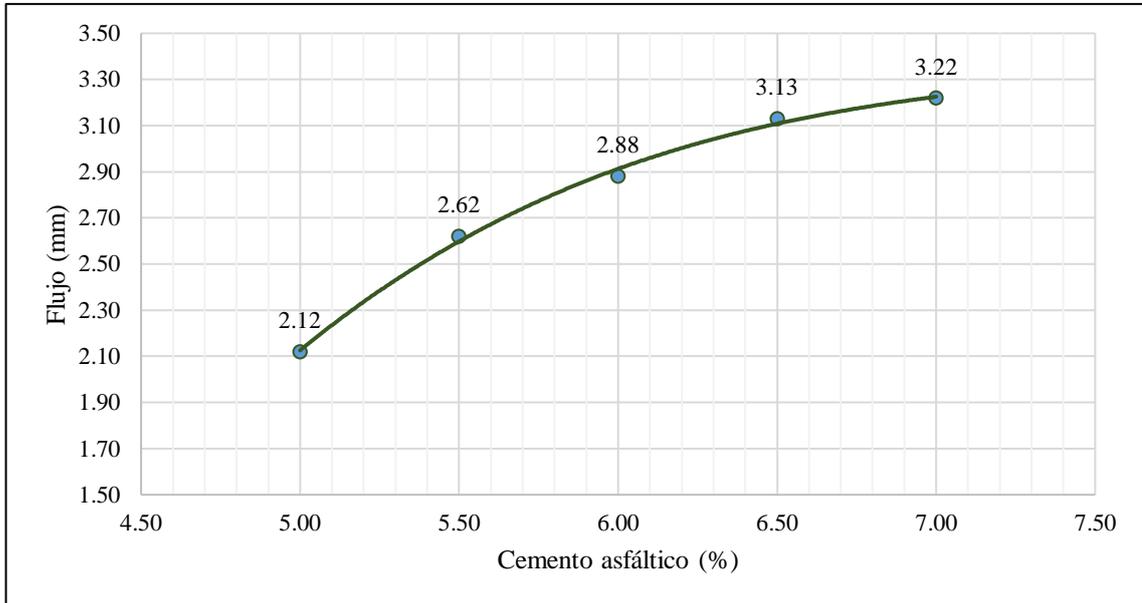
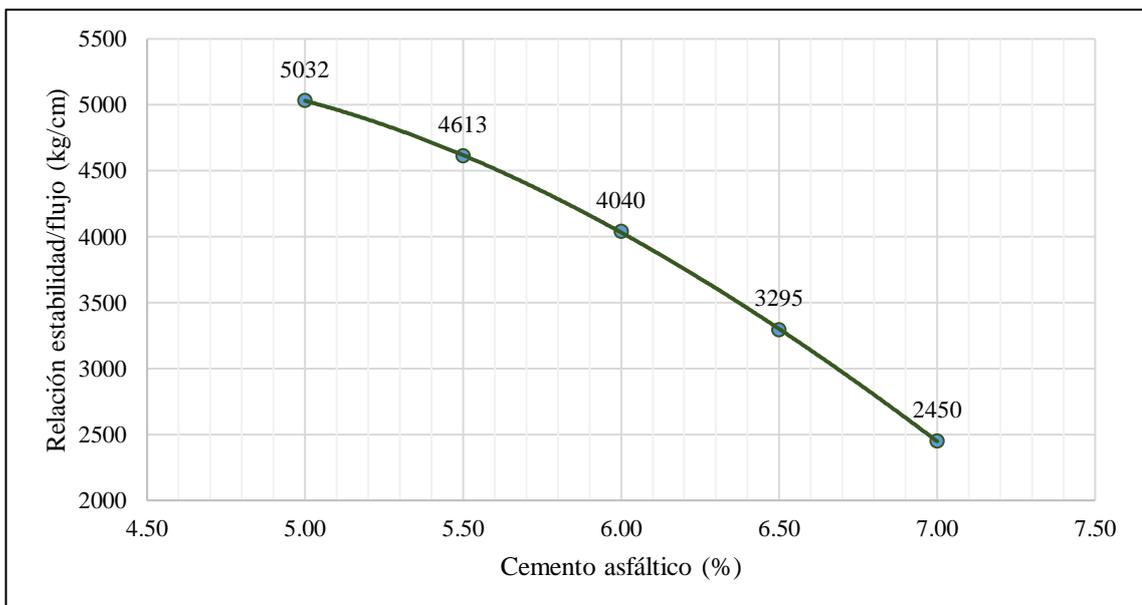


Figura 43

Comparación de la relación estabilidad/flujo según contenido de cemento asfáltico de la MAC con 30 % de concreto reciclado.





Es así como para la MAC con 30 % de concreto reciclado fue determinado que le contenido óptimo de cemento asfáltico sería igual a 5.80 %, siendo el mayor valor para las cuatro mezclas analizadas en la presente investigación.

4.2.2. Características de las mezclas asfálticas en caliente óptimas

Habiendo determinado el valor de cemento asfáltico óptimo para cada una de las MAC evaluadas en la presente investigación, se desarrollaron las muestras respectivas en el laboratorio y realizaron los ensayos con el fin de comparar cada una de sus propiedades tanto entre sí como con los requerimientos del Manual de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción del MTC (2013).

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos realizados a nivel de laboratorio:

Tabla 41

Características de las MAC elaboradas con los contenidos óptimos de cemento asfáltico.

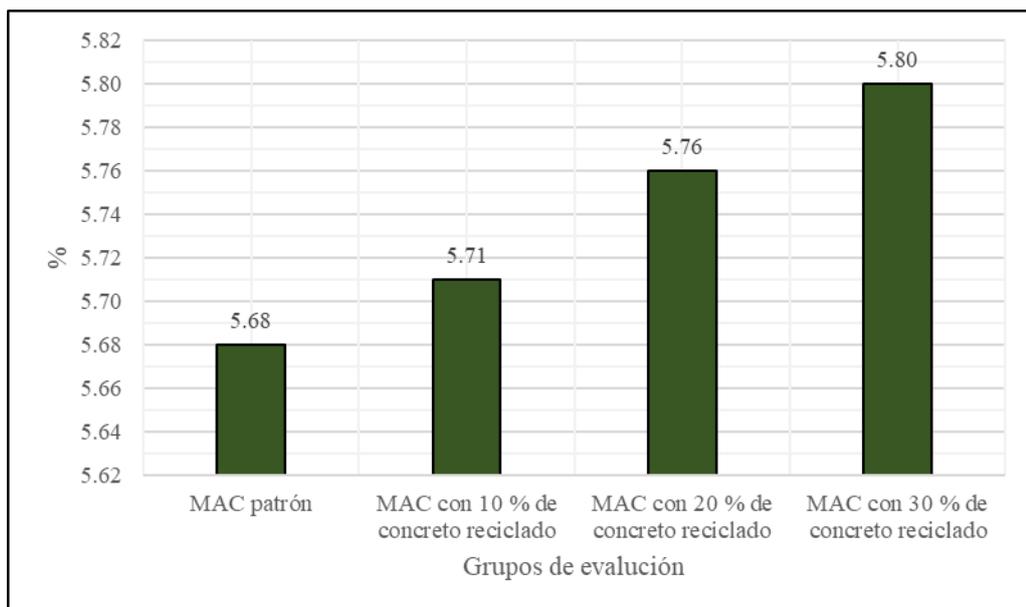
Propiedad	MAC patrón	MAC con 10 % de concreto reciclado	MAC con 20 % de concreto reciclado	MAC con 30 % de concreto reciclado
Cemento asfáltico	5.68	5.71	5.76	5.80
Densidad (g/cm ³)	2.27	2.26	2.24	2.20
Estabilidad (kg)	906.00	1130.00	1141.00	1201.00
Vacíos de aire (%)	4.00	4.00	4.00	4.00
Vacíos llenos de cemento asfáltico (%)	74.20	74.50	73.90	75.10
Vacíos en el agregado mineral en la mezcla compactada (%)	15.70	15.50	15.40	16.10
Flujo (mm)	2.40	2.90	2.90	2.80
Relación estabilidad/flujo (kg/cm)	3730.00	3850.00	3885.00	4145.00
Índice de compactabilidad (%)	8.30	6.20	6.80	7.20
Resistencia a la compresión de muestra seca (kg/cm ²)	46.80	49.90	50.80	50.40
Resistencia a la compresión de muestra húmeda (kg/cm ²)	42.40	41.00	47.70	45.20
Resistencia retenida a la compresión (%)	84.91	90.98	79.18	71.16
Resistencia a la tracción indirecta de muestra seca (kg/cm ²)	6.90	7.20	6.80	7.10
Resistencia a la tracción indirecta de muestra húmeda (kg/cm ²)	6.20	5.80	6.00	6.30
Resistencia conservada a tracción indirecta (%)	86.12	84.13	81.90	73.21

A partir de estos resultados, fueron elaborados gráficos con el fin de visualizar de mejor manera las características del comportamiento de cada una de las MAC analizadas.

En primera instancia, la Figura 44 contiene los valores del contenido de cemento asfáltico con el que fueron elaboradas las mezclas que fueron comparadas. Cabe hacer hincapié en que estos valores fueron determinados a partir de los ensayos de laboratorio realizados con anterioridad.

Figura 44

Contenido óptimo de cemento asfáltico de los diferentes tipos de MAC.



Relación de estabilidad y flujo de las MAC

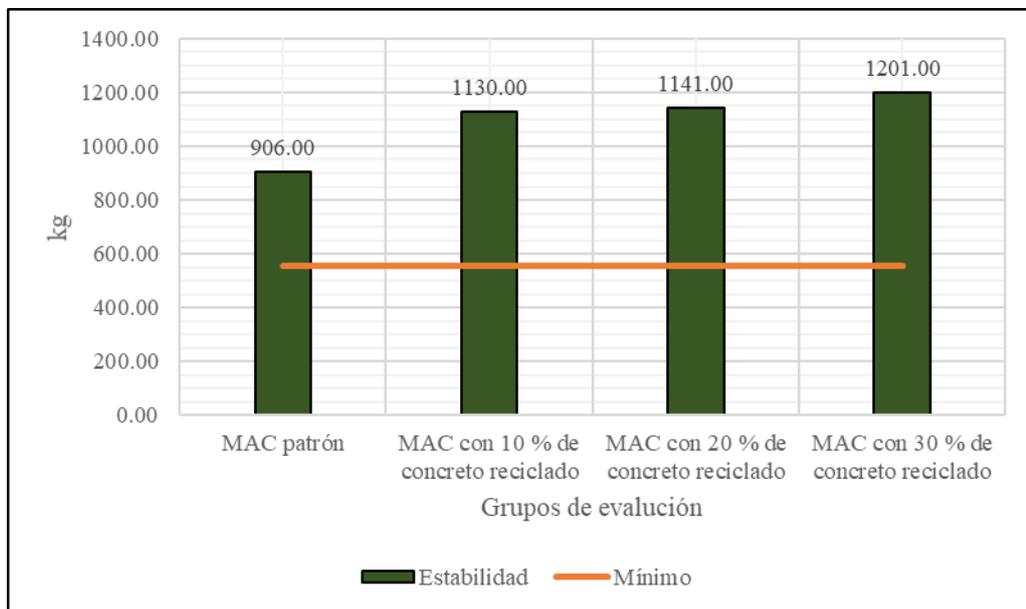
Como segundo gráfico, en la Figura 45 se presenta la comparación de las cantidades promedio de estabilidad en kilogramos de las cuatro mezclas asfálticas en caliente estudiadas en la presente investigación.

