



UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

Mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTORES

Caceres Barrantes, Rafael David
ORCID: 0009-0009-8839-2013

Tapia Valderrama, Christofer
ORCID: 0009-0007-4627-5949

ASESOR

Huaman Guerrero, Nestor Wilfredo
ORCID: 0000-0002-7722-8711

Lima, Perú

2023

METADATOS COMPLEMENTARIOS

Datos de autores

Caceres Barrantes, Rafael David

DNI: 47616900

Tapia Valderrama, Christofer

DNI: 48363990

Datos de asesor

Huaman Guerrero, Nestor Wilfredo

DNI: 10281360

Datos del jurado

JURADO 1

Davila Fernandez, Susana Irene

DNI: 09147106

ORCID: 0000-0002-6949-1317

JURADO 2

Arevalo Lay, Victor Eleuterio

DNI: 04434662

ORCID: 0000-0002-2518-8201

JURADO 3

Tamara Rodriguez, Joaquin Samuel

DNI: 31615059

ORCID: 0000-0002-4568-9759

Datos de la investigación

Campo del conocimiento OCDE: 2.01.01

Código del Programa: 732016

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Nosotros, Rafael David Caceres Barrantes, con código de estudiante N°201010033, con DNI N°47616900, con domicilio en Raúl Vera Collahuazo N°188, Urbanización Humboldt, distrito Miraflores, provincia y departamento de Lima, y Christofer Tapia Valderrama, con código de estudiante N°201420618, con DNI N°48363990, con domicilio en Sec.6 Heroes de San Juan Mz. B Lt. 5, distrito San Juan de Miraflores, provincia y departamento de Lima, en nuestra condición de bachilleres en Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería, declaramos bajo juramento que:

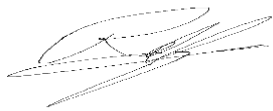
La presente tesis titulada: “Mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas” es de nuestra única autoría, bajo el asesoramiento del docente M.Sc. Ing. Huamán Guerrero, Néstor Wilfredo, y no existe plagio y/o copia de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación presentado por cualquier persona natural o jurídica ante cualquier institución académica o de investigación, universidad, etc.; la cual ha sido sometida al antiplagio Turnitin y tiene el 18% de similitud final.

Dejamos constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en la tesis, el contenido de estas corresponde a las opiniones de ellos, y por las cuales no asumimos responsabilidad, ya sean de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o de internet.

Asimismo, ratificamos plenamente que el contenido íntegro de la tesis es de nuestro conocimiento y autoría. Por tal motivo, asumimos toda la responsabilidad de cualquier error u omisión en la tesis y somos conscientes de las connotaciones éticas y legales involucradas.

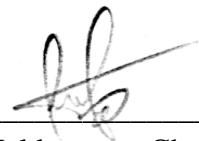
En caso de falsa declaración, nos sometemos a lo dispuesto en las normas de la Universidad Ricardo Palma y a los dispositivos legales nacionales vigentes.

Surco, 01 de noviembre de 2023



Caceres Barrantes, Rafael David

DNI N°47616900



Tapia Valderrama, Christofer

DNI N°48363990

INFORME DE ORIGINALIDAD TURNITIN

Mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas

INFORME DE ORIGINALIDAD

18%

INDICE DE SIMILITUD

17%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

repositorio.urp.edu.pe

Fuente de Internet

4%

2

hdl.handle.net

Fuente de Internet

4%

3

repositorio.ucv.edu.pe

Fuente de Internet

2%

4

Submitted to Universidad Ricardo Palma

Trabajo del estudiante

1%

5

www.dspace.uce.edu.ec

Fuente de Internet

1%

6

repositorio.unsa.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

7

inba.info

Fuente de Internet

<1%

8

repositorio.ucsm.edu.pe

Fuente de Internet

<1%



Dra. Vargas Chang Esther Joni

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de tesis a mi familia y en especial, a mi abuelo que siempre me mostró su confianza, apoyo y cariño.

Rafael David Caceres Barrantes

A mis padres y a mi familia en general por todo el apoyo incondicional.

Christofer Tapia Valderrama

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradecemos a Dios por todo lo que nos ha dado en la vida, agradecemos a nuestros padres por todo lo recibido, a todos nuestros profesores por sus enseñanzas y un agradecimiento especial a nuestro asesor Ing. Néstor Huamán Guerrero, por compartir sus conocimientos y experiencias, siempre dispuesto a orientarnos.

Rafael Caceres Barrantes
Christofer Tapia Valderrama

ÍNDICE GENERAL

METADATOS COMPLEMENTARIOS	ii
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD	iii
INFORME DE ORIGINALIDAD TURNITIN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
RESUMEN	xvi
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.1 Formulación y delimitación del problema (General y Específicos)	2
1.1.1 Descripción del problema.....	2
1.1.2 Problema general.....	3
1.1.3 Problemas específicos	3
1.2 Objetivo general y específico	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Delimitación de la investigación.....	3
1.3.1 Delimitación temporal.....	3
1.3.2 Delimitación espacial	4
1.3.3 Delimitación temática	4
1.4 Justificación e importancia del estudio.....	4
1.4.1 Importancia del estudio	4
1.4.2 Justificación.....	4
1.5 Limitaciones del estudio	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	7
2.1 Antecedentes del estudio de investigación	7
2.1.1 Marco Histórico.....	7
2.1.2 Investigaciones nacionales	9
2.1.3 Investigaciones internacionales.....	10

2.1.4	Artículos relacionados.....	12
2.2	Bases teóricas.....	14
2.2.1	Pavimento asfáltico	14
2.2.2	Carpeta asfáltica	17
2.2.3	Agregados pétreos	18
2.2.4	Cemento asfáltico de petróleo (CAP).....	21
2.2.5	Polímeros.....	30
2.2.6	Polímero Elastomérico Reactivo (RET).....	33
2.2.7	Asfalto Modificado con Polímeros (AMP)	36
2.2.8	Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC).....	38
2.2.9	Mecanismos de falla en los pavimentos asfálticos.....	41
2.2.10	Propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas.....	44
2.2.11	Estructura técnica normativa y ensayos de laboratorio.....	45
2.3	Definición de términos básicos.....	54
CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS		56
3.1	Hipótesis	56
3.1.1	Hipótesis general	56
3.1.2	Hipótesis específicas	56
3.2	Variables	56
3.2.1	Definición conceptual de las variables.....	56
3.2.2	Operacionalización de las variables	57
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....		58
4.1	Tipo y nivel.....	58
4.1.1	Método	58
4.1.2	Orientación	58
4.1.3	Enfoque	58
4.1.4	Tipo de investigación	58
4.1.5	Nivel de la investigación	58
4.2	Diseño de la investigación	59
4.3	Población y muestra.....	59
4.3.1	Población.....	59
4.3.2	Diseño muestral.....	59
4.4	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	59
4.4.1	Tipos de técnicas e instrumentos.....	59

4.4.2	Criterios de validez y confiabilidad de los instrumentos	60
4.4.3	Procedimientos para la recolección de datos.....	60
4.5	Técnicas para el procesamiento y análisis de la información.....	60
CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN		62
5.1	Recolección de datos	62
5.1.1	Agregados pétreos	62
5.1.2	Cementos asfálticos.....	63
5.1.3	Polímero	64
5.1.4	Filler	66
5.2	Procesamiento de datos de ensayos	66
5.2.1	Ensayos de caracterización de los agregados.....	66
5.2.2	Caracterización de los cementos asfálticos convencional y modificado.....	75
5.2.3	Ensayos Marshall a las MAC convencional y modificada.....	81
5.2.4	Ensayos de Desempeño a las MAC convencional y modificada	100
5.3	Resultados de los ensayos.....	108
5.3.1	Resultados de ensayos a los CAP.....	108
5.3.2	Resultados de Ensayos Marshall (O.E.1 y O.E.2).....	118
5.3.3	Resultados del Ensayo de Desempeño Rueda de Hamburgo (O.E.3).....	120
5.4	Análisis y discusión de los resultados.....	123
5.4.1	Análisis y discusión de resultados de parámetros mecánicos Marshall para evaluar la estabilidad (Objetivo Específico 1)	123
5.4.2	Análisis y discusión de resultados de parámetros volumétricos Marshall para evaluar la durabilidad (Objetivo Específico 2).....	129
5.4.3	Análisis y discusión de resultados del ensayo de la Rueda de Hamburgo para evaluar la susceptibilidad a la deformación permanente (O. Específico 3)	142
5.5	Contrastación de Hipótesis	145
5.5.1	Hipótesis Especifica 1	145
5.5.2	Hipótesis Específica 2	147
5.5.3	Hipótesis Específica 3	148
CONCLUSIONES		150
RECOMENDACIONES.....		151
REFERENCIAS.....		152
ANEXOS		159

Anexo A: Matriz de Consistencia	160
Anexo B: Matriz de Operacionalización de Variables	161
Anexo C: Ensayos de laboratorio	162

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Línea de tiempo del asfalto	7
Tabla 2 Línea de tiempo de los polímeros	8
Tabla 3 Composición química del cemento asfáltico	25
Tabla 4 Fortalezas y Debilidades del asfalto	27
Tabla 5 Equipos Superpave y propósito de los ensayos al CAP	29
Tabla 6 Clasificación General de los polímeros	32
Tabla 7 Características del polímero ELVALOY™ 4170 Copolímero	64
Tabla 8 Cantidad óptima de polímero Elvaloy (RET) y método de determinación	65
Tabla 9 Verificación de Requisitos Agregado Grueso- Cantera La Poderosa- Caso 1 ..	66
Tabla 10 Verificación de Requisitos Agregado Fino- Cantera La Poderosa. Caso 1	67
Tabla 11 Granulometría del Agregado Grueso. Cantera La Poderosa. Caso 1	67
Tabla 12 Granulometría del Agregado Fino. Cantera La Poderosa. Caso 1	68
Tabla 13 Granulometría de la Combinación de Agregados La Poderosa. Caso 1	69
Tabla 14 Verificación de Requisitos Agregado Grueso- Cantera Carapongo. Caso 2 ...	70
Tabla 15 Verificación de Requisitos Agregado Fino- Cantera Carapongo. Caso 2	71
Tabla 16 Granulometría del Agregado Grueso. Cantera Carapongo. Caso 2	72
Tabla 17 Verificación de Requisitos Agregado Grueso- Cantera Río Pita. Caso 3	73
Tabla 18 Verificación de Requisitos Agregado Fino- Cantera Río Pita. Caso 3	73
Tabla 19 Verificación de Requisitos CAP PEN 60/70 (Convencional). Caso 1	75
Tabla 20 Verificación de Requisitos CAP Modificado con Elvaloy RET. Caso 1	76
Tabla 21 Verificación de Requisitos CAP PEN 60/70 (Convencional). Caso 2	76
Tabla 22 Verificación de Requisitos CAP Modificado con 1.4% Elvaloy. Caso 2	77
Tabla 23 Verificación de Requisitos del Asfalto Convencional AC-20. Caso 3	78
Tabla 24 Verificación de Requisitos AMP con 1% RET (Elvaloy 4170). Caso 3	78
Tabla 25 Verificación de Requisitos AMP con 1.3% RET (Elvaloy 4170). Caso 3	79
Tabla 26 Verificación de Requisitos AMP con 1.5% RET (Elvaloy 4170). Caso 3	80
Tabla 27 Verificación de Requisitos AMP con 2% RET (Elvaloy 4170). Caso 3	80
Tabla 28 Ensayo de Módulo Resiliente de las MAC. Caso 3	105
Tabla 29 Comparación de Resultados CAP Convencional y Modificado. Caso 1	108
Tabla 30 Comparación de Resultados CAP Convencional y Modificado. Caso 2	111
Tabla 31 Comparación de Resultados CAP Convencional y Modificado. Caso 3	114
Tabla 32 Resultados Ensayo Marshall MAC Convencional y Modificada. Caso 1	118

Tabla 33 Resultados Ensayo Marshall MAC Convencional y Modificadas. Caso 2 ...	119
Tabla 34 Resultados Ensayo Marshall MAC Convencional y Modificadas. Caso 3 ...	120
Tabla 35 Resultados de la Deformación Permanente de las mezclas. Caso 1	121
Tabla 36 Resultados de la Deformación Permanente de las mezclas. Caso 4.....	122
Tabla 37 Cuadro Comparativo de Parámetros Mecánicos de las MAC. Caso 1	123
Tabla 38 Cuadro Comparativo de Parámetros Mecánicos de las MAC. Caso 2	124
Tabla 39 Cuadro Comparativo de Parámetros Mecánicos de las MAC. Caso 3	125
Tabla 40 Cuadro Comparativo de Parámetros Mecánicos MAC Convencionales.....	126
Tabla 41 Cuadro Comparativo de Parámetros Mecánicos Mezclas Modificadas	127
Tabla 42 Resultados Finales de los Parámetros Mecánicos de las MAC	127
Tabla 43 Cuadro Comparativo de Parámetros Volumétricos de MAC. Caso 1	130
Tabla 44 Parámetros Corregidos de diseño Marshall de las MAC. Caso 1	131
Tabla 45 Cuadro Comparativo de Parámetros Volumétricos de las MAC. Caso 2.....	134
Tabla 46 Resultado Final de los Parámetros Volumétricos de las MAC.....	137
Tabla 47 Resultados de Parámetros Marshall de Franco et al. (2015).	139
Tabla 48 Resultados de Parámetros Marshall de Valdivia (2017).....	140
Tabla 49 Resultados de Parámetros Marshall de Rosales (2021).....	140
Tabla 50 Cuadro Comparativo de la Deformación Permanente de las MAC.....	144