A primera vista se puede notar que todos los valores de estabilidad son superiores al requerimiento establecido por el MTC en el segmento 423 del

Manual de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción del 2013 para mezclas a usarse en la conformación de pavimentos flexibles en vías de un tránsito medio, sumad a ello se aprecia que la magnitud de este indicador aumenta ligeramente a medida que aumenta el porcentaje de sustitución del agregado grueso por concreto, siendo esto algo positivo.

Figura 45

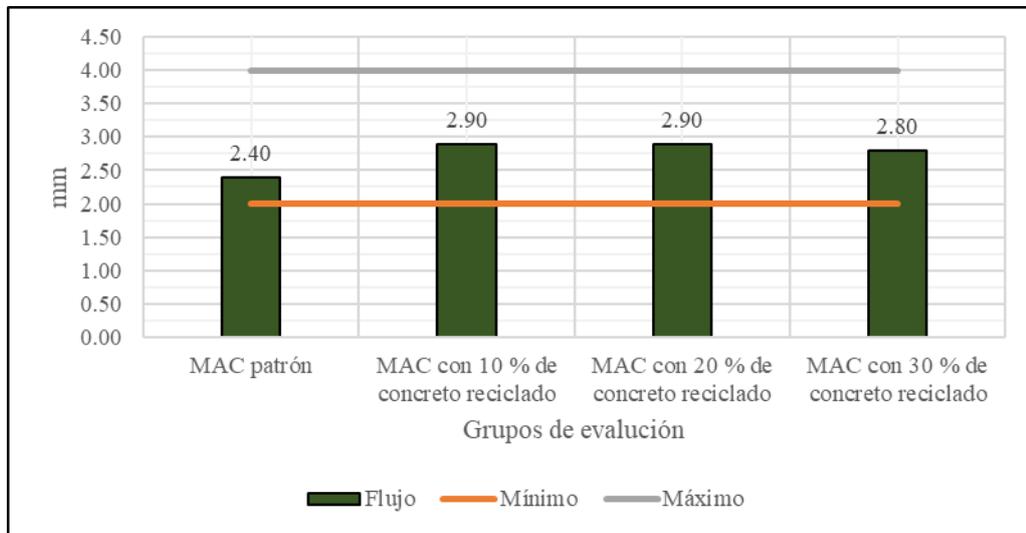
Estabilidad de los diferentes tipos de MAC.



En conjunto con la estabilidad se determinar el flujo, por ello, la Figura 46 presenta los valores del flujo promedio obtenidos por las MAC estudiadas. Aquí resalta que en todos los casos los valores de flujo se encuentran dentro de los requerimientos normativos del MTC (2013), además también se aprecia que el menor valor le corresponde a la muestra patrón.

Figura 46

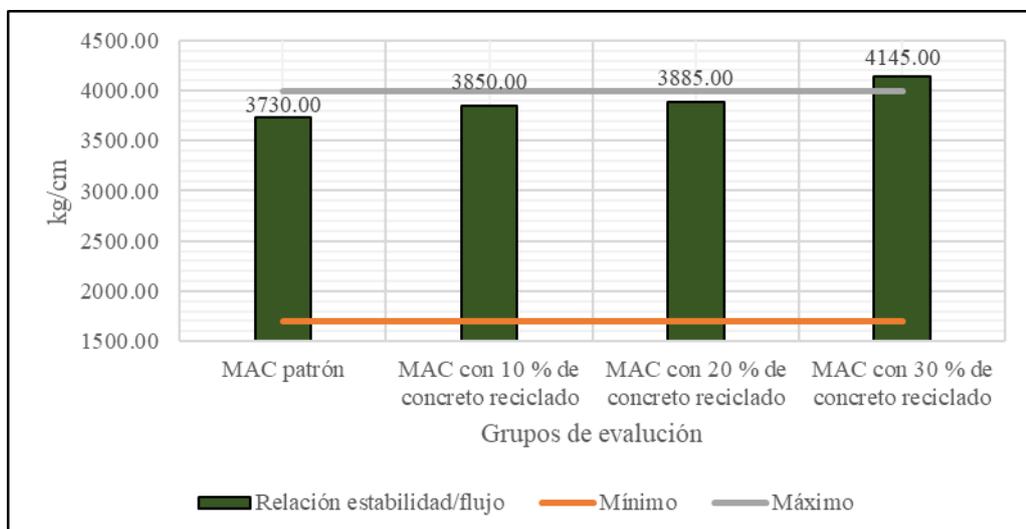
Flujo de los diferentes tipos de MAC.



Asimismo, con estos dos parámetros se determina un tercero denominado como relación de estabilidad/flujo. Los resultados de esta relación determinada a nivel de laboratorio se presentan en la Figura 47, donde además se nota que los valores están próximo al límite superior, estando la MAC con 30 % de concreto reciclado fuera de la especificación a pesar de haberse intentado con la determinación de su valor óptimo de cemento asfáltico, algo negativo.

Figura 47

Relación estabilidad/flujo de los diferentes tipos de MAC.

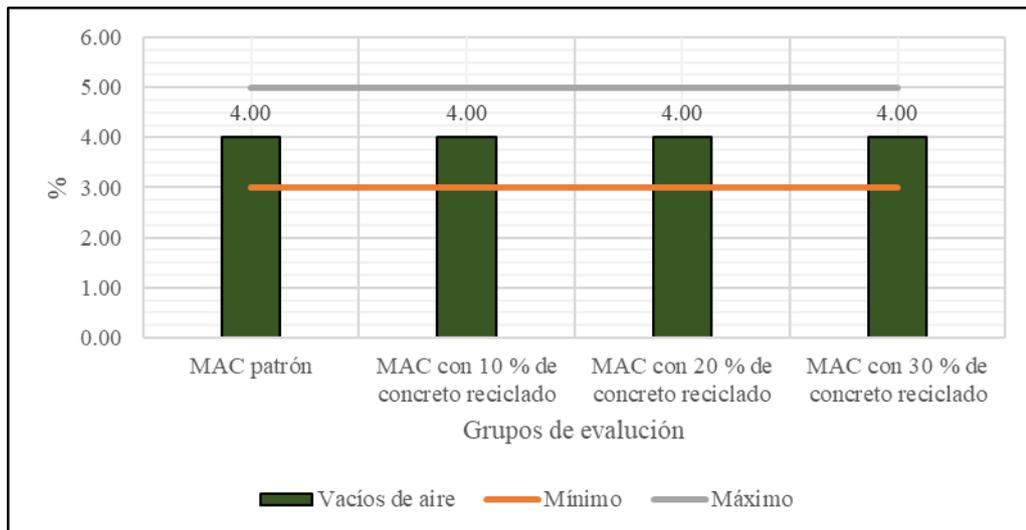


Vacíos de las MAC

En la misma línea, la Figura 48 contiene el análisis de magnitudes de los vacíos de aire en las MAC. Por lo tanto, se aprecia que en todos los casos el promedio apunta al 4.00 %, esto debido a que al momento de determinar el valor de cemento asfáltico óptimo se busca que este parámetro este lo más controlado posible debido al riesgo que representa que se encuentre fuera de los límites normativos.

Figura 48

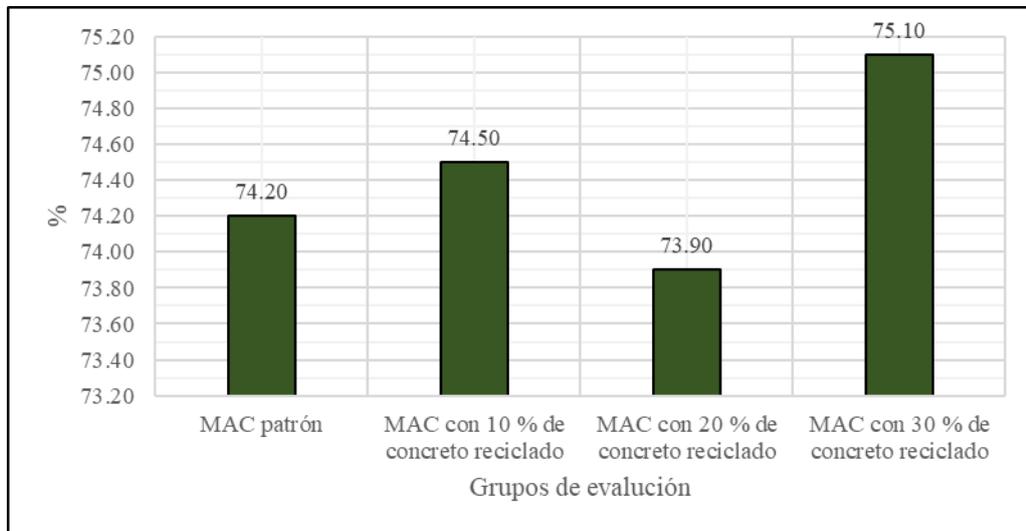
Vacíos de aire de los diferentes tipos de MAC.



La Figura 49, presenta la comparación de los vacíos llenos con asfalto. En este caso, no se aprecia una tendencia clara dado que los valores oscilan entre 73.90 % correspondiente a la MAC con 20 % de concreto reciclado y 75.10 % como valor máximo perteneciente a la MAC con 30 % de concreto reciclado.

Figura 49

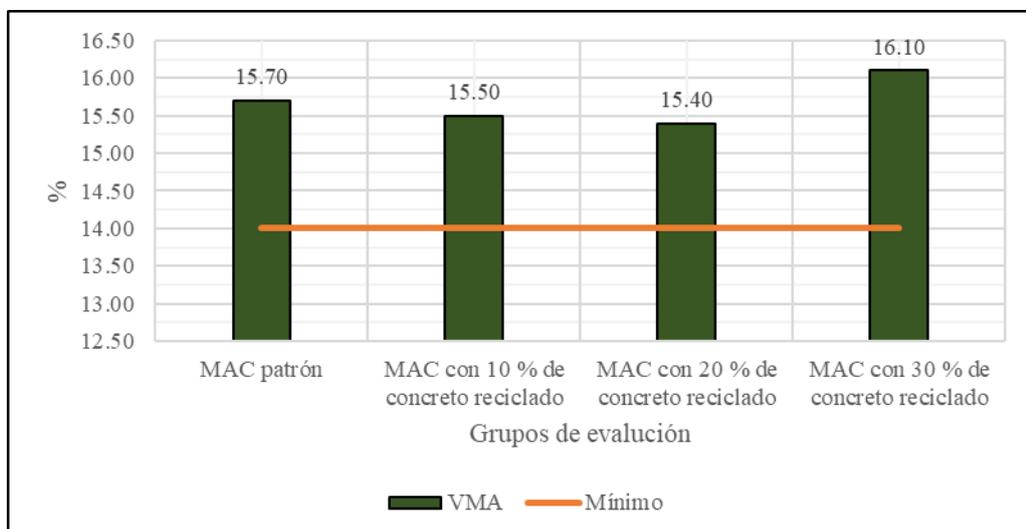
Vacíos llenos de cemento asfáltico de los diferentes tipos de MAC.



Como última propiedad relacionada a la determinación de los vacíos de una mezcla asfáltica en caliente, la Figura 50 exhibe las magnitudes de vacíos en el agregado mineral. De esta manera, se nota que en todos los casos se excede el valor mínimo definido por el MTC, viendo que no existe una tendencia clara en este parámetro teniendo una oscilación de valores entre el 15.40 y el 16.10 % pertenecientes a las MAC con 20 y 30 % de concreto reciclado respectivamente.

Figura 50

Vacíos en el agregado mineral de los diferentes tipos de MAC.