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Pavimento asfáltico como paquete estructural	16
Figura 2 Esfuerzos tensionales (horizontales) y compresionales (verticales)	17
Figura 3 Requisitos de los agregados gruesos	20
Figura 4 Requisitos de los agregados finos	20
Figura 5 Gradación de la combinación de agregados para las MAC.....	21
Figura 6 Destilación del petróleo para obtener el cemento asfáltico y derivados	22
Figura 7 Esquema coloidal de la estructura del asfalto	23
Figura 8 Modelo de una molécula de un asfalteno	24
Figura 9 Cadenas de homopolímero y hetero polímero (Copolímero)	30
Figura 10 Varios tipos de estructuras de polímeros.....	31
Figura 11 Estructura molecular del polímero RET.....	34
Figura 12 Microestructura en asfaltos modificados por mezclado y por reacción	35
Figura 13 Función del ácido poli fosfórico (PPA) en el asfalto	35
Figura 14 Modificación de asfalto vía húmeda	37
Figura 15 Esquema del VMA en la mezcla compactada	39
Figura 16 Tipos de Fisuración	42
Figura 17 Tipos de Deformación Permanente	43
Figura 18 Esquema del Ensayo de Penetración	45
Figura 19 Esquema del Ensayo de Punto de Ablandamiento	46
Figura 20 Ensayo de Recuperación Elástica.....	47
Figura 21 Reómetro Dinámico de Corte DSR y respuesta esfuerzo-deformación	48
Figura 22 Horno RTFOT	49
Figura 23 Equipo PAV	50
Figura 24 Ensayo de tracción indirecta.....	52
Figura 25 Equipo de Viga en flexión.....	53
Figura 26 Ensayo de la Rueda Cargada	53
Figura 27 Especificaciones para CAP clasificado por viscosidad a 60°C (ASTM).....	63
Figura 28 Presentación del polímero Elvaloy 4170 RET de DuPont	64
Figura 29 Curva Granulométrica del A.G. Cantera La Poderosa, Arequipa. Caso 1	68
Figura 30 Curva Granulométrica del A.F. Cantera La Poderosa, Arequipa. Caso 1	69
Figura 31 Curva Granulométrica de la Combinación Cantera La Poderosa. Caso 1.....	70
Figura 32 Curva Granulométrica de la Combinación Cantera Carapongo. Caso 2.....	72

Figura 33 Granulometría de la Combinación de Agregados. Río Pita, Caso 3	74
Figura 34 Curva Granulométrica de la Combinación de agregados. Ecuador. Caso 3...	74
Figura 35 Ensayo Marshall de la Mezcla Convencional con asfalto 60/70. Caso 1	82
Figura 36 Gráficos del Ensayo Marshall de la MAC Convencional. Caso 1	83
Figura 37 Resultados del Ensayo Marshall de la MAC Convencional. Caso 1.....	84
Figura 38 Resultados del Ensayo de Verificación Mezcla Convencional. Caso 1	84
Figura 39 Ensayo Marshall de la Mezcla Modificada con Elvaloy. Caso 1	85
Figura 40 Gráficos del Ensayo Marshall de la Mezcla Modificada. Caso 1	86
Figura 41 Resultados del Ensayo Marshall de Mezcla Modificada. Caso 1.....	86
Figura 42 Comparación de Resultados Mezcla Convencional vs. Modificada. Caso 1 .	87
Figura 43 Ensayo Marshall Mezcla Convencional con 4.0% de asfalto. Caso 2	88
Figura 44 Gráficos del Ensayo Marshall de la Mezcla Convencional. Caso 2.....	90
Figura 45 Gráficos del Ensayo Marshall Mezcla Modificada 1.1% RET. Caso 2	92
Figura 46 Gráficos del Ensayo Marshall Mezcla Modificada 1.4% RET. Caso 2	94
Figura 47 Gráficos del Ensayo Marshall Mezcla Modificada 1.7% RET. Caso 2	96
Figura 48 Ensayo Marshall de la Mezcla Convencional con asfalto AC-20. Caso 3	97
Figura 49 Gráficas del Ensayo Marshall Mezcla Convencional con AC-20. Caso 3.....	98
Figura 50 Ensayo Marshall de la Mezclas Modificadas con Elvaloy RET. Caso 3	99
Figura 51 Vacíos de aire versus número de golpes	100
Figura 52 Características de mezcla convencional Ensayo Rueda Cargada. Caso 1....	101
Figura 53 Datos del Ensayo Rueda Cargada para la Mezcla Convencional. Caso 1....	101
Figura 54 Deformación Ensayo Rueda Cargada para Mezcla Convencional. Caso 1..	102
Figura 55 Ensayo Rueda de Hamburgo MAC convencional y modificadas con SBS .	103
Figura 56 Ensayos para MAC convencional y modificadas. Caso 1	104
Figura 57 Ensayos Módulo Resiliente MAC convencional y modificadas. Caso 3	105
Figura 58 Ensayo de Rueda cargada para mezcla con PG 64-16 y TN ¾". Caso 4	107
Figura 59 Ensayo de Rueda cargada para mezcla modificada PG 76-16 y TN ¾"	107
Figura 60 Resultados del Ensayo de Penetración y Punto de Ablandamiento. Caso 1	109
Figura 61 Resultados de la Viscosidad Cinemática. Caso 1	110
Figura 62 Resultados de la Recuperación Elástica. Caso 1	110
Figura 63 Resultados de Ensayo de Penetración y Punto de Ablandamiento. Caso 2 .	112
Figura 64 Resultados de la Viscosidad Cinemática y Recuperación elástica. Caso 2..	113
Figura 65 Resultados de la Penetración y Punto de Ablandamiento. Caso 3	115
Figura 66 Resultados de la Viscosidad Cinemática y Rotacional. Caso 3	116

Figura 67 Resultados de la Recuperación elástica y elástica torsional. Caso 3.....	117
Figura 68 Resultados de la Estabilidad Marshall por Caso	125
Figura 69 Resultados del Flujo Marshall por Caso.....	125
Figura 70 Resultado Final de Estabilidad de las MAC Convencional y Modificada ...	128
Figura 71 Resultado Final del Flujo de las MAC convencional y Modificada	128
Figura 72 Cálculo del contenido óptimo de asfalto de las MAC. Caso 1	131
Figura 73 Variación de VMA, VFA y contenido de asfalto de las MAC. Caso 1.....	132
Figura 74 Variación de la densidad de las MAC. Caso 1	133
Figura 75 Variación de VMA, VFA y % de asfalto de las MAC. Caso 2	135
Figura 76 Variación de la densidad de las MAC. Caso 2	136
Figura 77 Variación de VMA, VFA y % asfalto de las MAC. Final.....	138
Figura 78 Variación de densidad de las MAC Convencional y Modificada. Final	139
Figura 79 Resultado de la Deformación Permanente (Ahuellamiento) por Caso.....	143
Figura 80 Resultado Final de la Deformación Permanente (Ahuellamiento).....	144

RESUMEN

La investigación “Mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas” tuvo el objetivo de evaluar las mezclas asfálticas con polímeros RET (sigla en inglés) para ser aplicadas en lugares con climas cálidos. Las propiedades evaluadas fueron estabilidad, flujo y resistencia ante la deformación permanente, pues ésta última es una de las fallas más recurrentes en los pavimentos asfálticos. El método de investigación fue deductivo con orientación aplicada para resolver el problema en los pavimentos con mezclas convencionales, los cuales no cumplen con el tiempo de servicio, pues presentan deterioros causados por las cargas de tránsito y factores climáticos. El diseño de la investigación fue no experimental, transversal y retrolectivo, pues se presentaron algunas limitaciones. Se encontraron pocas investigaciones sobre este polímero, sin embargo, ha sido usado en países como México, Colombia, Brasil, etc. De nombre comercial Elvaloy, en Perú es poco conocido. Como resultado del estudio, se encontró que la estabilidad de las mezclas con RET, obtenida mediante resultados del ensayo Marshall, incrementó entre 13% a 26% y la resistencia ante la deformación permanente, a través del ahuellamiento mediante el ensayo de la rueda de Hamburgo, incrementó 61% con respecto a una mezcla convencional. Se concluyó que las mezclas con RET tuvieron una gran mejora de sus propiedades mecánicas. Una característica importante es la reactividad del polímero, brindando una excelente estabilidad al almacenamiento del asfalto modificado, siendo una gran ventaja y por lo cual, también se usa junto con otros polímeros.

Palabras clave: polímero RET, asfalto modificado, mezclas asfálticas en caliente, Elvaloy.

ABSTRACT

The study “Hot mix asphalt with reactive elastomeric terpolymer for improvement of their mechanical properties” aims to evaluate the modified mixes with RET to be used in pavements at high temperatures. Marshall stability and flow, resistance to permanent deformation were the main properties evaluated, because of the latest is the more frequent failure in asphalt pavements. The research method was deductive with guidance applied to solve the problem in pavements with conventional mixtures, which do not meet the service life, as they present deterioration caused by traffic loads and climatic factors. The study design was non-experimental, transversal and retrolective, since it had some limitations. A few studies were found; however, this polymer has been used in countries such as Mexico, Colombia, Brazil, etc. Elvaloy RET, its trade name, is not well known in Peru. As a result of the study, it was observed that the stability, obtained through the results of the Marshall test, increased 13% to 26% and rutting resistance through the results of the Hamburg Wheel tracking test, increased by 61% compared to a conventional mixture. Based on the results it was concluded that HMA with RET had positive effect on the mechanical properties. An important characteristic is the reactivity of the polymer, providing excellent storage stability of modified asphalt, being a great advantage and therefore it is also used together with other polymers.

Keywords: reactive elastomeric terpolymer, modified asphalt, hot mix asphalt, Elvaloy.

INTRODUCCIÓN

En nuestro país es necesario mejorar la infraestructura de transporte para potenciar las actividades productivas. Además, siendo un país de escasos recursos, se deben implementar proyectos que completen la vida útil de diseño, pero a menudo, las carreteras presentan deterioro prematuro por distintos factores. Uno de ellos es el uso de mezclas asfálticas convencionales, que no están preparadas para afrontar temperaturas elevadas, cambios de temperatura, incremento del tránsito e incluso aumento de las cargas por ejes de los vehículos. Hay evidencia que las carpetas asfálticas con mezclas convencionales presentan deterioro al poco tiempo de construcción, originando mayores costos por rehabilitación y mantenimiento. Por lo tanto, para optimizar los recursos debemos plantear el uso de mejores tecnologías, como la de incorporar polímeros a la mezcla asfáltica, modificando sus propiedades para afrontar de forma adecuada estos problemas. El objetivo de esta tesis es presentar un polímero relativamente nuevo en el mercado que podría ayudar a hacerle frente a este tipo de problemas y evaluar su comportamiento en la mezcla asfáltica para ser aplicada en lugares con climas calurosos. La metodología es no experimental. En el primer capítulo planteamos el problema mediante algunos autores que exponen la situación actual respecto al poco tiempo de uso de los pavimentos que ya requieren intervención. En el segundo, presentamos la teoría sobre la composición del asfalto, la forma de actuar de los polímeros sobre él y sobre la mezcla asfáltica. En el tercero, presentamos las hipótesis de la investigación. En el cuarto, explicamos el método de la investigación. En el quinto, se exponen y analizan los resultados del estudio, para contrastar las hipótesis. Al final, presentamos conclusiones y recomendaciones para posteriores investigaciones.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Formulación y delimitación del problema (General y Específicos)

1.1.1 Descripción del problema

Ccora (2020) menciona que el clima altera al asfalto por ser susceptible a la temperatura. Tenemos en el país tres regiones geográficas con climas muy distintos, de forma que, esa variación altera el comportamiento de las carpetas asfálticas, surgiendo la necesidad de adoptar nuevas tecnologías que mejoren tal comportamiento. (p. xiii)

Balbín y Enríquez (2020) mencionan que las vías de transporte en regiones cálidas no completan la vida útil de diseño ya que las carpetas con mezcla convencional no están preparadas para soportar altas temperaturas y tránsito pesado que conducen al deterioro, perjudicando la seguridad de la vía. La tecnología de asfaltos con polímeros, si bien ya está siendo aplicada en varios países de la región, en nuestro país que cuenta con climas variados aún se siguen usando las técnicas convencionales. (p.1)

Alarcón y Cárdenas (2021) señalan que la falla más recurrente corresponde a las deformaciones permanentes por el paso constante de los vehículos y fisuras por el gradiente térmico. Esto es más severo en vías de tránsito pesado, por esta razón, los pavimentos asfálticos no terminan el periodo proyectado, además de que, las mezclas tradicionales no tienen un comportamiento adecuado en estas condiciones de clima y tráfico. Se hace entonces imprescindible modificar las mezclas convencionales para que el pavimento tenga un mejor desempeño. (p.1)

Quispe (2022) menciona que, frente a estos problemas, se requiere incentivar la búsqueda de nuevas tecnologías, que logren reducirlos pues se presentan con frecuencia en nuestros pavimentos. Es por ello que se pretende obtener un asfalto con propiedades mejoradas, con la inclusión de algún material, modificando su comportamiento reológico para mejorar su desempeño. (p.2).