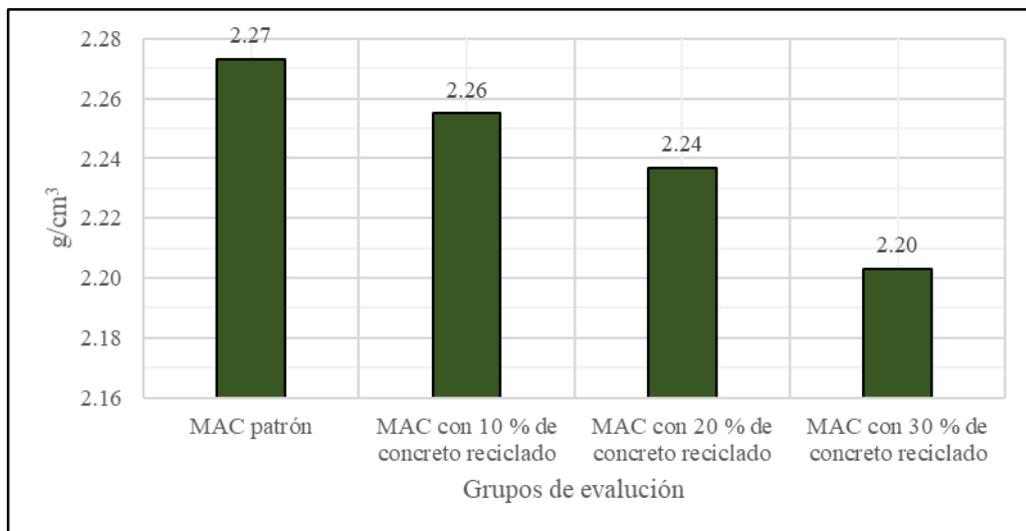


Densidad de las MAC

La Figura 51 presenta los valores de densidad alcanzados por cada una de las mezclas. Es así como se nota una relación inversamente proporcional entre la densidad y la tasa de sustitución del agregado grueso con concreto reciclado.

Figura 51

Densidad de los diferentes tipos de MAC.

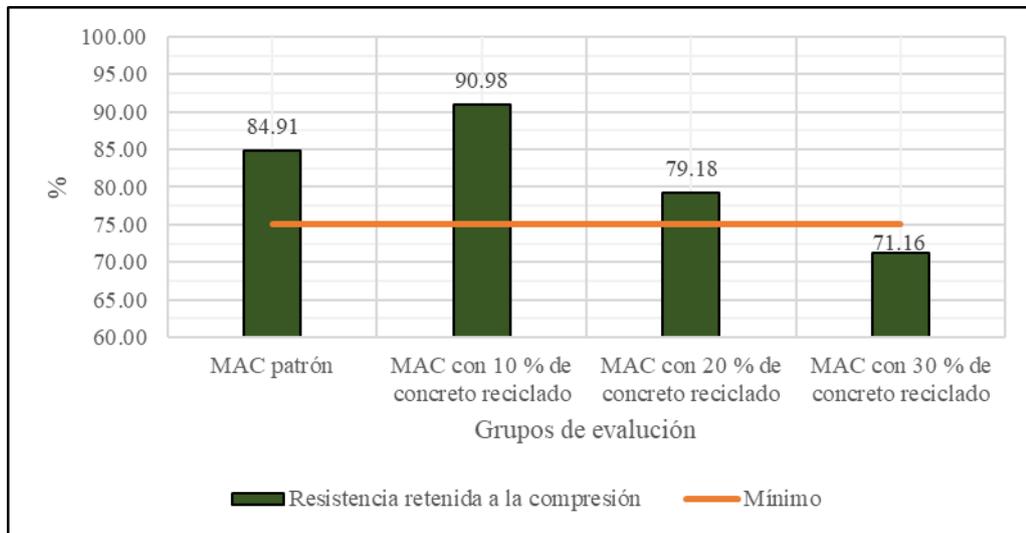


Resistencia retenida de las MAC

La Figura 52 presenta el resumen de los resultados de la resistencia retenida de cada una de las MAC, estos valores fueron determinados en función de las magnitudes de resistencia a la compresión seca y sumergida de los especímenes de las mezclas asfálticas para cada caso. En este caso, es dable destacar que el mejor resultado lo presenta la mezcla asfáltica en caliente con 10 % de concreto reciclado en sustitución del agregado grueso con un 90.98 %, en contraparte, el peor resultado estando además por debajo del requerimiento normativo (75 %) es la MAC con 30 % de concreto reciclado.

Figura 52

Resistencia a la compresión retenida de los diferentes tipos de MAC.



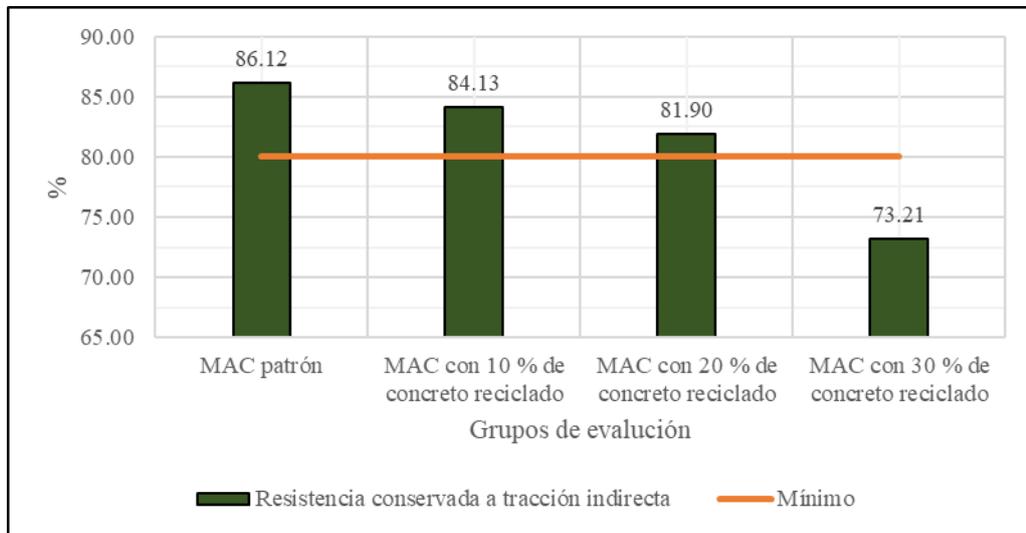
Hasta este punto, los resultados van mostrando que sobrepasar el valor de sustitución de 20 % del agregado grueso por concreto reciclado es perjudicial para las características físico-mecánicas de las MAC.

Resistencia conservada de las MAC

Para concluir con este ítem, se adjunta la Figura 53 con la comparación de los promedios de la resistencia conservada de las MAC. Estos promedios fueron obtenidos considerando la resistencia a la tracción indirecta seca y sumergida de especímenes elaboradas con cada caso de las mezclas analizadas. En esa línea, se aprecia que el mejor resultado corresponde a la MAC patrón con 86.12 %, mientras que el peor resultado estando por debajo del requerimiento del MTC (2013), de un valor de 80 %, es la MAC con 30 % de sustitución del agregado grueso por concreto reciclado.

Figura 53

Resistencia a la tracción indirecta conservada de los diferentes tipos de MAC.



También, se resalta que la resistencia conservada de la MAC con 20 % de concreto reciclado se encuentra muy cercana al límite, por lo que se confirma que el superar este valor de sustitución sería sumamente perjudicial para la MAC.

4.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

4.3.1. Prueba de normalidad

Para la prueba de normalidad, se consideró las siguientes hipótesis:

- Ho: Los datos presentan una distribución normal, pues la significancia es ≥ 0.05 .
- Hi: Los datos no exhiben una distribución normal, ya que la significancia es < 0.05 .

Ante ello, se procedió a la determinación de la normalidad de los datos por medio de la prueba de Shapiro-Wilk, debido a que el número de mediciones por propiedad de la mezcla asfáltica fue menor a 50, para ello se consideró el programa IBM SPSS Statistics 27.

Previamente, en la Tabla 42 se muestra los datos considerados referidos al ensayo Marshall para la prueba de normalidad y para cada uno de los grupos de investigación, desde la MAC patrón, MAC con 10 % de concreto reciclado, MAC con 20 % de concreto reciclado y MAC con 30 % de concreto reciclado, donde se consideró contenidos de cemento asfáltico, desde 7 % a 5 %, con una reducción de 0.5 %, es decir que se tiene los datos de 15 briquetas por grupo, haciendo un total de 60 briquetas.

Tabla 42

Datos del ensayo Marshall considerados para la prueba de normalidad.

	Cemento asfáltico (%)	Relación de estabilidad y flujo (kg/cm)	Porcentaje de vacíos de aire (%)	Vacíos llenados con cemento asfáltico (%)	Vacíos en el agregado mineral en la mezcla compactada (VMA) (%)	Densidad (g/cm ³)
MAC Patrón	7	1996.00	1.60	90.20	16.30	2.287
		2169.00	1.50	90.80	16.20	2.29
		1969.00	1.20	92.70	16.00	2.298
	6.5	2623.00	1.90	87.90	15.60	2.295
		2655.00	2.10	86.40	15.80	2.29
		2878.00	1.90	87.80	15.60	2.295
	6	3402.00	3.10	79.80	15.50	2.285
		3153.00	3.00	80.30	15.40	2.287
		3659.00	2.90	81.00	15.30	2.29
	5.5	4158.00	4.60	70.90	15.80	2.265
		3742.00	4.80	70.10	16.00	2.261
		3927.00	4.60	70.70	15.90	2.264
	5	4666.00	6.50	60.60	16.40	2.238
		4866.00	6.30	61.40	16.20	2.243
		4113.00	6.40	60.80	16.40	2.239
MAC con 10 % de concreto reciclado	7	2339.00	1.00	93.80	15.90	2.273
		2027.00	0.90	94.20	15.90	2.274
		2135.00	1.30	91.90	16.20	2.266
	6.5	2771.00	2.00	86.90	15.50	2.271
		2937.00	2.00	87.20	15.50	2.272
		2826.00	1.80	88.30	15.30	2.277
	6	3517.00	2.80	81.30	15.10	2.271
		3676.00	3.10	80.00	15.30	2.266
		3421.00	3.00	80.30	15.30	2.267
	5.5	4196.00	4.80	69.40	15.80	2.239
3996.00		5.00	68.70	16.00	2.235	
4530.00		4.50	71.10	15.50	2.248	



	Cemento asfáltico (%)	Relación de estabilidad y flujo (kg/cm)	Porcentaje de vacíos de aire (%)	Vacíos llenados con cemento asfáltico (%)	Vacíos en el agregado mineral en la mezcla compactada (VMA) (%)	Densidad (g/cm ³)
MAC con 10 % de concreto reciclado	5	4855.00	6.70	58.90	16.30	2.216
		4397.00	6.60	59.40	16.10	2.219
		4627.00	7.00	57.80	16.50	2.21
MAC con 20 % de concreto reciclado	7	2684.00	1.50	90.50	16.20	2.243
		2716.00	1.40	91.30	16.10	2.247
		2425.00	1.70	89.50	16.40	2.239
	6.5	3075.00	2.10	86.50	15.60	2.247
		2939.00	1.80	88.20	15.40	2.253
		3013.00	2.10	86.40	15.70	2.246
	6	3630.00	3.10	79.80	15.10	2.248
		4033.00	3.50	77.50	15.50	2.237
		3535.00	3.10	79.40	15.20	2.246
	5.5	4276.00	4.90	68.60	15.50	2.226
		4141.00	5.00	67.90	15.70	2.222
		3996.00	4.90	68.50	15.60	2.225
5	4896.00	6.50	58.90	15.90	2.205	
	4485.00	6.60	58.70	15.90	2.204	
	4647.00	6.90	57.50	16.20	2.196	
MAC con 30 % de concreto reciclado	7	2399.00	1.60	90.50	17.40	2.198
		2522.00	1.40	91.60	17.20	2.202
		2430.00	1.60	90.60	17.30	2.198
	6.5	3231.00	2.30	86.00	16.70	2.204
		3289.00	2.00	87.60	16.40	2.211
		3364.00	2.20	86.80	16.50	2.208
	6	4141.00	2.90	81.60	15.70	2.218
		4250.00	3.40	79.10	16.10	2.207
		3730.00	3.40	78.90	16.10	2.206
	5.5	4871.00	5.30	67.90	16.50	2.186
		4254.00	5.30	67.60	16.50	2.185
		4715.00	4.90	69.70	16.10	2.196
5	5131.00	6.70	59.80	16.60	2.171	
	5072.00	6.60	60.20	16.50	2.174	
	4892.00	6.60	60.10	16.50	2.173	

Del mismo modo, en la Tabla 43 se detalla los registros de la resistencia retenida a la compresión y conservada a la tracción para determinar la prueba de normalidad, así seleccionar la prueba más idónea para la comparación de grupos. Cabe mencionar que, para la obtención de la resistencia retenida y conservada se elaboraron un total de 48 briquetas, no obstante, para el análisis estadístico se consideró 24 resultados, pues la resistencia retenida y conservada se da de la

diferencia de las resistencias a compresión y tracción en su condición seca y húmeda. Adicional a ello, se detalla que tales briquetas fueron elaboradas con los contenidos óptimos de cemento asfáltico, por ejemplo, para la MAC estándar con 5.68 % de cemento asfáltico, para la MAC con 10 % de concreto reciclado con 5.71 % de cemento asfáltico, para la MAC con 20 % de concreto reciclado con 5.76 % de cemento asfáltico y para la MAC con 30 % de concreto reciclado con 5.8 % de cemento asfáltico.

Tabla 43

Datos de resistencia retenida y conservada considerados para prueba de normalidad.

	Cemento asfáltico (%)	Resistencia retenida a la compresión (%)	Resistencia conservada a tracción indirecta (%)
MAC Patrón	5.68	90.60	89.86
		82.23	80.56
		82.16	88.24
MAC con 10 % de concreto reciclado	5.71	93.90	92.65
		89.68	83.10
		89.38	76.81
MAC con 20 % de concreto reciclado	5.76	78.91	82.35
		82.53	80.28
		76.22	83.10
MAC con 30 % de concreto reciclado	5.8	68.46	70.13
		72.11	75.00
		73.06	74.67

Ejecutado el programa IBM SPSS Statistics 27, se obtuvo los resultados de significancia, tal como se puede observar en la Tabla 44 para los datos de estabilidad/flujo de las mezclas asfálticas en caliente, donde se tiene un estadístico de prueba que es resultado de la división de la suma de las diferencias corregidas al cuadrado entre el número de datos por la desviación estándar al cuadrado, también se tiene los grados de libertad que viene a ser el número de mediciones de la estabilidad/flujo por grupo, es decir es 3, por último se tiene la significancia que, en los datos de la estabilidad resultó mayor a 0.05, deduciéndose con ello que los registros de estabilidad/flujo exhiben una distribución normal, por ende, para

la comparación de grupos se consideró la prueba paramétrica de ANOVA de un factor.

Tabla 44

Prueba de normalidad de los datos de estabilidad/flujo.

Grupos	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Patrón - 7 % de cemento asfáltico	0.849	3	0.238
Patrón - 6.5 % de cemento asfáltico	0.842	3	0.220
Patrón - 6 % de cemento asfáltico	1.000	3	0.983
Patrón - 5.5 % de cemento asfáltico	0.996	3	0.878
Patrón - 5 % de cemento asfáltico	0.932	3	0.495
MAC con 10 % de concreto reciclado - 7 % de cemento asfáltico	0.969	3	0.664
MAC con 10 % de concreto reciclado - 6.5 % de cemento asfáltico	0.963	3	0.633
MAC con 10 % de concreto reciclado - 6 % de cemento asfáltico	0.980	3	0.729
MAC con 10 % de concreto reciclado - 5.5 % de cemento asfáltico	0.979	3	0.725
MAC con 10 % de concreto reciclado - 5 % de cemento asfáltico	1.000	3	0.995
MAC con 20 % de concreto reciclado - 7 % de cemento asfáltico	0.831	3	0.192
MAC con 20 % de concreto reciclado - 6.5 % de cemento asfáltico	0.997	3	0.903
MAC con 20 % de concreto reciclado - 6 % de cemento asfáltico	0.887	3	0.345
MAC con 20 % de concreto reciclado - 5.5 % de cemento asfáltico	1.000	3	0.961
MAC con 20 % de concreto reciclado - 5 % de cemento asfáltico	0.985	3	0.768
MAC con 30 % de concreto reciclado - 7 % de cemento asfáltico	0.924	3	0.467
MAC con 30 % de concreto reciclado - 6.5 % de cemento asfáltico	0.995	3	0.859
MAC con 30 % de concreto reciclado - 6 % de cemento asfáltico	0.899	3	0.382
MAC con 30 % de concreto reciclado - 5.5 % de cemento asfáltico	0.925	3	0.469
MAC con 30 % de concreto reciclado - 5 % de cemento asfáltico	0.921	3	0.457

En cuanto a los datos de vacíos de aire, ejecutado el programa IBM SPSS Statistics 27, se obtuvo los resultados de significancia, tal como se puede observar en la Tabla 45, donde se tiene un estadístico de prueba que es resultado de la división de la suma de las diferencias corregidas al cuadrado entre el número de datos por la desviación estándar al cuadrado, también se tiene el global que viene a ser el número de mediciones de vacíos de aire por grupo, es decir es 3, por último se tiene la significancia que, en los datos en la mayoría de casos fue inferior a 0.05, deduciéndose con ello que los registros de flujo exhiben una distribución no normal, por ende, para la comparación de grupos se consideró la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.

Tabla 45*Prueba de normalidad de los datos de vacíos de aire.*

Grupos	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Patrón - 7 % de cemento asfáltico	0.923	3	0.463
Patrón - 6.5 % de cemento asfáltico	0.750	3	0.000
Patrón - 6 % de cemento asfáltico	1.000	3	1.000
Patrón - 5.5 % de cemento asfáltico	0.750	3	0.000
Patrón - 5 % de cemento asfáltico	1.000	3	1.000
MAC con 10 % de concreto reciclado - 7 % de cemento asfáltico	0.923	3	0.463
MAC con 10 % de concreto reciclado - 6.5 % de cemento asfáltico	0.750	3	0.000
MAC con 10 % de concreto reciclado - 6 % de cemento asfáltico	0.964	3	0.637
MAC con 10 % de concreto reciclado - 5.5 % de cemento asfáltico	0.987	3	0.780
MAC con 10 % de concreto reciclado - 5 % de cemento asfáltico	0.923	3	0.463
MAC con 20 % de concreto reciclado - 7 % de cemento asfáltico	0.964	3	0.637
MAC con 20 % de concreto reciclado - 6.5 % de cemento asfáltico	0.750	3	0.000
MAC con 20 % de concreto reciclado - 6 % de cemento asfáltico	0.750	3	0.000
MAC con 20 % de concreto reciclado - 5.5 % de cemento asfáltico	0.750	3	0.000
MAC con 20 % de concreto reciclado - 5 % de cemento asfáltico	0.923	3	0.463
MAC con 30 % de concreto reciclado - 7 % de cemento asfáltico	0.750	3	0.000
MAC con 30 % de concreto reciclado - 6.5 % de cemento asfáltico	0.964	3	0.637
MAC con 30 % de concreto reciclado - 6 % de cemento asfáltico	0.750	3	0.000
MAC con 30 % de concreto reciclado - 5.5 % de cemento asfáltico	0.750	3	0.000
MAC con 30 % de concreto reciclado - 5 % de cemento asfáltico	0.750	3	0.000

Asimismo, ejecutado el programa IBM SPSS Statistics 27, se obtuvo los resultados de significancia, tal como se puede observar en la Tabla 46 para los valores relacionados con los vacíos saturados con cemento asfáltico en las mezclas asfálticas en caliente, donde se tiene un estadístico de prueba que es resultado de la división de la suma de las diferencias corregidas al cuadrado entre el número de datos por la desviación estándar al cuadrado, también se tiene el global que viene a ser el número de mediciones de los vacíos llenos de cemento asfáltico por grupo, es decir es 3, por último se tiene la significancia que, en los datos de los vacíos llenos de cemento asfáltico resultó mayor a 0.05, deduciéndose con ello que estos datos presentan una distribución normal, por ende, para la comparación de grupos se consideró la prueba paramétrica de ANOVA de un factor.

Tabla 46*Prueba de normalidad de los datos de vacíos llenos de cemento asfáltico.*

Grupos	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Patrón - 7 % de cemento asfáltico	0.917	3	0.443
Patrón - 6.5 % de cemento asfáltico	0.800	3	0.114
Patrón - 6 % de cemento asfáltico	0.991	3	0.817
Patrón - 5.5 % de cemento asfáltico	0.923	3	0.463
Patrón - 5 % de cemento asfáltico	0.923	3	0.463
MAC con 10 % de concreto reciclado - 7 % de cemento asfáltico	0.876	3	0.312
MAC con 10 % de concreto reciclado - 6.5 % de cemento asfáltico	0.902	3	0.391
MAC con 10 % de concreto reciclado - 6 % de cemento asfáltico	0.912	3	0.424
MAC con 10 % de concreto reciclado - 5.5 % de cemento asfáltico	0.945	3	0.549
MAC con 10 % de concreto reciclado - 5 % de cemento asfáltico	0.955	3	0.593
MAC con 20 % de concreto reciclado - 7 % de cemento asfáltico	0.996	3	0.878
MAC con 20 % de concreto reciclado - 6.5 % de cemento asfáltico	0.792	3	0.094
MAC con 20 % de concreto reciclado - 6 % de cemento asfáltico	0.876	3	0.312
MAC con 20 % de concreto reciclado - 5.5 % de cemento asfáltico	0.855	3	0.253
MAC con 20 % de concreto reciclado - 5 % de cemento asfáltico	0.855	3	0.253
MAC con 30 % de concreto reciclado - 7 % de cemento asfáltico	0.818	3	0.157
MAC con 30 % de concreto reciclado - 6.5 % de cemento asfáltico	1.000	3	1.000
MAC con 30 % de concreto reciclado - 6 % de cemento asfáltico	0.805	3	0.127
MAC con 30 % de concreto reciclado - 5.5 % de cemento asfáltico	0.855	3	0.253
MAC con 30 % de concreto reciclado - 5 % de cemento asfáltico	0.923	3	0.463

En cuanto a los datos de los VMA, ejecutado el programa IBM SPSS Statistics 27, se obtuvo los resultados de significancia, tal como se puede observar en la Tabla 47, donde se tiene un estadístico de prueba que es resultado de la división de la suma de las diferencias corregidas al cuadrado entre el número de datos por la desviación estándar al cuadrado, también se tiene el global que viene a ser el número de mediciones de vacíos en el agregado mineral por grupo, es decir es 3, por último se tiene la significancia que, en los datos en la mayoría de casos fue inferior a 0.05, deduciéndose con ello que los valores de VMA exhiben una distribución no normal, por ende, a fin de la comparación de grupos se consideró la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.