Actualmente, se ejecutan proyectos con nuevas técnicas, pero, todavía queda ampliar la base del conocimiento con tecnologías probadas en carreteras con nuevos polímeros para cada caso particular. Es así que, para carreteras importantes, sea por tráfico pesado o clima, es una necesidad que éstas se proyecten con el polímero más adecuado a las condiciones de temperatura y tránsito, para que la vía logre alcanzar el tiempo de servicio proyectado y aminorar costos por mantenimiento.

1.1.2 Problema general

¿En qué medida las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos mejoran sus propiedades mecánicas en zonas de climas cálidos, año 2023?

1.1.3 Problemas específicos

a. ¿En qué medida las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos mejoran la estabilidad en zonas de climas cálidos, año 2023?

b. ¿En qué medida las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos mejoran la durabilidad en zonas de climas cálidos, año 2023?

c. ¿En qué medida las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos mejoran la susceptibilidad a la deformación permanente en zonas de climas cálidos, año 2023?

1.2 Objetivo general y específico

1.2.1 Objetivo general

Determinar las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas, en zonas de climas cálidos, año 2023.

1.2.2 Objetivos específicos

a. Determinar la estabilidad de la mezcla asfáltica en caliente convencional y de la mezcla asfáltica en caliente con polímeros elastoméricos reactivos, en zonas de climas cálidos, mediante la metodología Marshall, año 2023.

b. Determinar la durabilidad de la mezcla asfáltica en caliente convencional y de la mezcla asfáltica con polímeros elastoméricos reactivos, en zonas de climas cálidos, mediante los parámetros volumétricos de la metodología Marshall, año 2023.

c. Determinar la susceptibilidad a la deformación permanente de la mezcla asfáltica en caliente convencional y de la mezcla asfáltica en caliente con polímeros elastoméricos reactivos, en zonas de climas cálidos, mediante el Ensayo de la Rueda de Hamburgo, año 2023.

1.3 Delimitación de la investigación

1.3.1 Delimitación temporal

Este estudio se realizó en Lima-Perú, de mayo a octubre del año 2023.

1.3.2 Delimitación espacial

Se limitó a la aplicación de los polímeros RET en zonas de climas cálidos en el Perú, donde es común encontrar fallas de deformación permanente muy asociadas a las altas temperaturas y tráfico pesado.

1.3.3 Delimitación temática

El estudio está limitado a los polímeros elastoméricos reactivos que van a brindar una mejoría en las cualidades de la mezcla, para lo cual se analizaron tesis o artículos que hayan estudiado a este polímero y evaluado la cantidad óptima recomendada.

1.4 Justificación e importancia del estudio

1.4.1 Importancia del estudio

Frente al problema indicado son pocas las investigaciones que han estudiado el polímero elastomérico reactivo (RET) sobre todo en zonas de climas calurosos, donde una de las fallas que más se presenta es la deformación permanente. Precisamente, esta investigación está dirigida a estudiar cómo se relaciona el ahuellamiento con las altas temperaturas y mediante un modificador del asfalto usado en las mezclas mejore el desempeño de las mismas.

En su mayoría son estudios sobre polímeros conocidos como SBS, SBR, etc. Por esto, es importante estudiar otros polímeros que también puedan proporcionar las mejoras que éstos brindan e incluso puedan tener mejor desempeño en climas calurosos. La presente investigación propone dar solución al problema general, que es el de obtener mezclas asfálticas en caliente con mejores propiedades mecánicas mediante polímeros RET, para utilizarlas adecuadamente en zonas de climas cálidos.

1.4.2 Justificación

El estudio contribuirá a ampliar el conocimiento sobre el tema de polímeros, pues actualmente en nuestro país no hay un uso muy difundido de ellos. Más aún, el polímero elastomérico reactivo no es muy conocido en Perú, mientras que en otros países de la región hace más de veinte años que se utiliza en vías principales como Brasil, México, Costa Rica, etc. Por otro lado, hay en Perú empresas que ya cuentan con dicho polímero de manera que sí es posible utilizarlo convenientemente.

El estudio servirá de base para las siguientes investigaciones y para ser considerado en los distintos proyectos de carreteras con alto tránsito en zonas con climas calurosos donde se presentan fallas por deformación permanente que acortan la vida útil de las mismas,

generando mayores costos por mantenimiento y con los nuevos conocimientos se podrán resolver en gran medida estos problemas.

Justificación práctica

Este estudio va a servir de ayuda para determinar el polímero más adecuado para cada caso en particular de carretera u otro tipo de vía, tomando en consideración el clima, gradientes de temperatura, tráfico que soportará e importancia de la vía. En el caso de carreteras para tráfico pesado en zonas de climas cálidos, se propone una nueva alternativa mediante el uso de los polímeros RET para que el proyectista pueda analizar y tomar la mejor decisión al elaborar las especificaciones técnicas.

Relevancia social

Esta investigación ayudará a que nuevas carreteras se proyecten con carpetas que puedan cumplir con el tiempo de vida útil usando polímeros, pues éstos resolverán muchos de los problemas expuestos. Con una carpeta asfáltica que soporte mejor los esfuerzos, con mejor desempeño ante los factores climáticos y posibles fallas por el paso de cargas, se podrán reducir costos de mantenimiento.

Aporte

La presente investigación evalúa un polímero poco conocido en el país, pero que por sus características reactivas modifica las cualidades de las mezclas, brindando mejoras en la resistencia referida a la estabilidad y un mejor comportamiento ante la deformación permanente, la cual se presenta con mayor frecuencia en zonas de climas cálidos como el norte de Perú. Por este motivo se considera importante que, mediante estudios y ensayos pertinentes, se incentive el uso de polímeros en vías importantes del país, y en este caso en particular, se pueda recomendar el uso de polímeros RET, como otra alternativa, para carreteras con alto tránsito en zonas con climas cálidos.

1.5 Limitaciones del estudio

Una limitación fue la poca colaboración de las empresas de asfalto en facilitar el asfalto modificado con polímero, evitando así que se efectúe un análisis más exhaustivo. Por este motivo, el estudio se tuvo que apoyar en tesis y artículos científicos, teniendo en cuenta que hayan sido realizadas en los últimos cinco años.

Otra limitación corresponde a los pocos estudios en Perú sobre polímeros RET, pues generalmente se han estudiado el SBS, SBR y EVA. Por este motivo, a pesar de tener una

antigüedad mayor a 5 años, se han incluido algunas investigaciones sobre el polímero RET.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del estudio de investigación

2.1.1 Marco Histórico

a. Historia del asfalto

El asfalto fue empleado para pegar materiales de construcción y luego utilizado en caminos (Múnera, 2012, p.14). En la Tabla 1 presentamos una línea de tiempo.

Tabla 1

Línea de tiempo del asfalto

Época	Lugar	Evento/ Descubrimiento
3000 A.C.	Mesopotamia	Aglutinante y para revestimiento
1550	América	Se encontró asfalto natural en Trinidad
1712	Suiza	Se descubrió el yacimiento de Val de Travers
1781	Francia	Revestimiento de caminos en Burdeos y Lyon
1837	Francia	Adoquinado de asfalto en Plaza de la Concordia
1852	Francia	Carretera Paris-Perpiñán con asfalto
1869	Inglaterra	Se hicieron asfaltados en Londres
1900	Francia	Asfaltado con MAC en calle del Louvre
1902	EEUU	Inicio del empleo de asfalto refinado
1905	EEUU	Primera emulsión asfáltica en Nueva York
1909	Francia	Capa asfáltica de 5 cm en Versalles
1914	Alemania	Tratamiento superficial con emulsión-Hamburgo
1943	EEUU	Uso del método Marshall para las MAC
1970	EEUU	Se inicia el reciclado de pavimentos asfálticos
1987-1993	EEUU	Programa de investigación de carreteras SHRP
1994	EEUU	Tecnología SUPERPAVE
Actualidad	Todo el mundo	El 90% de los pavimentos son asfálticos

Nota. Elaboración propia.

b. Evolución histórica de los polímeros

Los polímeros estuvieron siempre presentes como polímeros naturales. (Múnera, 2012). En la Tabla 2 presentamos una línea de tiempo.

Tabla 2*Línea de tiempo de los polímeros*

Época	Lugar	Evento/ Descubrimiento
Siglo XVI	América	Conocieron el árbol de donde se extraía el látex
1492	Europa	Denominaron caucho al látex
1839	Norte América	C. Goodyear descubrió la vulcanización
1846	Alemania	C. Schönbein descubrió la nitrocelulosa
1860	Europa	Se descubrió el celuloide
1907	Bélgica	Leo Hendrick Baekeland descubrió la baquelita,
1907	Bélgica	primer polímero sintético, similar al plástico
1912	Europa	Se desarrolló el policloruro de vinilo (PVC)
1928	Norte América	W. H. Carothers descubre el nylon
1930	Norte América	W. H. Carothers (DuPont): poliamidas, neopreno
1939-1945	Guerra mundial	Descubrimiento del caucho sintético (SBR)
1955	Alemania	Karl Ziegler obtuvo un polipropileno cristalino
1955-2000	Europa y USA	Nuevos métodos de obtención de polímeros
1974	USA	Desarrollaron polímeros conductores
2000	Norte América	Alan J. Heeger y otros: fibras de alta resistencia
2000 en adelante	Todo el mundo	Se siguen desarrollando polímeros para industria

Nota. Elaboración propia.

c. Uso de polímeros en Perú

En nuestro país se comenzaron a utilizar por el año 2005. Se inicia el interés con la Conferencia del Ing. Néstor Huamán G. en el Congreso de la Asociación Peruana de Caminos (APEC) del año 2005 “Uso de Polímeros para modificar asfaltos”. Se expuso que los polímeros dan solución a las fallas como exudación y deformación permanente, muy comunes en los pavimentos asfálticos de la selva y costa norte. Los polímeros que se usan con mayor frecuencia en Perú son SBS y SBR, siendo el más utilizado el SBS. Por otro lado, en Perú aún no se han realizado tramos para pruebas de desempeño de carpetas en un tiempo determinado y estimar cuánto aumenta la vida útil del pavimento (Huamán, 2022). En cuanto al RET no hay muchas investigaciones en Perú y tampoco una norma específica.

Los asfaltos modificados con polímeros (AMP) están normados en la Sección 431 del Manual EG 2013 “Cemento Asfáltico modificado con polímeros”, donde se señalan los requerimientos para los AMP. (MTC, 2013).

2.1.2 Investigaciones nacionales

Ibáñez (2015) en su tesis de maestría “Uso de polímeros en un nuevo diseño para mejorar las propiedades físico-mecánicas del asfalto: Contribución para el tramo de la Carretera Chilete - Cajamarca” en la Universidad Nacional de Cajamarca, estudió al asfalto base de penetración 120/150 y al modificado con Elvaloy RET (p.7). La finalidad del estudio fue la de mejorar el asfalto base para proponer una alternativa para la carretera en mención. Se usaron contenidos de Elvaloy RET de 1%, 1.1%, 1.2%, 1.3%, 1.4%, 1.5% y 1.6%, todas con ácido poli fosfórico (PPA) al 0.08%. Se hicieron ensayos convencionales y reológicos, concluyendo que la mezcla al 1.3% obtuvo la mejor resistencia. Este estudio tiene relación directa a pesar de ser del 2015, pues evaluó a Elvaloy® 4170, nombre comercial del polímero RET.

Chávez (2019) en su tesis “Mejoramiento del comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica convencional adicionando polímeros Elvaloy 4170 RET para la Av. José Granda, distrito de San Martín de Porres, Lima 2019” experimentó con tres contenidos de polímero de 1.1%, 1.4% y 1.7%. La finalidad de la investigación fue la de conocer de qué manera el polímero modifica la mezcla, para lo cual se evaluaron las mezclas mediante la metodología Marshall. Se encontró que con Elvaloy 4170 mejoró notablemente la estabilidad y la trabajabilidad, concluyendo que la cantidad óptima es 1.4%. Con 1.7%, la estabilidad disminuyó. El estudio tiene relación directa pues estudió al polímero RET y afianza la recomendación de no usar contenidos mayores.

Villafana y Ramírez (2019) en su trabajo de grado “Análisis del comportamiento de una mezcla asfáltica modificada con polímeros SBS Betutec IC y una mezcla asfáltica convencional 60/70”, trabajaron en forma experimental con dos tipos de mezclas. La finalidad fue la de conocer cuál mezcla tuvo el mejor comportamiento. Mediante ensayos Marshall concluyeron que la mezcla con la modificación (de 3.5% SBS) tuvo mejor comportamiento, al igual que en la rueda de Hamburgo. Esta investigación es de utilidad porque estudió una mezcla modificada con polímero incluyendo una prueba de desempeño para comprobar los resultados.

Huari (2020) en su tesis “Análisis y Evaluación del desempeño de una mezcla asfáltica en caliente con RAP y una mezcla asfáltica modificada con polímero SBS PG

70-28” de la Universidad Ricardo Palma, experimentó con dos tipos de mezclas modificadas, una con pavimento reciclado (RAP) y otra con el asfalto Betutec IB (previamente modificado por el proveedor con SBS). Se realizaron ensayos a cuatro mezclas. Una mezcla patrón con Betutec que corresponde a un asfalto PG 70-28. Luego tres mezclas con 20%, 30% y 40% de RAP con el ligante Betutec y aditivos rejuvenecedores de asfalto. Se realizaron ensayos convencionales y reológicos a los asfaltos modificados. También, ensayos Marshall y pruebas de desempeño: Rueda de Hamburgo y Módulo Resiliente. Concluyó que es posible utilizar pavimento reciclado en mezclas, con contenidos entre 20% y 40% máximo, y que se obtiene un desempeño adecuado si se usa aditivo rejuvenecedor de asfalto. Según el ensayo respectivo se obtuvo que la deformación (ahuellamiento) no incrementó mucho con respecto a la mezcla patrón. Esta investigación guarda relación con la presente, porque se estudiaron mezclas modificadas, mediante Marshall y pruebas de desempeño.

Broncano y Campos (2021) presentaron su tesis “Influencia del cemento asfáltico modificado con polímeros SBS y ELVALOY sobre las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente”. La finalidad fue conocer la cantidad óptima de ligante modificado y cómo influyen en las mezclas, por medio de ensayos tradicionales y de performance. Concluyeron que las dos mezclas con SBS y RET tuvieron aumento en la estabilidad en 12% y un buen desempeño. Las mezclas con SBS aumentaron en 6% el desempeño, mientras que las mezclas con Elvaloy RET se comportaron de forma similar en la humedad, pero no de la misma forma al congelamiento. Este estudio guarda relación directa ya que experimentó con Elvaloy que corresponde al polímero RET y verifica que éste no se recomienda para bajas temperaturas.

2.1.3 Investigaciones internacionales

Franco et al. (2015) en su tesis de especialización “Estudio de la incidencia del Elvaloy en las propiedades reológicas del concreto asfáltico y del asfalto de la Planta de Barrancabermeja” en Colombia, trabajaron con dos mezclas, una convencional con CAP 60/70 y otra con Elvaloy RET. El objetivo fue evaluar cómo incide el RET en las características del asfalto y de la mezcla. Usaron Elvaloy 4170 de 1.0% a 1.5 % y PPA de 0.3% a 0.6%. El asfalto modificado tuvo menor penetración, mayor viscosidad. En la prueba de tracción indirecta (TI) la mezcla modificada tuvo mejor rendimiento. Se concluyó que el polímero RET tuvo un 18% de aumento en la estabilidad y mejor adherencia asfalto-agregados. Pero, hubo dificultad en el uso del catalizador y en el

mezclado. Esta investigación, a pesar de ser del 2015 se toma en cuenta, pues guarda relación directa con la actual ya que estudió al RET, observando que no sólo incide en la estabilidad sino también en la adherencia con el agregado.

López y Puma (2017) en su tesis “Caracterización de MAC elaboradas con cemento asfáltico modificado con polímeros SBS y RET, mediante la determinación del módulo de rigidez” (Ecuador), ensayaron contenidos de SBS de 2%, 3% y 4% y para Elvaloy 4170 (RET) de 1%, 1.3%, 1.5% y 2%. La finalidad fue analizar propiedades de las mezclas modificadas en comparación con una mezcla patrón con asfalto AC-20 y evaluarlas mediante el módulo de rigidez a distintas temperaturas. Además, del Marshall, se hizo TI y desgaste Cántabro para observar la cohesión. Los contenidos óptimos en base a desempeño fueron 3% SBS y 1.3% de RET. Ambas mezclas modificadas tuvieron incremento de resistencia, pero en el ensayo de TI el RET tuvo mejor comportamiento. Según el ensayo Cántabro, la mezcla con RET tuvo menor pérdida por desgaste mostrando mejor cohesión. Mediante un diseño de pavimento por la metodología AASHTO 93, hallaron que el espesor de la carpeta con RET es 20% menor al de una carpeta con mezcla convencional y 10% menor que una con SBS. En cuanto a costos, el M3 de mezcla con SBS fue 64% mayor y 62% con RET. El costo por M2 de la carpeta aumentó en 34% con SBS y en 21% con RET. Esta investigación es de utilidad pues hace una comparación entre SBS y RET. Se obtiene un contenido óptimo de 1.3% RET en base a pruebas de desempeño y se verifica que el espesor de la carpeta con RET se puede reducir.

Chen Tan (2018) estudió tres polímeros, en su tesis de Licenciatura “Determinación de la propiedad de adhesión de asfaltos modificados con distintos tipos de polímeros en diferentes agregados y acondicionamiento, utilizando las técnicas de ensayo de Adherencia de Bitumen y Goniometría” (UCR). La finalidad fue conocer la adherencia de los asfaltos con diferentes agregados. Se utilizó asfalto AC-30. Se modificaron asfaltos con: 2% de SBR, 2.5% de SBS y 1% de RET con 0.2% de PPA (p.30). Se realizó el ensayo de adherencia (ABS) que mide la fuerza para apartar el asfalto del árido. El ligante con RET tuvo el mayor valor para todos los agregados, que indica la mejor adherencia. Se midió el ángulo de contacto para predecir la interacción asfalto-agregado. El ligante con RET tuvo la mayor viscosidad, luego con SBS y SBR. (p.56-57). Concluyó que los tres asfaltos modificados tuvieron desempeño adecuado a temperaturas $< 76^{\circ}\text{C}$ y $> -22^{\circ}\text{C}$. Con RET tuvo mejor adhesión y mejor afinidad y el agregado que tuvo un mejor efecto fue el silíceo, respecto del calizo. Se determinó que

el RET tuvo mejores resultados que el SBS y el SBR sin importar el agregado o la condición de la prueba, seco o húmedo (p. 81). El estudio guarda relación directa, pues se evalúa al RET, aporta información sobre la adherencia asfalto-agregado y explica químicamente la unión asfalto-RET.

Hernández (2019) en su tesis “Modelo simplificado de daño viscoelástico continuo aplicado al análisis de mezclas asfálticas” (México) estudió tres mezclas, una con PPA, otra con terpolímero de etileno reactivo (RET) y otra con SBS. Evaluó el daño por fatiga con un modelo viscoelástico S-VECD y simuló el comportamiento de una sección de pavimento con un método empírico-mecanicista. Concluyó que las mezclas con RET y SBS tuvieron buen desempeño en comparación con la mezcla patrón con asfalto PG 64-26 y con la de PPA. La mezcla con RET (PG 76-22) tuvo la mejor resistencia al daño por fatiga y las simulaciones indicaron que la fisuración iniciaría a los 10 años. (p.144)

Galindo (2020) en su tesis (Maestría) “Evaluación de mezclas asfálticas mediante tensión indirecta y resistencia al desgaste empleando asfaltos modificados” (México) estudió tres mezclas, una convencional, una con Elvaloy 4170 (RET) y otra con Elvax 240 (EVA). La finalidad fue determinar la estabilidad y el rendimiento de las mezclas. Concluyó que las mezclas con RET tuvieron mejor desempeño, adecuada resistencia al desgaste, a la tensión y la capacidad estructural mejoró un 30%. Este estudio tiene relación directa pues evaluó el polímero RET con pruebas de desempeño.

2.1.4 Artículos relacionados

Kaa, Mogoruzza y Anguizola (2016) estudiaron tres mezclas modificadas con asfalto base AC-30. Los polímeros fueron: SBR al 1%, 2% y 3%, el terpolímero de etileno (muestra A1) al 0.5%, 1%, 1.5% y 2% y el terpolímero Elvaloy RET. Se evaluó el Módulo Resiliente de las tres, dos con Elvaloy y una con SBR. Se hizo el diseño AASHTO del pavimento y se vio que las dos mezclas con Elvaloy RET reducen el espesor de la carpeta en 26.7% y 35.7%. Concluyó que todos los polímeros tuvieron mejoras en el ligante y el módulo de la mezcla, con lo que se reduce el espesor de la carpeta. Este artículo, a pesar de ser de 2016, es relevante porque evaluó el polímero RET, por medio del módulo resiliente de la mezcla, demostrando que se pueden reducir espesores y, por lo tanto, el costo de la carpeta.

Salazar et al. (2017) del Lanamme UCR, presentaron una metodología para cuantificar partículas de polímero en asfalto modificado con polímeros SBR, SBS, EVA

y Elvaloy RET, con el equipo del ensayo de partículas de aditivo (PAT). Se realizaron mezclas, una con 2% SBS y la otra con Elvaloy RET al 1,4 %. Se concluyó que el método funciona con SBR, pero no se logra con el SBS ni Elvaloy RET, por eso se cree que se asocian a ambos, máltenos y asfáltenos, en proporciones indefinidas.

Flores, Delgado y Gómez (2018) estudiaron al polímero Elvaloy RET y el desempeño de la mezcla con la rueda de Hamburgo, con la finalidad de conocer si la gradación y la temperatura influyen en el ensayo, y ver si es necesario realizarlo a diferentes temperaturas según el grado de PG. Se utilizaron dos tipos de agregados, un asfalto PG 64-16 con promotor de adherencia y un asfalto PG 76-16 modificado con Elvaloy (0.75%). La mezcla con PG 76-16 y 0.75% Elvaloy RET obtuvo mejor desempeño. (p.13)

Vila y Jaramillo (2018) en su artículo estudiaron el CAP y su comportamiento con tres diferentes modificadores, a través de la viscosidad, PG y un estudio reológico con diagramas de Black. Observaron que el ligante PG 64-28 con cualquier modificador siempre aumentó el grado superior de PG a 76., pero se mantuvo el grado inferior en -28 para Elvaloy y para caucho. Para el SBS aumentó a -22. Los resultados indicaron que los ligantes modificados tienen mejor comportamiento. Este artículo es relevante porque ensayaron mezclas modificadas con 3% SBS y 1.3% Elvaloy RET.

Geçkil (2019) estudió las propiedades reológicas del ligante con Elvaloy (RET). Se hicieron pruebas especializadas como difracción de rayos X, microscopía electrónica, ensayos convencionales y reológicos con DSR, BBR y con envejecimiento. Concluyó que los asfaltos con Elvaloy RET se comportaron como una fase homogénea y que son más rígidos que los convencionales, con mejor capacidad ante el envejecimiento y menor sensibilidad térmica. Además, resultaron más resistentes al ahuellamiento y a la fisuración por fatiga. Se vio que el grado superior de PG también aumentó, sin embargo, su resistencia a la fisuración a baja temperatura disminuyó.

Münkel et al. (2021) estudiaron varios polímeros y aceite de cocina usado para lograr un mejor desempeño ante la deformación permanente de los asfaltos. Utilizaron 1% y 4% de SBS, 0.8% y 1.8% RET, añadidos al asfalto ya con 3.5% de aceite de desecho de cocina. Al adicionar RET al asfalto con aceite se obtuvo un incremento de 2° en el grado superior de PG. Se demostró que con el polímero RET se obtiene una unión más estable. Se concluyó que el aceite de cocina reusado con asfalto es buena opción pues ofrece una solución al problema de la disposición de este residuo. (p.80)

Joohari et al (2022) estudiaron la estabilidad al almacenamiento del CAP modificado con SBS y desechos plásticos mediante el uso del RET. La finalidad fue reducir la separación de fases del asfalto modificado con SBS y Polietileno de baja densidad lineal reciclado (R-LLDPE), con adición de RET para compatibilizar la mezcla. Se hicieron pruebas reológicas y químicas para evaluar la estabilidad al almacenamiento. Por medio de microscopía de fluorescencia se observó una sola fase continua con dispersión homogénea de polímeros, pues el RET tiene la capacidad de entrecruzar químicamente polímeros y asfalto. Se concluyó que la cantidad óptima fue 1% de RET con 0.2% de PPA para mejorar la estabilidad al almacenamiento, mientras que con un contenido mayor existe la posibilidad de formación de gel.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Pavimento asfáltico

Es una estructura formada por varias capas distintas que está diseñada para soportar cargas de tránsito y condiciones del clima, cuya capa superior denominada carpeta de rodadura, es de material asfáltico. Se denomina así a la carpeta asfáltica porque es la que hace contacto con las llantas de los vehículos. Por debajo de la carpeta presenta capas de otro material denominadas base y sub base (Bariani et al., 2010). La subbase es normalmente de material granular, pero la base puede ser de material granular o ser una base negra con asfalto, en cuyo caso se tendría un “pavimento mixto”. Existe también un pavimento de material asfáltico en todo el espesor denominado “Full Depth”. (Asphalt Institute, 1991)

El pavimento asfáltico debe proporcionar una superficie suave, segura, confortable y ser técnicamente económico (Arellano y Cáceres, 2018). El diseño del pavimento corresponde al cálculo de los espesores de cada capa estructural y depende de la capacidad portante de la subrasante, de los materiales y del tráfico en el periodo de diseño. La elección del tipo de asfalto también depende del clima del lugar. (Montejo, 2002)