Tabla 47*Prueba de normalidad de los datos de VMA.*

Grupos	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Patrón - 7 % de cemento asfáltico	0.964	3	0.637
Patrón - 6.5 % de cemento asfáltico	0.750	3	0.000
Patrón - 6 % de cemento asfáltico	1.000	3	1.000
Patrón - 5.5 % de cemento asfáltico	1.000	3	1.000
Patrón - 5 % de cemento asfáltico	0.750	3	0.000
MAC con 10 % de concreto reciclado - 7 % de cemento asfáltico	0.750	3	0.000
MAC con 10 % de concreto reciclado - 6.5 % de cemento asfáltico	0.750	3	0.000
MAC con 10 % de concreto reciclado - 6 % de cemento asfáltico	0.750	3	0.000
MAC con 10 % de concreto reciclado - 5.5 % de cemento asfáltico	0.987	3	0.780
MAC con 10 % de concreto reciclado - 5 % de cemento asfáltico	1.000	3	1.000
MAC con 20 % de concreto reciclado - 7 % de cemento asfáltico	0.964	3	0.637
MAC con 20 % de concreto reciclado - 6.5 % de cemento asfáltico	0.964	3	0.637
MAC con 20 % de concreto reciclado - 6 % de cemento asfáltico	0.923	3	0.463
MAC con 20 % de concreto reciclado - 5.5 % de cemento asfáltico	1.000	3	1.000
MAC con 20 % de concreto reciclado - 5 % de cemento asfáltico	0.750	3	0.000
MAC con 30 % de concreto reciclado - 7 % de cemento asfáltico	1.000	3	1.000
MAC con 30 % de concreto reciclado - 6.5 % de cemento asfáltico	0.964	3	0.637
MAC con 30 % de concreto reciclado - 6 % de cemento asfáltico	0.750	3	0.000
MAC con 30 % de concreto reciclado - 5.5 % de cemento asfáltico	0.750	3	0.000
MAC con 30 % de concreto reciclado - 5 % de cemento asfáltico	0.750	3	0.000

Del mismo modo, ejecutado el programa IBM SPSS Statistics 27, se obtuvo los resultados de significancia, tal como se evidencia en la Tabla 48 para los datos de densidad de las mezclas asfálticas en caliente, donde se tiene un estadístico de ensayo que es resultado de la división de la suma de las diferencias corregidas al cuadrado entre el número de datos por la desviación estándar al cuadrado, también se tiene el global que viene a ser el número de mediciones de la densidad por grupo, es decir es 3, por último se tiene la significancia que, en los datos de densidad en algunos casos fue inferior a 0.05, deduciéndose con ello que estos datos exhiben una distribución no normal, por ende, para la comparación de grupos se consideró la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.

Tabla 48*Prueba de normalidad de los datos de densidad.*

Grupos	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Patrón - 7 % de cemento asfáltico	0.936	3	0.510
Patrón - 6.5 % de cemento asfáltico	0.750	3	0.000
Patrón - 6 % de cemento asfáltico	0.987	3	0.780
Patrón - 5.5 % de cemento asfáltico	0.923	3	0.463
Patrón - 5 % de cemento asfáltico	0.893	3	0.363
MAC con 10 % de concreto reciclado - 7 % de cemento asfáltico	0.842	3	0.220
MAC con 10 % de concreto reciclado - 6.5 % de cemento asfáltico	0.871	3	0.298
MAC con 10 % de concreto reciclado - 6 % de cemento asfáltico	0.893	3	0.363
MAC con 10 % de concreto reciclado - 5.5 % de cemento asfáltico	0.953	3	0.583
MAC con 10 % de concreto reciclado - 5 % de cemento asfáltico	0.964	3	0.637
MAC con 20 % de concreto reciclado - 7 % de cemento asfáltico	1.000	3	1.000
MAC con 20 % de concreto reciclado - 6.5 % de cemento asfáltico	0.855	3	0.253
MAC con 20 % de concreto reciclado - 6 % de cemento asfáltico	0.881	3	0.328
MAC con 20 % de concreto reciclado - 5.5 % de cemento asfáltico	0.923	3	0.463
MAC con 20 % de concreto reciclado - 5 % de cemento asfáltico	0.832	3	0.194
MAC con 30 % de concreto reciclado - 7 % de cemento asfáltico	0.750	3	0.000
MAC con 30 % de concreto reciclado - 6.5 % de cemento asfáltico	0.993	3	0.843
MAC con 30 % de concreto reciclado - 6 % de cemento asfáltico	0.812	3	0.144
MAC con 30 % de concreto reciclado - 5.5 % de cemento asfáltico	0.818	3	0.157
MAC con 30 % de concreto reciclado - 5 % de cemento asfáltico	0.964	3	0.637

Asimismo, ejecutado el programa IBM SPSS Statistics 27, se obtuvo los resultados de significancia, tal como se puede observar en la Tabla 49 para los registros de resistencia retenida de las mezclas asfálticas en caliente con contenido óptimo de cemento asfáltico, donde se tiene un estadístico de prueba que es resultado de la división de la suma de las diferencias corregidas al cuadrado entre el número de datos por la desviación estándar al cuadrado, también se tiene el global que viene a ser el número de mediciones de la densidad por grupo, es decir es 3, por último se tiene la significancia que, en los datos de resistencia retenida los datos de la MAC patrón fue menor a 0.05, de esta manera, se infiere que estos datos presentan una distribución no normal, por ende, para la comparación de grupos se consideró la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.

Tabla 49

Prueba de normalidad de los datos de resistencia retenida.

Grupos	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Patrón - 5.68 % de cemento asfáltico	0.756	3	0.014
MAC con 10 % de concreto reciclado - 5.71 % de cemento asfáltico	0.800	3	0.113
MAC con 20 % de concreto reciclado - 5.76 % de cemento asfáltico	0.993	3	0.838
MAC con 30 % de concreto reciclado - 5.8 % de cemento asfáltico	0.897	3	0.376

Por último, ejecutado el programa IBM SPSS Statistics 27, se obtuvo los resultados de significancia, tal como se puede observar en la Tabla 50 para los datos de resistencia conservada a la tracción de las mezclas asfálticas en caliente con el componente óptimo de cemento asfáltico, donde se tiene un estadístico de prueba que es resultado de la división de la suma de las diferencias corregidas al cuadrado entre el número de datos por la desviación estándar al cuadrado, también se tiene el global que viene a ser el número de mediciones de la resistencia conservada a la tracción por grupo, es decir es 3, por último se tiene la significancia que, en los datos de resistencia conservada resultó mayor a 0.05, deduciéndose con ello que estos datos presentan una distribución normal, por ende, para la comparación de grupos se consideró la prueba paramétrica de ANOVA de un factor.

Tabla 50

Prueba de normalidad de los datos de resistencia conservada.

Grupos	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Patrón - 5.68 % de cemento asfáltico	0.876	3	0.313
MAC con 10 % de concreto reciclado - 5.71 % de cemento asfáltico	0.986	3	0.774
MAC con 20 % de concreto reciclado - 5.76 % de cemento asfáltico	0.932	3	0.496
MAC con 30 % de concreto reciclado - 5.8 % de cemento asfáltico	0.801	3	0.116



4.3.2. Hipótesis específica “a”

Siendo planteadas las hipótesis:

H_i : La relación de estabilidad y flujo en mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio se incrementa con la adición de concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural.

H_0 : La relación de estabilidad y flujo en mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio no se incrementa con la adición del concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural.

Con base en el test de normalidad realizado, se procedió a la ejecución de la prueba paramétrica de ANOVA de un factor en el programa IBM SPSS Statistics 27. Así, se tiene la Tabla 51, donde el valor de suma de cuadrados entre grupos es resultado de elevar al cuadrado la diferencia entre la media de cada grupo y la media general de los datos, y luego sumando todas las diferencias al cuadrado entre las medias de los grupos, mientras que la suma de cuadrados dentro de grupos es resultado de elevar la potencia de dos a la diferencia entre cada punto de registros y la media del grupo, y luego sumando todas las diferencias al cuadrado dentro de cada grupo. Asimismo, el grado de libertad entre grupos es de 19 que viene a ser el número de grupos (20) menos 1, mientras que el grado de libertad dentro de grupos es 40, resultado de la resta del número de observaciones (60) menos el número de grupos (20), del mismo modo la media cuadrática que es la división de la suma de cuadrados con el grado de libertad, en cuanto a la F se tiene el valor de 60233 que es resultado de la división de la media cuadrática entre grupos con la media cuadrática dentro de grupos, por último, se tiene a la significancia que en este caso es de 0.000, valor menor a 0.05.

Tabla 51

ANOVA de un factor de los datos de estabilidad/flujo en las MAC.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	47457650267	19	2497771067	60233	0.000
Dentro de grupos	1658742667	40	41468567		
Total	49116392933	59			

En consecuencia, se acepta la hipótesis alterna H_i que dice: La relación de estabilidad y flujo en mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio incrementa con la adición de concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural. La razón de esto se atribuye al hecho de que los niveles de significancia derivados de la prueba ANOVA de un factor fueron inferiores al 5 %, alcanzando un valor asintótico de significancia de 0.000. En el contexto de la investigación en curso, este resultado es altamente beneficioso, ya que implica que, mediante el uso de elementos reciclados de obra, como el concreto se pueden lograr valores superiores a los de un MAC convencional.

4.3.3. Hipótesis específica “b”

Siendo planteadas las hipótesis:

H_i : Los porcentajes de vacíos modifican las mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio con la adición de concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural.

H_0 : Los porcentajes de vacíos no modifican las mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio con la adición de concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural.

Debido al resultado del ensayo de normalidad para los registros de vacíos de aire, se optó por llevar a cabo una prueba no paramétrica Kruskal-Wallis, la síntesis pertinente se describe detalladamente en la Tabla 52 que se presenta más adelante, donde se tiene el valor de N total que corresponde al número total de datos (3 datos por cada grupo que fue 20), el estadístico de prueba que es resultado de la H de Kruskal-Wallis, los grados de libertad que es 19 resultado de restar el número de grupos menos 1 y la significancia asintótica de 0.00 representando que existe variaciones en cuanto al porcentaje de aire en las MAC debido al reemplazo del agregado por concreto reciclado.

Tabla 52

Prueba Kruskal-Wallis de los porcentajes de vacíos de aire en la MAC.

Parámetro	Valor
N total	60
Estadístico de prueba	57828
Grado de libertad	19
Sig. asintótica (prueba bilateral)	0.000

Debido al resultado de la prueba de normalidad para los VMA, se optó por llevar a cabo un ensayo no paramétrico de Kruskal-Wallis, la síntesis pertinente se describe detalladamente en la Tabla 53 que se presenta más adelante, donde se tiene el valor de N total que corresponde al número total de datos (3 datos por cada grupo que fue 20), el estadístico de prueba que es resultado de la H de Kruskal-Wallis, los grados de libertad que es 19 resultado de restar el número de grupos menos 1 y la significancia asintótica de 0.00 representando que existe variaciones en cuanto a los VMA en las MAC debido al reemplazo del agregado por concreto reciclado.

Tabla 53

Prueba Kruskal-Wallis de los porcentajes de vacíos en el agregado mineral en la MAC.

Parámetro	Valor
N total	60
Estadístico de prueba	54264
Grado de libertad	19
Sig. asintótica (prueba bilateral)	0.000

De acuerdo a la prueba de normalidad realizada, se procedió a la ejecución de la prueba paramétrica de ANOVA de un factor en el programa IBM SPSS Statistics 27. Así, se tiene la Tabla 54, donde el valor de suma de cuadrados entre grupos es resultado de elevar al cuadrado la diferencia entre la media de cada grupo y la media general de los datos, y luego sumando todas las diferencias al cuadrado entre las medias de los grupos, mientras que la suma de cuadrados dentro de grupos es resultado de calcular el cuadrado la diferencia entre cada punto de datos y la media del grupo, y luego sumando todas las diferencias al cuadrado dentro de cada grupo. Asimismo, el grado de libertad entre grupos es de 19 que viene a ser el número de grupos (20) menos 1, mientras que el grado de libertad dentro de grupos es 40, resultado de la resta del número de observaciones (60) menos el número de grupos (20), del mismo modo la media cuadrática que es la división de la suma de cuadrados con el grado de libertad, en cuanto a la F se tiene el valor de 528.027 que es resultado de la división de la media cuadrática entre grupos con la media cuadrática dentro de grupos, por último, se tiene a la significancia que en este caso es de 0.000, valor menor a 0.05.