En general, un pavimento debe contar con un diseño integral (estudios de suelos, de canteras, de tráfico, de espesores, de obras de arte, etc.) y debe tener un buen sistema de drenaje que mantengan la estabilidad y durabilidad de la estructura, como el bombeo de la superficie y las obras de arte. (Montejo, 2002)

En un pavimento asfáltico “convencional”, el paquete estructural está formado por carpeta de rodadura, base granular y sub base granular, y va apoyado sobre la subrasante

o terreno de fundación (Huamán, 2022). El paquete estructural es el que va a absorber los esfuerzos compresionales (verticales) y tensionales (horizontales) que generan los vehículos. Cabe resaltar que la subrasante no forma parte del paquete estructural, pues normalmente está conformado por un suelo de baja capacidad portante que no está preparado para soportar esfuerzos. (Bariani et al., 2008)

En el caso de pavimentos no convencionales, la base puede ser estabilizada para mejorar la capacidad portante del material granular, es decir su CBR. Se puede estabilizar con cemento Portland, cal hidratada, aditivos químicos, incluso con emulsión. Con esto se logra aumentar el CBR, con el cual se puede correlacionar con el módulo resiliente, valor necesario para el diseño de espesores. (Huamán, 2022)

a. Componentes del paquete estructural (convencional)

Iniciando desde la subrasante hacia arriba las capas son:

- **Sub Base Granular:** capa que se asienta sobre la subrasante, compuesta por un material granular compactado, con capacidad portante menor que el de la base granular y de material más permeable que la base. Funciona como filtro evitando que los finos de la fundación ingresen a la base y no se afecte su calidad (Vílchez y Yerén, 2022, p.19). Otra función de esta capa es la de disminuir el costo del pavimento, pues aporta capacidad portante con un mayor espesor, pero con un material de menor calidad, que contribuye a asumir parte de los esfuerzos compresionales (Montejo, 2002, p.4). El material de subbase debe cumplir los requerimientos del Manual EG 2013, Sección 402. (MTC, 2013)
- **Base Granular:** capa que va sobre la sub base, bajo la carpeta asfáltica, compuesta por material granular de mejor calidad compactado, con capacidad portante mayor a la de la subbase. Esta capa va a absorber una parte de los esfuerzos compresionales y no soporta ningún esfuerzo tensional. Contribuye al espesor de diseño del pavimento, y de la misma forma que la subbase, ayuda a economizar el costo del pavimento (Rondón y Reyes, 2015). El material de base debe cumplir los requerimientos del Manual EG 2013, Sección 403. El CBR de la base debe ser mínimo 80% de acuerdo a lo indicado en el manual. (MTC, 2013)
- **Carpeta asfáltica o Capa de rodadura:** capa superior que recibe las cargas de los vehículos y está constituida por una mezcla asfáltica compactada formada básicamente por agregados de buena calidad, asfalto y filler. La carpeta asfáltica

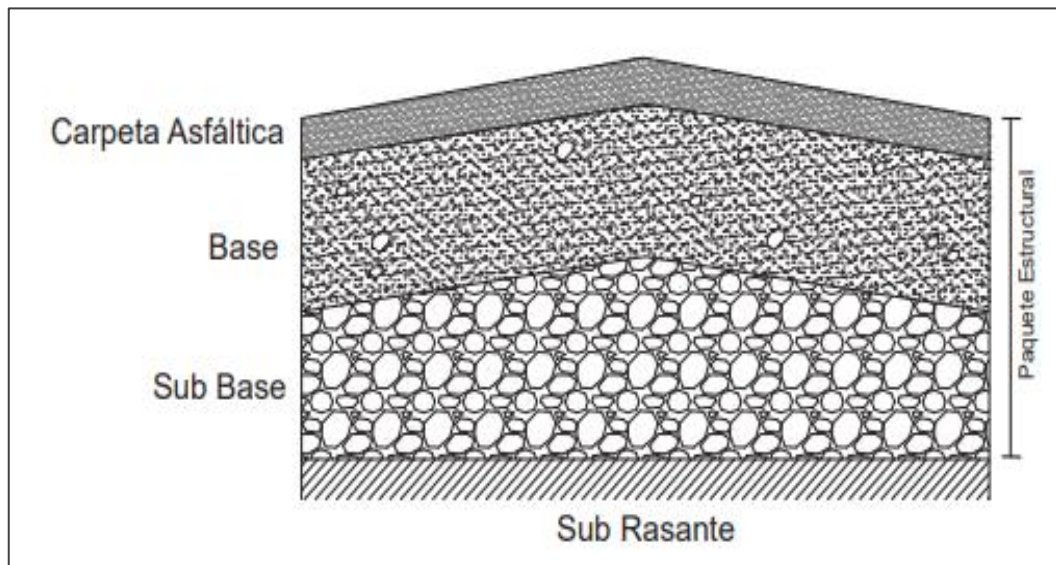
además de brindar una superficie suave, de textura adecuada (con cierta rugosidad, no muy lisa), impermeable al paso del agua y aire, debe resistir el desgaste a la abrasión provocada por el tránsito. Absorbe el total de los esfuerzos tensionales generados al paso de los vehículos y gran parte de los esfuerzos compresionales. (Asphalt Institute, 1991)

Antes de colocar la carpeta asfáltica, se hace un riego de imprimación con un asfalto diluido o emulsión asfáltica que debe penetrar unos milímetros en la base para impermeabilizarla, servir de adherencia y para conglomerar los finos que quedaron en ella por los trabajos de compactación. (Huamán, 2022)

Se presenta una sección de pavimento asfáltico convencional con las tres capas conformantes del paquete estructural, apoyado sobre la subrasante en la Figura 1.

Figura 1

Pavimento asfáltico como paquete estructural



Nota. Elaboración propia.

b. Esfuerzos tensionales y compresionales en el paquete estructural

Los esfuerzos tensionales que inducen los vehículos al pavimento se aplican en las zonas inferiores de la carpeta (en pavimentos convencionales) o de otra capa bituminosa (como bases negras). Son asumidos por la carpeta asfáltica (o por las capas con asfalto). Estos esfuerzos al no poder ser asumidos por el material granular, generan fisuras de abajo hacia arriba, que luego se verán reflejadas en la superficie de la carpeta. Son los que generan

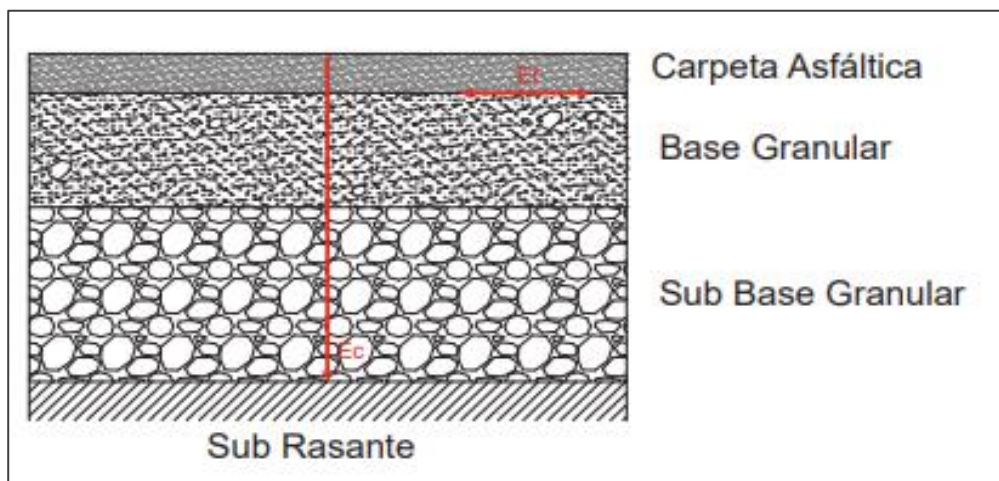
las fallas funcionales como: fisuras longitudinales, fisuras transversales, piel de cocodrilo, desprendimientos, etc. (Huamán, 2022)

Los esfuerzos compresionales verticales atraviesan todas las capas del pavimento. Deben llegar a la subrasante con valor mínimo pues ésta no tiene mayor capacidad portante y fueron asumidos por el paquete estructural. Son los que originan las fallas estructurales como hundimientos, huecos, ahuellamientos (por deficiencias en la mezcla) o del tipo estructural. (Morea, 2011; Huamán, 2022).

Se presentan los esfuerzos en la Figura 2, donde E_c representa a los esfuerzos compresionales y E_t a los esfuerzos tensionales.

Figura 2

Esfuerzos tensionales (horizontales) y compresionales (verticales)



Nota: Elaboración propia.

2.2.2 Carpeta asfáltica

Esta capa está constituida por una mezcla asfáltica compactada, la cual consiste en una combinación de agregados gruesos, finos, filler y ligante asfáltico. En una mezcla asfáltica en caliente (MAC), se usa como ligante el CAP, se efectúa la mezcla a 160°C y se extiende a 140°C. (Huillcapoma y Figueroa, 2022)

Para preparar las MAC se usan generalmente mezclas densas, con granulometría cerrada y aproximadamente con 4% de contenido de vacíos, para que la carpeta sea impermeable. Esta mezcla es diseñada en laboratorio a través de Marshall, controlada in situ y todos sus componentes son verificados con ensayos especificados en las normas, como será desarrollado más adelante. Se tienen varios tipos de mezclas. Según la temperatura de preparación: mezclas en caliente, en tibio y en frío. Otros tipos son las mezclas drenantes

(con mayor contenido de vacíos para drenar el agua y eviten el hidropneumático), mezclas SMA (con fibras), mezclas con asfaltos modificados con polímeros, etc. (Huamán, 2022)

a. Materiales que conforman una MAC:

- **Agregado grueso:** material granular retenido en la malla N°4, de preferencia chancado y resistente a la abrasión.
- **Agregado fino:** material granular pasante por la malla N°4 y retenido en la N°200. Corresponde a arena de trituración o mezclada con arena natural y libre de algún material que pueda afectar la adherencia con el asfalto.
- **Filler mineral:** relleno mineral con granulometría muy fina pasante por el tamiz N°200, para cerrar la granulometría de los áridos. Se usa normalmente cemento Portland o cal hidratada. (MTC, 2013)
- **Cemento asfáltico de petróleo (CAP):** ligante que va a mantener unidos los agregados, cuya calidad se elige de acuerdo al clima (Huamán, 2022). Deberá cumplir con los requisitos de 415.02 y 423.02 del Manual EG 2013. (MTC, 2013)
- **Aditivos o modificadores:** cuando se requiera, la mezcla puede contener aditivos (como mejoradores de adherencia) o también modificadores de asfalto (polímeros o caucho) para mejorar algunas propiedades específicas de la mezcla ante mayor tráfico o climas con gradientes térmicos. (Huamán, 2022; MTC, 2013)

2.2.3 Agregados pétreos

La importancia de los agregados reside en que conforman alrededor del 90% de la mezcla, siendo el esqueleto de la mezcla prácticamente. Además, también inciden en la estabilidad ya que ésta última está relacionada con la fricción de los áridos y con la cohesión. En general, si un agregado es redondeado no genera fricción, entonces, si es más angular y tiene textura más áspera se originará mayor fricción y, por lo tanto, mayor estabilidad. Incluso también la gradación ejerce una influencia en la mezcla. En el caso del agregado fino si tuviera mucha arena tamaño mediano dificulta la compactación de la mezcla perjudicando la resistencia. (Huilcapoma y Figueroa, 2022)

Las propiedades de los agregados que deben ser cuidadas son:

- Granulometría: gradación densa para reducir los vacíos con tamaños menores.
- Limpieza: libre de cualquier material dañino u orgánico.

- Contenido de arcilla: su la presencia puede causar daños por humedad a la mezcla. Se controla con el ensayo del equivalente de arena.
- Forma y angularidad del agregado: que afectan la trabajabilidad y resistencia de la mezcla; los agregados triturados tienen más caras angulares, generando mayor resistencia.
- Cantidad de partículas chatas y alargadas
- Dureza: resistentes a la abrasión, verificada con el ensayo de Los Ángeles, que se usa como un indicativo de la calidad del árido.
- Textura: pues afecta la adherencia.
- Absorción: un agregado muy poroso va a absorber mucho asfalto y va a consumir parte del asfalto necesario para cohesionar la mezcla.
- Afinidad con el asfalto: deben ser hidrofóbicos para que sean afines con el asfalto, como las calizas, dolomitas y otras. (Instituto del Asfalto, 1992)

a. Agregado mineral grueso

Material de gradación gruesa retenido en la malla N°4, triturado o de grava natural, limpio sin polvo ni arcilla que perjudique la adherencia, durable, resistente a la abrasión y no muchas partículas chatas y alargadas. Debe cumplir con los requisitos de la Secciones 415.02 y 423 del Manual EG 2013 del MTC. Los requisitos para agregados gruesos están indicados en la Tabla 423.01 del Manual de Carreteras EG 2013 mostrada en la Figura 3.

Figura 3*Requisitos de los agregados gruesos*

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

* Excepcionalmente se aceptarán porcentajes mayores sólo si se aseguran las propiedades de durabilidad de la mezcla asfáltica.

- La adherencia del agregado grueso para zonas mayores a 3000 msnm será evaluada mediante la performance de la mezcla según lo señalado en la Subsección 430.02.
- La notación "85/50" indica que el 85% del agregado grueso tiene una cara fracturada y que el 50% tiene dos caras fracturadas.

Nota. MTC (2013)

b. Agregado mineral fino

Agregado que pasa por la malla N°4 y es retenido en la malla N°200. Corresponde a arena de trituración o mezclada con arena natural (que no exceda del 50% del peso de toda la arena) y limpios, sin ningún material que afecte la adherencia con el asfalto. Los granos deben ser duros, rugosos y angulares. Debe cumplir con lo especificado en las secciones 415 y 423 del Manual EG 2013. Los requisitos están indicados en la Tabla 423.02 del Manual de Carreteras EG 2013. Ver Figura 4.

Figura 4*Requisitos de los agregados finos*

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

**Excepcionalmente se aceptarán porcentajes mayores sólo si se aseguran las propiedades de durabilidad de la mezcla asfáltica.

- La adherencia del agregado fino para zonas mayores a 3000 msnm será evaluada mediante la performance de la mezcla, Subsección 430.02.

Nota. MTC (2013).

c. Filler mineral

Es un material llenante pasante por la malla N°200. Puede provenir de la trituración, que no sea plástico. Generalmente se usa cemento Portland o cal hidratada. (MTC, 2013) La inclusión de filler es muy importante pues junto con el CAP forman una capa delgada de recubrimiento en la superficie de los áridos denominada “mástico asfáltico” para cohesionar a los áridos al momento de la compactación de la mezcla. El filler llena los vacíos del agregado, ayuda a la impermeabilidad, a la densificación del esqueleto de áridos mejorando la estabilidad de la mezcla y facilita la compactación porque brinda una suerte de rodamiento entre los agregados. (Morea, 2011, p.20)

La combinación de agregados y filler debe cumplir con alguna gradación para la MAC de la Tabla 423.03. Además, el material combinado no debe contener arcillas, como máximo 1% de material no apropiado. (MTC, 2013) Ver Figura 5.

Figura 5

Gradación de la combinación de agregados para las MAC

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

Nota. Tabla 423-03. MTC (EG 2013).

2.2.4 Cemento asfáltico de petróleo (CAP)

El asfalto es un compuesto viscoso color oscuro, constituido por una mezcla compleja de hidrocarburos (sustancias formadas sólo de átomos de Carbono e Hidrógeno) con peso molecular elevado. Lo encontramos en depósitos naturales o es obtenido por destilación artificial del crudo. (Múnera, 2012, p.14)

El CAP es el asfalto producido en las refinerías mediante la destilación del crudo. Además de carbono (C) e hidrógeno (H), contiene azufre (S), nitrógeno (N), oxígeno (O) y algunos metales. Aproximadamente, contiene C: 82–88%, H: 8-11%, S: 0-6%, O: 0-1.5% y N: 0-1%, dependiendo del crudo de origen. (Guerrero, 2019, p.26)

Presenta consistencia y características aglutinantes e impermeabilizantes con consistencia para usarse en pavimentación (Martínez, 2021). Ningún otro material realiza de mejor

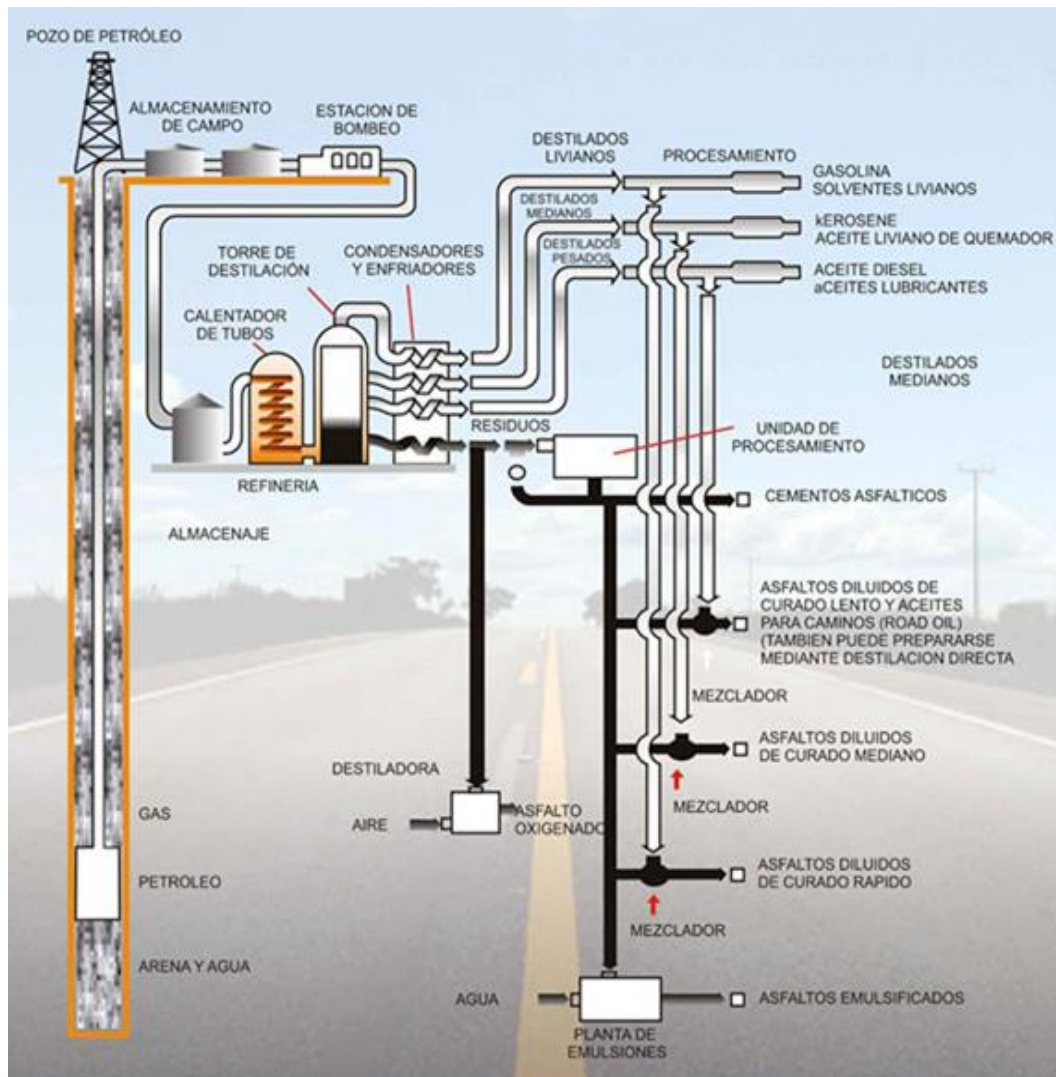
manera estas dos funciones: aglutinar a los áridos e impermeabilizar el pavimento, a la vez que le brinda flexibilidad y durabilidad. (Bariani et al., 2008)

a. Origen, composición química y propiedades del CAP

El CAP se obtiene del residuo luego de extraer los componentes más ligeros del petróleo por medio de la destilación primaria para después hacer una segunda destilación. El residuo que ha quedado en la torre de destilación primaria es luego destilado al vacío (26 mm de Hg de presión) y a altas temperaturas. (Frangie, 2018, p.22). Ver Figura 6.

Figura 6

Destilación del petróleo para obtener el cemento asfáltico y derivados



Nota. Asfaltos Petroperú (2023) <https://asfaltos.petroperu.com.pe>

Luego de obtener el CAP, en la refinería se suelen obtener los ligantes asfálticos diluidos (recortados o Cut Backs) al mezclarlo con algún derivado del petróleo. Se obtienen los ligantes de curado rápido, medio y lento (RC, MC y LC), mezclando el CAP con gasolina, kerosene y Diesel, respectivamente (Instituto del Asfalto, 1992). Además, se pueden obtener las emulsiones asfálticas, que consisten de CAP más agua y un emulsificante. Los diluidos y emulsiones se usan para tecnología en frío (mezclas en frío, riegos de liga, imprimación, tratamientos asfálticos, slurry seal). Sin embargo, los ligantes recortados ya no deben utilizarse pues al evaporar el disolvente causa daños a la salud y contamina el ambiente. En su lugar, se deben usar emulsiones, pues cuando rompen, lo que se evapora es agua. (Huamán, 2022)

Composición química del CAP:

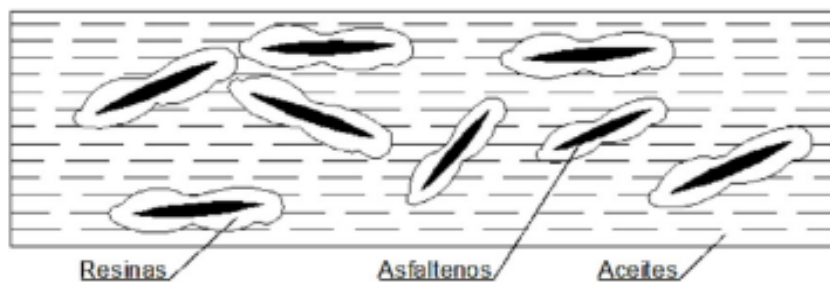
Constituida por cuatro grupos, conocidos como fraccionamiento SARA por sus iniciales: Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfáltenos. (Palma et al., 2015, p.120). La complejidad, polaridad y peso molecular aumentan de la siguiente forma: $S < A < R < A$.

El CAP se puede separar en dos fracciones mediante el solvente heptano: asfáltenos y máltenos. La fracción más pesada y polar son los asfáltenos. La fracción liviana son los máltenos y se divide en saturados, aromáticos y resinas. Además, el CAP es un sistema coloidal formado por fases: una fase continua compuesta por los máltenos y otra discontinua por los asfáltenos. La fase malténica envuelve a los asfáltenos y los hace más solubles. Las resinas son intermediarias, pues rodean, homogenizan y separan a los asfáltenos. (Palma et al., 2015, p.120)

Ver la composición en la Figura 7, donde los aceites incluyen a los saturados y los aromáticos.

Figura 7

Esquema coloidal de la estructura del asfalto



Nota. Bustos et al. (2018)

Los componentes del fraccionamiento SARA son:

Saturados: son los compuestos más ligeros, incoloros, de consistencia grasa y con polaridad baja. Contienen parafinas, con algunas cadenas cíclicas y largas cadenas que pueden formar cristales.

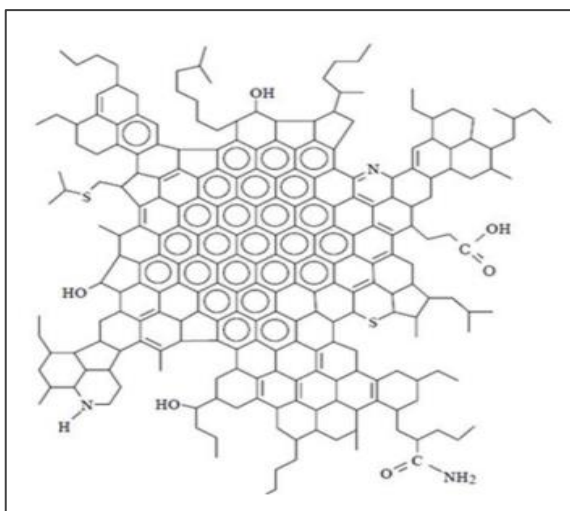
Aromáticos: aceites viscosos marrón oscuro. Contienen anillos aromáticos ligados a cadenas de C y H, abiertas o cerradas. Tienen trazas de O, N y S, con pesos moleculares similares al de los saturados. Los aceites (saturados y aromáticos) le dan al asfalto características de deformabilidad y lo protegen de la oxidación.

Resinas: sólidos o semisólidos negros pegajosos, solubles en n-heptano de naturaleza polar. Encargadas de dispersar a los asfáltenos, responsables de la adherencia y con cualidades cementantes. Compuestas principalmente de H y C, con trazas de O, S y N, con estructura química similar a los asfáltenos, pero con menos anillos aromáticos. (Múnera, 2012, p.22)

Asfáltenos: sólidos marrones o negros, amorfos, muy polares, con pesos moleculares altos. Son las moléculas más complejas del asfalto, su estructura es muy variable pues depende del crudo de origen. Responsables de la viscosidad del CAP y su contenido influye en las características reológicas. (Guerrero, 2019, p.26-27). Tienden a juntarse formando micelas (aglomerado de moléculas) que hacen difícil su separación. Estructura química con muchos anillos aromáticos y cadenas laterales de heteroátomos de N, S, O. Los heteroátomos están dispuestos en grupos funcionales como: carboxilo (COOH), hidroxilo (OH), cetonas y otros (Múnera, 2012, pp.20-21). Ver Figura 8.

Figura 8

Modelo de la estructura de una molécula de asfalteno



Nota. Da Silva & Morales (2017).

En la Tabla 3 se resume la composición del CAP, donde El PM (Peso molecular) y la polaridad aumentan de arriba hacia abajo.