Tabla 54

Prueba Kruskal-Wallis de los porcentajes de vacíos llenos con asfalto.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	8275.146	19	435.534	528.027	0.000
Dentro de grupos	32.993	40	0.825		
Total	8308.139	59			

En conclusión, tras la evaluación mediante las pruebas, se respalda la hipótesis alterna H_i que menciona: Los porcentajes de vacíos modifican las mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tráfico medio con la inclusión de concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural, esto se atribuye al hecho de que los niveles de significancia fueron menores al 5 %.

4.3.4. Hipótesis específica “c”

H_i : La densidad en las mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio incrementan con la adición de concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural.

H_0 : La densidad en las mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio no incrementan con la adición de concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural.

Debido al resultado de la prueba de normalidad para los datos de densidad, se optó por llevar a cabo un test no paramétrica Kruskal-Wallis, la síntesis pertinente se describe detalladamente en la Tabla 55 que se presenta más adelante, donde se tiene el valor de N total que corresponde al número total de datos (3 datos por cada grupo que fue 20), el estadístico de prueba que es resultado de la H de Kruskal-Wallis, los grados de libertad que es 19 resultado de restar el número de grupos menos 1 y la significancia asintótica de 0.00 representando que existe

variaciones en cuanto a los VMA en las MAC debido al reemplazo del agregado por concreto reciclado.

Tabla 55

Prueba Kruskal-Wallis de las densidades en las MAC.

Parámetro	Valor
N total	60
Estadístico de prueba	57836
Grado de libertad	19
Sig. asintótica (prueba bilateral)	0.000

En consecuencia, se acepta la hipótesis nula H_0 que dice: La densidad en las mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio no incrementan con la adición de concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural. La explicación de esto se atribuye al hecho de que los niveles de significancia obtenidos a través de la prueba Kruskal-Wallis fueron menores a 5 % para la reducción de la densidad de las MAC.

4.3.5. Hipótesis específica “d”

H_i : La resistencia a compresión en mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio incrementa con la adición de concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural

H_0 : La resistencia a compresión en mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito no incrementa con la adición de concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural

Debido al resultado de la prueba de normalidad para los datos de densidad, se optó por llevar a cabo una evaluación no paramétrica Kruskal-Wallis, la síntesis pertinente se describe detalladamente en la Tabla 56 que se presenta más adelante,

donde se tiene el valor de N total que corresponde al número total de datos (3 datos por cada grupo que fue 4 considerando solo los valores óptimos), el estadístico de prueba que es resultado de la H de Kruskal-Wallis, los grados de libertad que es 3 resultado de restar el número de grupos (4) menos 1 y la significancia asintótica de 0.03 representando que existe variaciones en cuanto a la resistencia retenida en las MAC debido al reemplazo del agregado por concreto reciclado.

Tabla 56

Prueba Kruskal-Wallis de la resistencia retenida a la compresión.

Parámetro	Valor
N total	12
Estadístico de prueba	8.744
Grado de libertad	3
Sig. asintótica (prueba bilateral)	0.033

En conclusión, tras la evaluación a través la evaluación Kruskal-Wallis, se acepta la hipótesis alterna H_1 que menciona: La resistencia a compresión en mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tráfico medio incrementa con la adición de concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural, esto se debe a que los niveles de significancia fueron menores al 5 %, específicamente para la MAC con 10 % de concreto reciclado.

4.3.6. Hipótesis específica “e”

H_1 : La resistencia a la tracción indirecta en mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio incrementa con la adición de concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural.

H0: La resistencia a la tracción indirecta en mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio no incrementa con la adición de concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural.

Según la prueba de normalidad llevada a cabo, se procedió a la ejecución de la prueba paramétrica de ANOVA de un factor en el programa IBM SPSS Statistics 27. Así, se tiene la Tabla 57, donde el valor de suma de cuadrados entre grupos es resultado de elevar al cuadrado la diferencia entre la media de cada grupo y la media general de los datos, y luego sumando todas las diferencias al cuadrado entre las medias de los grupos, mientras que la suma de cuadrados dentro de grupos es resultado de elevar al cuadrado la divergencia entre cada punto de datos y la media del grupo, y luego sumando todas las diferencias al cuadrado dentro de cada grupo. Asimismo, el grado de libertad entre grupos es de 3 que viene a ser el número de grupos del contenido óptimo de cemento asfáltico (4) menos 1, mientras que el grado de libertad dentro de grupos es 8, resultado de la resta del número de observaciones (12) menos el número de grupos (4), del mismo modo la media cuadrática que es la división de la suma de cuadrados con el grado de libertad, en cuanto a la F se tiene el valor de 3.983 que es resultado de la división de la media cuadrática entre grupos con la media cuadrática dentro de grupos, por último, se tiene a la significancia que en este caso es de 0.052, valor mayor a 0.05.

Tabla 57

ANOVA de un factor de la resistencia conservada a tracción indirecta.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	292.227	3	97.409	3.983	0.052
Dentro de grupos	195.669	8	24.459		
Total	487.896	11			



En resumen, tras analizar los resultados mediante la prueba ANOVA de un factor, se admite la hipótesis H_1 que menciona: La resistencia a la tracción indirecta en mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tráfico medio incrementa con la adición de concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural, esto se debe a que los niveles de significancia fueron superiores al 5 %.

4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para llevar a cabo el estudio se consideró como testigos un global de 108 unidades experimentales (briquetas) considerando las distintas mezclas asfálticas en caliente sin y con reemplazo del agregado natural por concreto hidráulico reciclado para un tramo entre las cuadras 4 y 5 de la Av. República con coordenadas UTM 432066.81 E y 8222681.70 S.

Estas mezclas comprendieron a 5 tratamientos con la sustitución del 0, 10, 20 y 30 % de agregado grueso por concreto recuperado, donde se varió el contenido de cemento asfáltico desde 7 % a 5 % con modificaciones de 0.5 %, tal como se observa en la Tabla 8 haciendo un total de 60 briquetas para la obtención del contenido óptimo de cemento asfáltico.

Asimismo, para la obtención de la resistencia retenida y conservada se consideró 48 briquetas, variando la medición de la resistencia a compresión y tracción en su condición seca y húmeda para las mezclas con la proporción óptima de cemento asfáltico tal como se detalla en la Tabla 39.

De lo detallado, se procede a discutir los resultados obtenidos:

4.4.1. Relación de estabilidad y flujo de las MAC

La relación entre las propiedades de estabilidad y flujo de las mezclas asfálticas en caliente justamente relaciona la capacidad de resistencia que presenta la MAC (establecida como un valor de estabilidad) y su capacidad de deformarse sin llegar a quebrarse (establecido como un valor de flujo), en ese línea, la relación expresa la capacidad de resistencia que presentan las MAC ante la repetición de cargas ocasionada por el tráfico vehicular constante, por ello, constituyen uno de los principales parámetros evaluados por el método Marshall en la elaboración y evaluación de las mezclas asfálticas (Garnica et al., 2005). Asimismo, su importancia hace que el MTC (2013) mediante el Manual de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción, en su sección 423, establezca límites para estas tres propiedades considerando el tipo de tráfico que atenderán.

Como parte del desarrollo de la presente investigación, fueron conducidos los ensayos del método Marshall a nivel de laboratorio, de este modo fueron determinados los valores de estabilidad, flujo y la relación estabilidad/flujo de las mezclas asfálticas elaboradas con sus contenidos óptimos de cemento asfáltico tal como se presenta en la Tabla 41.

En primer lugar, la estabilidad de las MAC presentó valores promedio que oscilaron entre los 906 kg y los 1201 kg correspondientes a la mezcla patrón y a la mezcla con la sustitución del 30 % de agregado grueso natural por concreto reciclado respectivamente, siendo además valores muy por encima del límite mínimo propuesto por el MTC (2013) de 554.73 kg para mezclas en la conformación de vías de un volumen de tránsito medio, lo que condujo a notar que la estabilidad se relaciona directamente con el valor de concreto reciclado



utilizado en la elaboración de la MAC tal como se puede apreciar en la Figura 45, siendo en términos generales algo positivo, dado que representa una mayor eficiencia de resistencia de la mezcla asfáltica. Sumado a ello, el análisis estadístico inferencial demostró que estos cambios son significativos.

Sumado a ello, el flujo de las MAC exhibió valores promedio de entre los 2.40 a los 2.90 mm, notando que los valores máximos son obtenidos por las mezclas con 10 y 20 % de concreto reciclado, siendo estas además aptas en función de los límites expuestos en el segmento 423 del Manual de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción del MTC (2013) mayores a los 2 y menores a los 4 mm (para vías de un nivel de tránsito medio), algo sumamente positivo. Además, la contrastación de hipótesis muestra que el aumento de este parámetro con las dosis de 10 y 20 % de concreto reciclado es significativo.

Por último, la relación estabilidad flujo determinada para las mezclas evaluadas presentó promedios con un valor mínimo de 3730 kg/cm correspondiente a la MAC patrón y un valor máximo de 4145 kg/cm alcanzado por la MAC con 30 % de concreto reciclado, no obstante, este último valor está por encima del límite normativo que expresa que esta relación debe tener un valor de entre los 1700 a los 4000 kg/cm, por ello, es dable mencionar que con la sustitución del agregado grueso natural al 10 y 20 % los valores promedios de la relación estabilidad/flujo cumplen con estos parámetros. En síntesis, no es recomendable sobrepasar en más de 20 % la sustitución del agregado natural por concreto reciclado, dado que también el análisis estadístico inferencial demostró que las dosis menores de concreto reciclado no conducen a cambios significativos en esta propiedad con respecto a lo obtenido por la mezcla patrón.



Respecto a los antecedentes utilizados como base para el desarrollo de la presente investigación, estos presentan resultados mixtos. Se mostraron que la inclusión de concreto reciclado como agregados en las MAC orienta a reducciones en la estabilidad y el flujo, alejándolos de los límites normativos, haciendo que solo la relación estabilidad/flujo cumpla con la norma, en esa línea, coincide con algunos de los hallazgos adquiridos en el estudio actual. En la investigación de Espino et al. (2019), demostraron que si la dosis no sobrepasa el 10 %, los cambios en la estabilidad y flujo no serán significativos, coincidiendo con los resultados obtenidos en la presente tesis. Asimismo, Malpartida y Soto (2021) encontraron que con un aumento en el contenido de asfalto, los valores de estabilidad, flujo y su relación cumplen con los parámetros normativos, estando en línea con lo obtenido en la presente investigación. Por otro lado, Gomez Gomez (2020) describen que la inclusión de concreto reciclado en las MAC tiende a reducir la estabilidad y aumentar el flujo, reduciendo el valor de la relación estabilidad/flujo siendo inverso a lo obtenido en esta tesis. Finalmente, Lipe y Valeriano (2023) señalan que existe un aumento en la estabilidad y reducción en el flujo, por lo tanto, la relación tiende a aumentar siendo similar a lo obtenido en el análisis de la presente investigación.

4.4.2. Vacíos de las MAC

En la presente investigación fueron evaluadas tres propiedades que tienen que ver con los vacíos de las mezclas asfálticas en caliente considerados como indicadores complementarios a la densidad siendo: (1) los vacíos de aire, (2) los vacíos llenos de cemento asfáltico, y (3) los vacíos en el agregado mineral en la mezcla compactada. Estos parámetros terminan siendo los más determinantes en la determinación del contenido óptimo de asfalto de una MAC especialmente por



el método Marshall, sirviendo además para la caracterización del comportamiento que tendrá el material en la vía, he ahí su importancia (Garnica et al., 2005).