Tabla 3

Composición química del cemento asfáltico

Grupo	Fracción	Subgrupo	Características	Función
		Saturados 5-15%	Consistencia grasa Ligeros. Incoloros H/C= 1.9 a 2 PM = 300 a 2000	Afectan negativa- mente la susceptibilidad térmica. Contienen parafinas
Máltenos	Liviana	Aromáticos 30-45%	Aceites viscosos Color café oscuro Cadenas no polares Anillos insaturados H/C=1.5 PM = 300 a 2000	Medio de dispersión de asfaltenos y resinas. Encargados de viscoelasticidad y la deformabilidad
		Resinas 30-45%	Sólidos negro/pardo Solubles en n-heptano H/C= 1.1 a 1.2 PM = 500 a 50000	Cementante, encargadas de la adherencia y ductilidad
Asfáltenos	Pesada	A 5-20%	Sólidos duros Amorfos oscuro Color oscuro Muy polares H/C = 1.1 PM = 1000 a 100000	Encargados de la dureza y la viscosidad Disminuyen la susceptibilidad a la temperatura

Nota: Elaboración propia. H: Hidrógeno y C: Carbono.

La composición del asfalto es importante porque determina el comportamiento viscoelástico y características reológicas, que van a predecir su desempeño a futuro. Un CAP con muchos aceites será muy deformable y uno con más asfaltenos será más viscoso. Además, la proporción de asfaltenos-maltenos cambia con la oxidación o al perderse los

maltenos por altas temperaturas. Con el envejecimiento ocurren cambios en el asfalto, los aceites van convirtiéndose en resinas y las resinas en asfáltenos, de modo que la viscosidad aumenta alterando las propiedades. (Rondón y Reyes, 2015, p.252)

Propiedades del CAP

Los CAP tienen, entre otras, las siguientes propiedades:

- **Viscosidad:** resistencia a deformarse, medida de la consistencia, es más consistente un CAP con mayor viscosidad. La viscosidad del CAP disminuye al aumentar la temperatura. A menor penetración, más viscoso (más rígido) es el CAP. (Rondón y Reyes, 2015, pp. 7-11)
- **Penetración:** medida de la consistencia del asfalto. Se halla tomando la longitud de una aguja estándar que ingresa a la muestra por 5 segundos a 25°C. La penetración disminuye cuando la viscosidad aumenta. (Huari, 2020, p.26)
- **Susceptibilidad térmica:** característica por la cual la viscosidad es variable con la temperatura. A temperaturas altas se comporta como líquido viscoso y tiende a fluir (presenta exudación o deformaciones plásticas) y a temperaturas bajas se vuelve rígido (presentando fisuración por contracción térmica). (Huamán, 2022)
- **Ductilidad:** determinada por la longitud que se puede alargar una muestra de asfalto estirada por sus extremos a velocidad constante, antes de romper. Es necesario que el ligante tenga ductilidad para que no se produzcan grietas y para brindar mejores propiedades aglomerantes. Pero, una ductilidad excesiva no es conveniente por posibles deformaciones. (Guerrero, 2019, p.30-31)
- **Durabilidad:** medida de la capacidad del asfalto para mantener sus características iniciales ante procesos normales de envejecimiento o degradación. (Instituto del asfalto MS-22, 1992, p.18)
- **Adhesión:** característica del asfalto por la cual puede adherirse al agregado. (Instituto del Asfalto MS-22, 1992, p. 18)
- **Cohesión:** característica del asfalto de conservar unidas las partículas de los áridos en la carpeta. (González y Luquillas, 2019, p.21)
- **Envejecimiento:** el asfalto se envejece rápidamente y más aún al ser sometido a altas temperaturas. Al envejecer se pone rígido y endurece por la pérdida de maltenos, disminuye su ductilidad y recuperación elástica, de modo que la mezcla es menos resistente a daños por fatiga. La causa principal del envejecimiento es la oxidación

que, está relacionada con los vacíos en la mezcla. Es un fenómeno que se da en toda la vida del asfalto, en el mezclado, proceso constructivo y tiempo de servicio del pavimento, pero se acelera en climas cálidos. (Montejo, 2002, p.668)

- **Afectado por la oxidación y foto degradación:** las moléculas del asfalto reaccionan con el oxígeno, evaporándose los componentes ligeros lo cual rigidiza al asfalto y origina un proceso de envejecimiento. La oxidación causa endurecimiento y produce agrietamiento sobre todo a bajas temperaturas. La foto degradación se refiere al envejecimiento por su exposición a la luz solar, ligado a la temperatura ambiental. Durante el envejecimiento la proporción y las características de las fracciones del asfalto cambian. La proporción de saturados disminuye durante el proceso de mezclado y se mantiene estable a largo plazo, mientras que los asfaltenos no varían en el mezclado, pero aumentan a largo plazo. (Rondón y Reyes, 2015, p.247-252).

En general, el asfalto presenta fortalezas como su consistencia, adhesividad, pero tiene debilidades como la susceptibilidad térmica, viscoelasticidad, poca recuperación elástica, etc. Estas debilidades pueden ser mejoradas con el uso de polímeros. (Huamán, 2022). Ver Tabla 4.

Tabla 4

Fortalezas y debilidades del asfalto

Fortalezas	Debilidades
Consistencia	Envejecimiento
Adhesividad	Susceptibilidad térmica
Impermeabilidad	Poca recuperación elástica
Durabilidad	Comportamiento viscoelástico
Aglutinante	Afectado por la oxidación y foto degradación

Nota. Adaptado del Curso de Pavimentos, por Huamán (2022).

b. Clasificación del CAP

- **Por Penetración**

Clasificados por la medida de la penetración en 0.1 milímetros que ingresa una aguja normalizada por 5 segundos en el asfalto a 25°C. En un CAP PEN 60/70 la aguja penetra 60 décimas de mm (6 mm) (Instituto del asfalto, 1992). En el Manual EG

2013, Tabla 415-02 se presentan los CAP-PEN. En Perú se producen principalmente los siguientes grados: CAP PEN 60/70, 85/100, 100/120 y 120/150. (Huamán, 2022)

- **Por Viscosidad**

La clasificación es de acuerdo a la viscosidad absoluta (o dinámica) a 60°C en Poises. La nomenclatura incluye las letras AC de “Asphalt Cement” y el grado. Por ejemplo, AC-20 significa un CAP con viscosidad de 2000 Poises a 60°C.

En la Tabla 415-03 del Manual EG 2013, se menciona los siguientes grados: AC-2.5, AC-5, AC-10, AC-20 y AC-40 (MTC, 2013)

- **Por PG (Performance Grade)**

Se clasifican por PG mediante un rango de temperaturas en el cual el CAP se desempeña satisfactoriamente. La nomenclatura indica PG seguida de dos números, donde el primero, positivo, es la temperatura alta (máxima) o grado superior y el segundo, negativo, es la temperatura baja (mínima) o grado inferior, determinadas en base a registros históricos. La temperatura alta es la media de las máximas temperaturas de los 7 días más calientes del año (consecutivos) medidas a 2 cm de profundidad y la baja es la temperatura mínima media anual tomada en la superficie del pavimento (Vila y Jaramillo, 2018, p. 320). Por ejemplo, un CAP con PG 64-22, significa que el rango de temperaturas en las que el CAP se desempeña satisfactoriamente es desde -22°C (mínima) hasta +64°C (máxima). En la Tablas 423-13 y 423-14 del EG 2013, se tienen las clasificaciones:

- Temperaturas máximas: entre PG 46 a PG 82.
- Temperaturas mínimas: entre PG-10 a PG-46. (MTC, 2013)

c. Reología del asfalto

Es el estudio de la deformación de materiales con capacidad de fluir ante la aplicación de un esfuerzo, es decir, materiales que son entre elásticos y viscosos (Morea, 2011). La reología del asfalto estudia las propiedades viscoelásticas de acuerdo a la temperatura y tiempo de aplicación del esfuerzo (Maza y Vivas, 2022, p.25). Los ensayos convencionales no ofrecen información sobre el comportamiento reológico del asfalto, por eso se hacen ensayos de orden superior. Los ensayos SUPERPAVE (**S**uperior **P**erforming **A**sphalt **P**avement) simulan las dos etapas de la vida del asfalto. La primera se refiere a la etapa de preparación de la mezcla y la segunda, a la etapa de servicio. A la primera etapa se le llama envejecimiento a corto plazo y es simulada por el TFOT y

RTFOT. La segunda etapa es el envejecimiento a largo plazo y es simulado por la vasija PAV. (Garnica et al, 2005, p.4)

El DSR determina los parámetros reológicos del asfalto: módulo complejo (G^*) y ángulo de fase (δ), que informan sobre su comportamiento. El módulo G^* es la resistencia a la deformación por esfuerzo cortante repetido y δ es el ángulo de fase entre el esfuerzo y la deformación. Un $\delta=0$ significa un comportamiento elástico, mientras que un $\delta=90^\circ$ uno totalmente viscoso (Castro et al, 2016, p.9). Para controlar deformaciones permanentes se limita el valor de la relación $G^*/\text{sen}\delta$ y para controlar el fisuramiento por fatiga se limita el valor de $G^*.\text{sen}\delta$. (Vila y Jaramillo, 2018, p.320).

Ver en la Tabla 5 los equipos Superpave.

Tabla 5

Equipos Superpave y propósito de los ensayos al CAP

Equipo	Nomenclatura	Propósito del Ensayo
Reómetro dinámico de corte	DSR	Determina parámetros reológicos: G^* δ (a temperaturas intermedias/altas)
Horno Rotatorio de película delgada	RTFOT	Simula el envejecimiento a corto plazo
Horno de película delgada	TFOT	Simula el envejecimiento a corto plazo
Vasija de Envejecimiento a presión	PAV	Simula el envejecimiento a largo plazo
Viscosímetro Rotacional	RV	Mide la viscosidad en condiciones más cercanas a la realidad
Reómetro de Viga en flexión	BBR	Comportamiento a bajas temperaturas

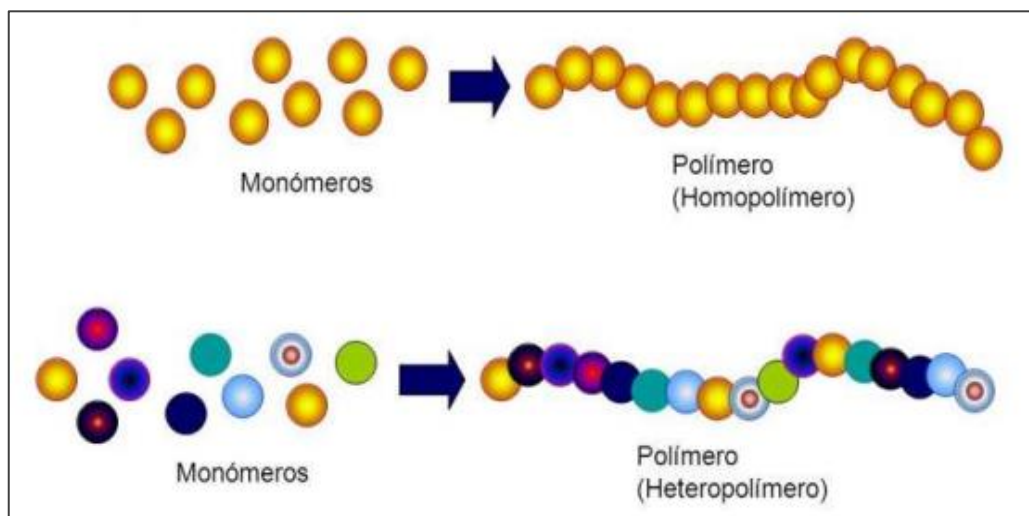
Nota. Adaptado del Curso de Pavimentos, por Huamán (2022).

2.2.5 Polímeros

Son compuestos consistentes en moléculas mayores constituidas por muchas unidades menores denominadas monómeros (grupos de átomos). Se obtienen mediante un proceso químico, denominado polimerización, por el que varias unidades pequeñas se agrupan para formar dicha macromolécula. Si la cadena está compuesta por un solo tipo de monómero se les llama homopolímeros. Y si está compuesta por dos o más tipos, se llama copolímero o heteropolímero. (Chen, 2018, p.11) Ver Figura 9.

Figura 9

Cadenas de homopolímero y heteropolímero (Copolímero)



Nota. Chen (2018)

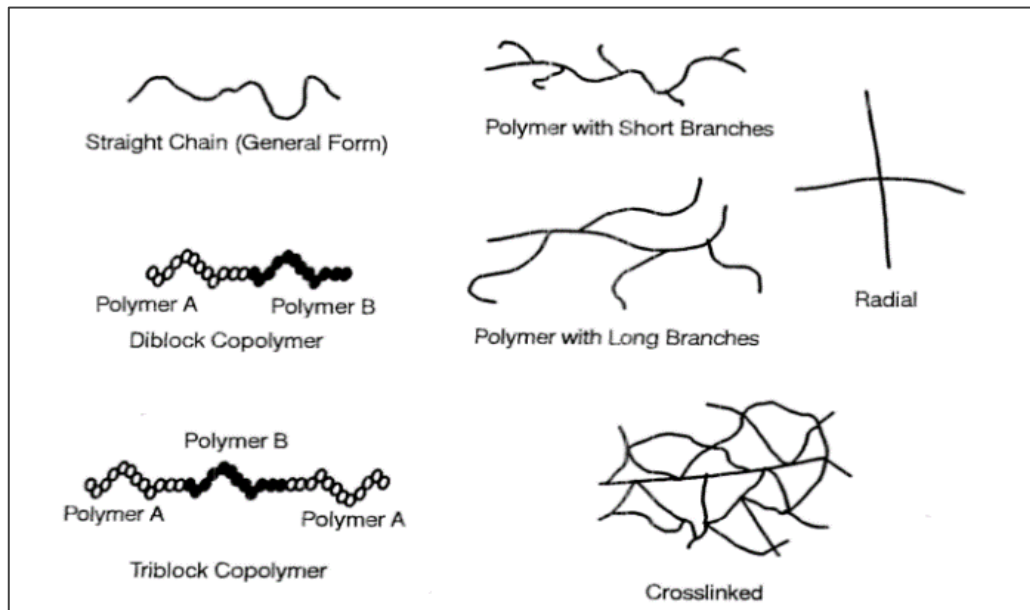
Los polímeros tienen grandes cadenas de monómeros (unidas mayormente por enlaces covalentes) las cuales pueden ser lineales simples, enlazadas o entrecruzadas.