Los vacíos de aire, indican el volumen no ocupado dentro de una briqueta de mezcla asfáltica en caliente, por ello, debe evitarse que este valor sea muy grande para ocasionar fallas en el concreto o muy pequeño que no permita su dilatación y contracción por cambios en la temperatura. En ese sentido, el MTC (2013) establece que los límites son del 3 al 5 % lo que en consecuencia sirvió de referencia para la contratación del contenido óptimo de asfalto en las cuatro integraciones estudiadas en la presente investigación, llegando a que todas estas presenten un valor de vacíos de aire del 4.00 % con el fin de cumplir con los lineamientos normativos. Cabe señalar que, dado este resultado, la prueba estadística simplemente confirmó que no existen diferencias entre las muestras.

Los vacíos llenos de cemento asfáltico señalan el volumen de cemento asfáltico efectivo en la MAC. En el caso de los resultados de la presente tesis, estos oscilan entre valores de 73.90 % correspondiente a la MAC con 20 % de concreto reciclado a 75.10 % perteneciente a la MAC con 30 % de concreto reciclado. Por otro lado, la prueba estadística demostró que tan solo el valor de vacíos con asfalto de la MAC con 20 % de concreto reciclado es significativamente distinta al valor de vacíos llenos de asfalto de la MAC estándar.

Para los vacíos en el agregado mineral, los resultados mostraron valores de 15.70, 15.50, 15.40 y 16.10 % correspondientes a la MAC con 0, 10, 20 y 30 % de concreto reciclado. Estos resultados no mostraron una tendencia clara, asimismo, considerando el tamaño máximo del agregado los vacíos en el agregado mineral han de ser mayores al 14 %, algo que se cumple en todos los casos.



También cabe resaltar que la prueba estadística no mostró cambios significativos en los valores de los vacíos en el agregado mineral por la inclusión de concreto reciclado en sustitución parcial del agregado grueso natural.

Finalmente, estos resultados muestran que en general los cambios no son significativos dado a que se estila a realizar un ajuste en el contenido de asfalto de las mezclas asfálticas en caliente a escala de laboratorio, por ello, investigadores como Malpartida y Soto (2021) señalan que los valores de estos parámetros difícilmente se encontrarán fuera de los límites normativos.

4.4.3. Densidad de las MAC

Tal como fue explicado previamente, la densidad está estrechamente relacionada con los volúmenes de vacíos en el asfalto, especialmente como parte de las consideraciones del método Marshall, dado que caracteriza el desempeño que tendrá la mezcla asfáltica en caliente (Garnica et al., 2005).

Los hallazgos alcanzados en el proceso del actual estudio fueron los valores promedio 2.273, 2.255, 2.237 y 2.203 g/cm³ para las mezclas asfálticas en caliente con 0 % (patrón), 10 %, 20 % y 30 % de sustitución del agregado grueso por concreto reutilizado triturado. Estos resultados exhiben una reducción de este parámetro a medida que aumenta el contenido de concreto reciclado, no obstante, el análisis estadístico inferencial dio a conocer que tan solo con la máxima dosis de sustitución (30 %) se obtiene una reducción significativa de la densidad en comparación con la densidad de la MAC convencional.

Los antecedentes consultados en la presente tesis concuerdan en los resultados obtenidos aquí, por ejemplo, Espino et al. (2019) demuestran que la densidad de la MAC se ve reducida significativamente cuando los valores de



sustitución del agregado grueso se incrementan en valores superiores al 20 %, en este caso, puede mencionarse que no debería excederse en la inclusión del concreto reciclado en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente.

4.4.4. Resistencia retenida de las MAC

La resistencia retenida de las mezclas asfálticas en caliente representan al porcentaje de la resistencia a la compresión que presenta una MAC después de ser sumergidas en agua, esto permite establecer el futuro comportamiento de la mezcla en escenarios de saturación total del suelo debido a lluvias o inundaciones (Garnica et al., 2005).

En la presente investigación, se determinó la resistencia retenida de las MAC en función de los hallazgos de seis probetas efectuados por cada caso de las mezclas, considerando tres muestras secas y tres muestras húmedas, es así que fueron obtenidos valores de resistencia a la compresión de muestra seca que oscilan entre 46.80 kg/cm² a los 61.50 kg/cm² y de entre 39.80 kg/cm² a los 47.70 kg/cm² en muestras húmedas, es decir siendo todos mayores a los 21 kg/cm² exigidos en el segmento 423 del Manual de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción del MTC (2013). A partir de aquello, se determinaron los valores de resistencia retenida de 84.91, 90.98, 79.18 y 71.16 % para las MAC con 0 (patrón), 10, 20 y 30 % de concreto reciclado correspondientemente, es decir, la resistencia retenida del concreto reduce su valor a medida que aumenta el volumen de concreto reciclado utilizado en reemplazo del agregado grueso, asimismo, cabe mencionar que la MAC con 30 % de concreto reciclado presenta una resistencia retenida inferior al mínimo establecido por el MTC (2013) de 75



%, por ello, no se recomienda el sobrepasar las dosis de sustitución superiores al 20 % de concreto reciclado.

Estos resultados, son corroborados con lo obtenido por el análisis estadístico inferencial, dado que fue demostrado que la resistencia retenida se ve afectada significativamente cuando la dosis de reemplazo del agregado grueso por concreto reciclado es del 30 %.

Por último, en función de los antecedentes consultados en el desarrollo de la presente tesis fueron encontrados resultados mixtos, teniendo la investigación de Lipe y Valeriano (2023) quienes señalan que la resistencia de la MAC aumenta, contradiciendo los resultados de esta investigación; en contraparte, tanto la investigación de Lazo y Manrique (2021) como la de Gomez y Gomez (2020) hallaron que la resistencia retenida es menor a medida que se aumenta la cantidad de reemplazo del agregado grueso por concreto reciclado, sin embargo, estas reducciones no son significativas en dosis menores al 20 %.

4.4.5. Resistencia conservada de las MAC

El último parámetro considerado en el progreso del actual estudio consistió en la resistencia conservada de las mezclas asfálticas en caliente. Este parámetro es similar a la resistencia retenida respecto a la forma en que se determina dado que describe la resistencia a la tracción indirecta que presenta la MAC tanto en estado seco como después de haber sido sumergida en agua (Garnica et al., 2005).

En la presente investigación, los resultados de la resistencia a la tracción indirecta de las exhibiciones secas oscilaron entre los 6.80 kg/cm² a los 7.70 kg/cm², mientras que las muestras húmedas obtuvieron valores de entre 5.30 kg/cm² hasta los 6.30 kg/cm², haciendo que se lleguen a los valores de resistencia



conservada de 86.12, 84.12, 81.90 y 73.21 % para las MAC con 0, 10, 20 y 30 % de concreto reciclado respectivamente. En este caso, se menciona que nuevamente la MAC con 30 % de concreto reciclado presenta un valor inferior al límite establecido por el MTC (2013) de 80 %, además, se aprecia lo cercano al límite que se encuentra el valor de resistencia conservada de la MAC con 20 % de concreto reciclado por lo que la aplicación de este volumen no sería recomendada.

En la misma línea, al contrastar las hipótesis se demostró que solo existen diferencias significativas entre la mezcla asfáltica patrón con la máxima dosis de concreto reciclado considerada en la presente tesis, corroborando así lo mencionado previamente.

Finalmente, Lazo y Manrique (2021) exponen que la resistencia de las mezclas asfálticas en caliente se reduce a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo del agregado convencional por concreto reciclado por medio de trituración, pero este cambio no es significativo a menos que se exceda la dosis del 20 %, en esa línea, este antecedente corrobora lo obtenido en la presente investigación.



V. CONCLUSIONES

- Habiendo evaluado el resultado del uso del concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso natural para la generación de mezclas asfálticas en caliente para vías de nivel de tránsito medio, se concluye que es factible utilizar concreto reciclado en la producción de mezclas asfálticas en caliente tipo 1, fabricadas con cemento asfáltico PEN 85/100, con un contenido óptimo del 5.71 % al considerar una dosis de sustitución del 10 %. Esto se debe a que las mezclas obtenidas presentan características similares a las de las mezclas convencionales, sin cambios significativos en propiedades como estabilidad, fluidez, contenido de vacíos con aire, vacíos llenos de asfalto, vacíos en los agregados minerales, resistencia conservada y resistencia retenida.
- Fue determinada la variación presentada entre las propiedades de estabilidad, flujo y su relación de las mezclas asfálticas en caliente alteradas en cuanto a la mezcla convencional, teniendo en primera instancia el MAC patrón valores promedio 906 kg, 2.40 mm y 3730 kg/cm respectivamente, estos resultados se compararon con lo obtenido con la mezcla modificada de mejores características siendo la MAC con 10 % de concreto reciclado donde se encontró 1130 kg de estabilidad, 2.90 mm de flujo y 3850 kg/cm de relación estabilidad/flujo, denotándose así un incremento de la estabilidad de 24.72 %, de 20.83 % del flujo y de 3.22 % en la relación de estabilidad/flujo . Estos cambios fueron evaluados a través de la aplicación de una prueba estadística a partir de la cual fue determinado que estos cambios sí fueron significativos cuando se evaluó los diferentes contenidos de cemento asfáltico y que, sumado al hecho de que se cumplen con los requisitos normativos para esta clase de



materiales, puede concluirse que la aplicación de un 10 % de concreto reciclado como agregado grueso en la conformación de MAC es factible.

- Respecto a los vacíos en las mezclas asfálticas en caliente, se estableció que los mejores resultados fueron obtenidos por la MAC con 10 % de concreto reciclado, con un valor de vacíos de aire de 4.00 %, vacíos llenos de asfalto de 74.50 % y vacíos en el agregado mineral de 15.50 %; comparables a los resultados de la MAC patrón de 4.00 %, 74.20 % y 15.70 % para cada parámetro respectivo, representado así ninguna variación del contenido de vacíos de aire, 0.40 % más de vacíos llenos de cemento asfáltico y una reducción de 1.27 % de VMA, además de cumplir en todos los casos con los parámetros normativos para estos materiales de conformación de la carpeta asfáltica en vías de tránsito medio. Asimismo, el análisis estadístico inferencial demostró que estos cambios sí son significativos.
- Se halló la variación de la densidad de las MAC analizadas en la presente investigación, es así que la MAC patrón presentó una densidad promedio de 2.273 g/cm³, mientras que la MAC modificada óptima (10 % de concreto hidráulico reciclado) un valor igual a 2.255 g/cm³, representado una reducción de 0.79 %. Este cambio fue corroborado a través de la contrastación de hipótesis, donde con un valor de significancia menor al 5 %, se determinó que este cambio es significativo.
- Determinada la variación de la resistencia retenida se obtuvo que la MAC patrón tiene un valor de 84.91 %, mientras que la MAC modificada con el mejor resultado resultó ser aquella con 10 % de concreto reciclado alcanzando un valor de 90.98 % lo que se traduce en un 7.15 % más, no obstante, se cumple con el requisito normativo (75 % mínimo). El análisis estadístico inferencial muestra que este aumento es



significativo, es decir, que la dosis utilizada modifica de manera sustancial este parámetro de la MAC, con una significancia de 0.033.

- Finalmente, se exponen los resultados respecto a la resistencia conservada a la tracción de las mezclas asfálticas en caliente analizadas en la presente investigación. Así, la MAC convencional presentó un resultado igual a 86.12 %, mientras que la MAC modificada con la dosis óptima de sustitución (10 %) obtuvo un valor de 84.12 %, siendo un 2.31 % menos, esto fue corroborado con el análisis estadístico inferencial que, en línea con lo obtenido previamente, determinó que este cambio no es significativo. Es así que, se concluye que la aplicación de concreto hidráulico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso en dosis de hasta 10 % permite la obtención de resultados positivos para su aplicación en vías de un nivel de tránsito medio.



VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda el uso de concreto hidráulico reutilizado en la conformación de mezclas asfálticas en caliente en dosis de sustitución del agregado grueso menores al 10 %, dado que se demostró que permite la obtención de propiedades similares a la MAC convencional a la vez que propicia una reducción en el uso de agregados naturales y una mejor disposición de los residuos de construcción.
- Asimismo, para futuras investigaciones, se recomienda realizar la sustitución del agregado grueso con valores próximos al 10 % e intervalos cortos con el fin de establecer el porcentaje específico que presenta los mejores resultados.
- Se recomienda investigar sobre las implicancias del reemplazo en la mezcla de agregados (agregado grueso y fino) por concreto hidráulico reciclado triturado hasta tamaños inferiores a los vistos en la presente investigación.
- Por otro lado, se recomienda indagar respecto a la compatibilidad de aditivos para mezclas asfálticas y concreto hidráulico reciclado en la conformación de mezclas asfálticas en caliente.
- Es recomendable, que futuras investigaciones en áreas como ingeniería industrial busquen la reducción de costos de esta clase de procesos al trabajar con volúmenes grandes, facilitando su implementación a lo largo del país como una alternativa viable técnica, económica y medio ambiental.
- Por último, se recomienda seguir investigando respecto al uso de materiales alternativos provenientes de los desperdicios de una edificación y demolición en la conformación de mezclas de asfalto para proyectos de pavimentación, recapeo, entre otras.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abed, A. H., Qasim, Z. I., Al-Mosawe, H., & Norri, H. H. (2019). The effect of hybrid anti-stripping agent with polymer on the moisture resistance of hot-mix asphalt mixtures. *Cogent Engineering*, 6(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2019.1659125>
- Al Kaaf, K., & Ibeabuchi, V. T. (2023). Marshall Asphalt Mix and Superior Performance Asphalt Mix in Oman: A Comparative Study. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 13(6), 12258–12263. <https://doi.org/10.48084/etasr.6206>
- Aladegboye, O. J., Oguntayo, O. D., Al-Ihekwaba, E., Daniel, T. E., Chiadighikaobi, P. C., & Ng'andu, P. (2022). Evaluation of Volumetric Properties of Cassava Peel Ash Modified Asphalt Mixtures. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 8(10), 2110–2124. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-10-07>
- Alphabet Inc. (2024). *Google Maps*. <https://www.google.com/maps>
- Argumedo, L. (2019). *Carpeta asfáltica reciclada y base granular reciclada para la conformación de una subbase granular óptima para la Av. Próceres del distrito de Chilca, provincia de Huancayo* [Universidad Continental]. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/5925>
- Bastidas-Martínez, J. G., Rondón-Quintana, H. A., Contreras-Zartha, L., Forero-Castaño, S., & Rojas-Rozo, L. (2021). Evaluación de una mezcla de concreto asfáltico con incorporación de agregados reciclados de concreto. *Revista UIS Ingenierías*, 20(2), 75–84. <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n2-2021007>
- Bastidas, J., Sánchez, J., & Rondón, H. (2022). Evaluación de una mezcla asfáltica con incorporación de agregados reciclados de concreto tratados superficialmente con una solución química de sulfato de magnesio. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 32(1), 9–23. <https://doi.org/https://doi.org/10.18359/rcin.4733>
- Bernal, C. (2010). *Metodología de la investigación. Para administración, economía, humanidades y ciencias sociales* (L. Gaona (ed.); Tercera Ed). Pearson Educación. <https://abacoenred.com/wp-content/uploads/2019/02/El-proyecto-de->



investigación-F.G.-Arias-2012-pdf.pdf

- Calva, L. O., & Muñoz, S. P. (2022). Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente incorporando escorias de acero. *Infraestructura Vial*, 24(43), 1–10. <https://doi.org/10.15517/iv.v24i43.48421>
- Castro, H., Romero, B., Vásquez, C., & Arriola, G. (2020). Influence of Coconut Shell and Fiber in Hot Mixtures Asphalt. *Rev. Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*, 7(2), 176–190. <https://revistas.uss.edu.pe/index.php/ING/article/view/1506/2119>
- Choi, M. J., Kim, Y. J., Kim, H. J., & Lee, J. J. (2020). Performance evaluation of the use of tire-derived fuel fly ash as mineral filler in hot mix asphalt concrete. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(2), 249–258. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2019.05.004>
- Condezo, D., & Prado, G. (2020). *Análisis de comportamiento de mezcla asfáltica en caliente con aditivo quimibond advance para climas húmedos villa maría del triunfo* [Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/55405>
- Covilla-Valera, E., Polo-Mendoza, R., Martínez-Arguelles, G., & Navarro-Donado, T. (2022). Evaluación del agregado de concreto reciclado como sustituto parcial de agregado pétreo natural en la producción de mezclas asfálticas. *Revista Ingeniería SIA*, 46(September), 164–179. <https://acortar.link/T6bW9z>
- Espino, C., Lara, C., Trujillo, I., Tafoella, E., & Nuñez, E. (2019). Elaboración de mezclas asfálticas en caliente con adición de residuos de construcción y demolición (Concreto hidráulico) en un 10 % y 20 % como sustitución de agregado pétreo natural. *Conpat*, 2(November 2019), 0–8. <https://doi.org/10.21041/conpat2019/v2pat88>
- Garnica, P., Delgado, H., & Sandovall, C. (2005). *Análisis comparativo de los métodos de Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas* (Instituto Mexicano transporte (ed.)).
- Gelí, M. (2021). *Mezcla asfáltica SMA, fibra, ceniza del bagazo de caña de azúcar y su desempeño mecánico* [Universidad Ricardo Palma]. <https://hdl.handle.net/20.500.14138/4116>



- Gomez, J., & Gomez, J. (2020). *Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas de una mezclas asfálticas en frío, elaborado con agregado reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, en referencia a una mezcla patrón, Cusco 2019* [Universidad Andina del Cusco]. <https://repositorio.uandina.edu.pe/handle/20.500.12557/3609>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta Ed). Mac Graw Hill. <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2. Hernandez, Fernandez y Baptista-Methodología Investigacion Cientifica 6ta ed.pdf>
- Kamau, J., Podolsky, J., & Williams, R. C. (2023). Performance evaluation of a HMA pavement longitudinal joint containing a void reducing asphalt membrane (VRAM). *Frontiers in Materials*, 10(July), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1154873>
- Kessal, O., Belgraa, L., Djebri, N., Salah, S., & Allal, Z. (2022). Improvement of the Mechanical Behavior of an Environmental Concrete Based on Demolished Concrete Waste and Silica Fume. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 8(2), 238–250. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-02-04>
- Lazo, F., & Manrique, R. (2021). *Desempeño de la mezcla asfáltica utilizando residuos de concreto como reemplazo parcial del agregado grueso* [Universidad Privada del Norte]. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/28331>
- Lipe, F., & Valeriano, A. (2023). *Influencia de la adición de pavimento reciclado en las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica y base granular en la Av. la Torre de la ciudad de Puno, 2021* [Universidad Nacional Del Altiplano]. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/20064>
- Lv, S., Wang, S., Xia, C., & Liu, C. (2020). A New Method of Mix Design for Cold Patching Asphalt Mixture. *Frontiers in Materials*, 7(August), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00182>
- Malpartida, J., & Soto, B. (2021). *Utilización de mezcla asfáltica en caliente recuperando el pavimento de concreto hidráulico en Avenida Héroes distrito de Chupaca Huancayo* [Universidad César Vallejo].



<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/73626>

- Medinas, D., Ribeiro, V., Marques, J. T., Silva, B., Barbosa, A. M., Rebelo, H., & Mira, A. (2019). Road effects on bat activity depend on surrounding habitat type. *Science of the Total Environment*, 660, 340–347. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.032>
- MTC. (2013). *Manual de carreteras - Especificaciones técnicas generales para construcción (EG-2013)* (Tomo I). Ministerio de Transportes y Comunicaciones. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html
- MTC. (2014). *Manual de carreteras: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos* (pp. 1–355). Ministerio de Transportes y Comunicaciones. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html
- MTC. (2016). *Manual de ensayo de materiales* (pp. 1–1269). Ministerio de Transportes y Comunicaciones. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html
- MTC. (2018a). *Glosario de términos de uso frecuente en los proyectos de infraestructura vial* (pp. 1–27). Ministerio de Transportes y Comunicaciones. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/otras_normas.html
- MTC. (2018b). *Manual de carreteras: Diseño geométrico DG - 2018* (D. G. de Caminos y Ferrocarriles (ed.); pp. 1–285). Ministerio de Transportes y Comunicaciones. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual.de.Carreteras.DG-2018.pdf
- Naser, M., Abdel-Jaber, M. tasim, Al-shamayleh, R., Louzi, N., & Ibrahim, R. (2022). Evaluating the effects of using reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate on the behavior of hot mix asphalts. *Transportation Engineering*, 10(July), 100140. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2022.100140>
- NEO. (2023). *Mejoradores de adherencia - Anti-stripping para mezclas asfálticas*. Aditivo Mejorador de Adherencia Para Asfalto. <https://acortar.link/Jq8fgj>
- PAM. (2023). *Emulsiones asfálticas catiónicas*.



<https://www.asfaltosmodificados.com/productos/emulsiones/>

- Pham, V. N., Nguyen, T. D., Nguyen, H. G., & Kawamoto, K. (2024). Mechanical, hydraulic, and particle breakage properties of recycled concrete aggregates blended with autoclaved aerated concrete (AAC) grains for unbound road base and subbase materials in Vietnam. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 26(2), 845–859. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01858-7>
- SENAMHI. (2022). *Datos meteorológicos a nivel nacional*. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=descarga-datos-hidrometeorologicos>
- Tarazona, K. (2019). *Aprovechamiento del concreto reciclado proveniente de los residuos de demolición de pavimento rígido en la producción de concreto nuevo en la ciudad de Huánuco - 2018* [Universidad Nacional Hermilio Valdizán]. <https://repositorio.unheval.edu.pe/handle/20.500.13080/4561>
- Vásquez, J. (2020). *Comparación entre el diseño de pavimento rígido y flexible reforzados con geomalla biaxial en la pavimentación de la Av. Perú de la ciudad de Chota - Cajamarca* [Universidad Nacional de Cajamarca]. <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/3945>
- Vega A, D. L., Santos, J., & Martinez-Arguelles, G. (2022). Life cycle assessment of hot mix asphalt with recycled concrete aggregates for road pavements construction. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(4), 923–936. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1778694>



ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia

Anexo 2: Certificados de laboratorio

Anexo 3: Fichas técnicas de insumos

Anexo 4: Certificados de calibración

Anexo 5: Panel fotográfico



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Wilson Saul HERRERA HERRERA,
identificado con DNI 77908468 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
INGENIERÍA CIVIL

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:
" CONCRETO HIDRÁULICO RECICLADO COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL
AGREGADO GRUESO NATURAL PARA LA ELABORACIÓN DE MEZCLAS ASFALTICAS
EN CALIENTE PARA VÍAS DE NIVEL DE TRANSITO MEDIO "

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 23 de Agosto del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Wilson Saul Marquez Marquez,
identificado con DNI 77908768 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA CIVIL,
informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

"CONCRETO HIDRÓLICO RECICLADO COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL AGREGADO
GRUESO NATURAL PARA LA ELABORACIÓN DE PIEZAS ASFÁLTICAS EN
CALLENTE PARA VÍAS DE NIVEL DE TRÁNSITO MEDIO"

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.


En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 23 de Agosto del 2024



FIRMA (obligatoria)



Huella