Tanto la estructura como la química de las cadenas influye en el comportamiento. Si sus extremos son reactivos con otros polímeros pueden ocurrir reacciones químicas. (Pay, 2017, p.18)

Se presentan varios tipos de estructuras en la Figura 10.

Figura 10

Varios tipos de estructuras de polímeros



Nota: Tomada de Pay (2017)

a. Clasificación general de polímeros

De manera general, se clasifican de acuerdo a su comportamiento frente a la temperatura en dos grupos: termo endurecibles y termoplásticos.

Los termo endurecibles no se usan para asfalto, pues sus propiedades se degradan a altas temperaturas o se descomponen.

Los termoplásticos son los que se usan para asfaltos, pues pueden ser llevados a temperaturas altas sin ocasionar mucho daño a sus cualidades.

Actualmente, algunos autores ya están clasificando los polímeros para asfaltos en tres grandes grupos: elastómeros, plastómeros y reactivos. (Polacco et al, 2015, p.74).

En la Tabla 6 se presenta la clasificación.

Tabla 6*Clasificación general de polímeros*

Termo endurecibles (no se usan en asfalto)	o Termo rígidos	Resinas epoxi Poliuretanos Poliésteres
	Plastómeros	Poliétileno alta (HDPE) y baja densidad (LDPE) Polipropileno (PP) y Poliestireno (PS) EVA (Etileno-Acetato de vinilo) EBA (Etileno-Acrilato de Butilo) PVC (Policloruro de vinilo)
Termo plásticos (para asfaltos)	----- Elastómeros	SBS (Estireno-Butadieno-Estireno) SBR (Estireno-Butadieno-Caucho) SEBS (Estireno-Etileno/Butileno-Estireno) Isopreno (Caucho natural) Neopreno (Caucho artificial) GCR (Grano de caucho triturado)
	----- Reactivos	RET Terpolímero Elastomérico Reactivo (Etileno-nButil Acrilato-GMA) EMGMA (Etileno-Metil Acrilato-GMA.)

Nota. Adaptada de Montejo (2002)

GMA: Grupo Glicidil Metacrilato

Adaptada de la Tabla 12.1 de *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras* (p.621).

b. Polímeros para modificación de asfaltos

Para modificar asfaltos se usan los polímeros elastómeros y plastómeros. Recientemente se incluyen los polímeros reactivos (Polacco et al, 2015, p.74)).

Elastómeros: presentan gran recuperación elástica, pudiendo ser estirados varias veces y luego recuperar su posición sin deformación permanente. (Castro et al, 2016, p.8). Son los más compatibles con el asfalto. Los más conocidos son SBS, SBR y GCR. De ellos, “el más utilizado es el SBS, aunque algunos autores señalan que a temperaturas altas disminuye su fuerza y resistencia” (Palma et al, 2015, p.121).

Plastómeros: cuando pasan su límite elástico se fracturan, no vuelven a su posición original pues tienen poca elasticidad. Las mezclas modificadas con plastómeros tienen incremento en la resistencia porque el asfalto se vuelve más duro. Uno de los más usados es el EVA (Herrera y Valencia, 2021, pp.12-13).

Reactivos: son polímeros con grupos funcionales que le permiten reaccionar con el asfalto y se usan para mejorar la estabilidad al almacenamiento. Entre ellos se tiene el RET (Terpolímero Elastomérico Reactivo) y el EMGMA (Etileno-Metil acrilato-Glicidil Metacrilato). Ambos tienen el grupo GMA (Glicidil Metacrilato) que puede reaccionar con el grupo carboxilo presente en los asfáltenos, generando una unión fuerte y estable con el asfalto. (Da Silva y Morales, 2017, p.298)

c. Compatibilidad con el asfalto

Para ayudar a la compatibilidad los polímeros deben tener: baja polaridad, peso molecular no muy alto tal que no aumente la viscosidad y no haya problemas de dispersión, temperatura vítrea tal que aminoren las deformaciones a bajas temperaturas. (Palma et al, 2015, p.120) Incluso, el tamaño de la partícula del modificador influye en la compatibilidad (Bustos et al., 2018, p.65).

Además, cuando se mezclan asfalto y polímero en forma física no siempre se obtiene la compatibilidad adecuada, pues hay tendencia a separación de fases (Palma et al., 2015, p.123).

2.2.6 Polímero Elastomérico Reactivo (RET)

El Terpolímero Elastomérico Reactivo (RET por sus siglas en inglés) está compuesto por tres monómeros: n-Butil Acrilato, Etileno y Glicidil Metacrilato. En algunos países, como México, se le llama terpolímero elastomérico reactivo de etileno (TERE) o también terpolímero reactivo de etileno RET. Reacciona químicamente con los asfáltenos, creando

una unión fuerte asfalto-polímero. El grupo radical epóxico en el monómero Glicidil Metacrilato (GMA) se une a otros grupos funcionales. Los asfáltenos, que pueden tener grupos carboxilo, abren el anillo epóxico y forman un éster aromático muy estable. Producida la reacción, el RET queda unido a la molécula de asfalto. El asfalto final es muy homogéneo con buena estabilidad. (Chen, 2018, p.5)

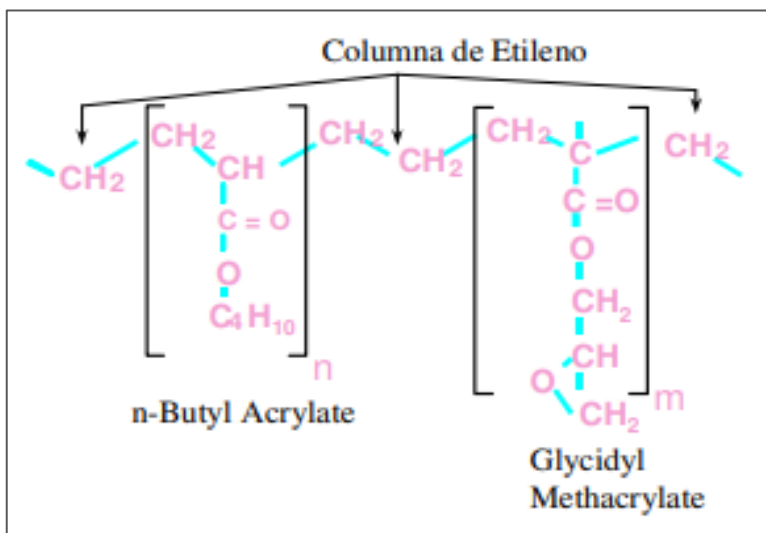
Dentro de los polímeros reactivos de Etileno se puede incluir al EMGMA (Etileno-Metil Acrilato-Glicidil Metacrilato), que en lugar del monómero n Butil Acrilato presenta Metil Acrilato, siendo los dos, ésteres acrílicos muy similares en comportamiento. El EMGMA o Terpolímero E-AE-GMA (Etileno-Éster Acrílico-Glicidil Metacrilato) tiene nombre comercial de LOTADER AX 8900. (CAH Asfaltos, 2023; Da Silva y Morales, 2017, p.298)

A temperaturas altas, el RET reacciona con el asfalto formando un enlace covalente con los grupos funcionales de los asfáltenos sin separarse y se forma una estructura de red alrededor de los asfáltenos, aumentando la rigidez y elasticidad. (Geçkil, 2019, p.4). El RET tiene excelente desempeño ante temperaturas extremas con alto tráfico, como alta resistencia al ahuellamiento y fatiga (Kaa et al, 2016, p. 3).

Presentamos la estructura del RET en la Figura 11.

Figura 11

Estructura molecular del polímero RET

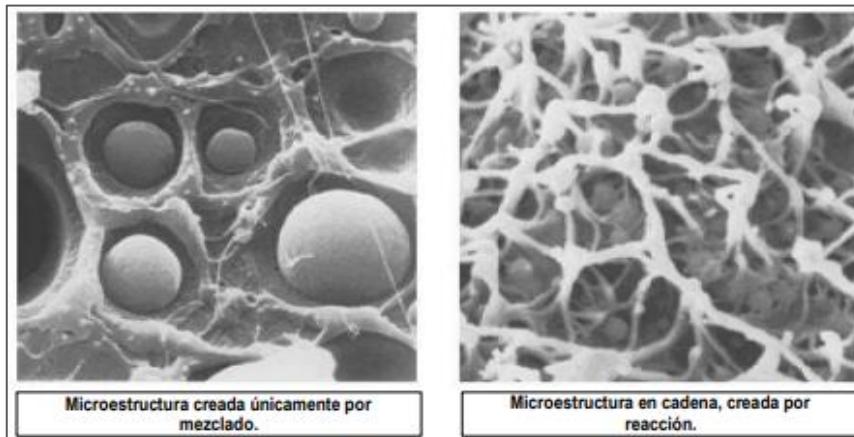


Nota: Artemisa (s.f.) [<http://artemisa.unicauca.edu.co>]

Como “resultado de la reacción se tiene un asfalto modificado muy estable debido a la estructura creada” (López y Puma, 2017, p.28). Ver Figura 12.

Figura 12

Microestructura en asfaltos modificados por mezclado y por reacción

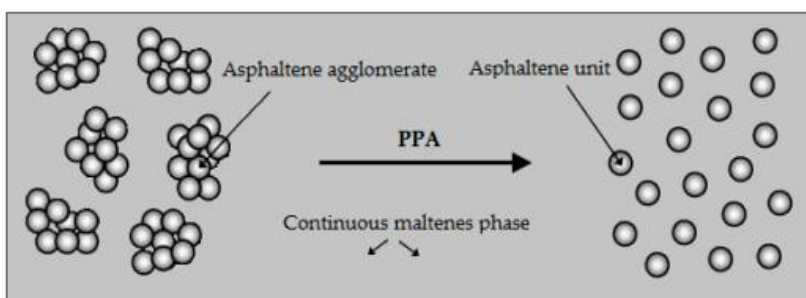


Nota. López y Puma (2017)

Sin embargo, cuando hay enlaces químicos, se puede formar un gel de asfalto inútil que no se funde ni diluye, por eso la cantidad de polímero RET debe limitarse y no se debe usar solo. Por este motivo, cuando se usa RET, se agrega como catalizador ácido polifosfórico (PPA) para acelerar la reacción. Además, al usar PPA mejoran varias propiedades y se reduce la cantidad de polímero. El PPA rompe los aglomerados de asfáltenos, separándolos, permitiendo una mejor dispersión para la reacción con el RET (Geçkil & Seloglu, 2018, p.262; Geçkil, 2019). Ver Figura 13.

Figura 13

Función del ácido poli fosfórico (PPA) en el asfalto



Nota. Geçkil (2019)

En procesos donde el polímero se asocia con asfalto por reacción química, mejoran considerablemente las propiedades reológicas. El asfalto es más resiliente, aminora el agrietamiento por fatiga y demora o impide la exposición del agregado por pérdida del ligante. (Franco et al., 2015, pp.21-27)

Las ventajas de este polímero son: que no requiere molino de alto corte con un tiempo de mezclado menor, permiten el almacenamiento por varios meses, transporte a mayores distancias y el contratista puede hacer la modificación por su cuenta. Como desventajas, no pueden utilizarse altos contenidos por el reactivo limitante y su precio es más elevado que otros polímeros. En general, el RET se usa en contenidos de 1.3 % a 1.5% y está recomendado para climas cálidos. (López y Puma, 2017, p.29)

2.2.7 Asfalto Modificado con Polímeros (AMP)

Los asfaltos modificados con polímeros (AMP) corresponden a una tecnología usada a nivel mundial pues mejora el desempeño de las carpetas asfálticas, solucionando muchos problemas de los pavimentos en su etapa de servicio. Esta alternativa, aun siendo más costosa, proporciona un pavimento más durable con una vida útil mayor que la de una carpeta convencional. (Salazar et al, 2017, p.5)

Surgieron por la necesidad de contar con un asfalto con mejor resistencia al paso de vehículos con mayores cargas/eje, más presión de inflado en los neumáticos, etc. La técnica consiste en añadir polímeros al asfalto a fin de cambiar sus propiedades y modificar su susceptibilidad térmica, mejorando la resistencia a la fisuración, al daño por fatiga, aumentando la vida del pavimento. (Palma et al, 2015, p.120)

a. Objetivos de la modificación de asfaltos

Usando polímeros se pretende modificar propiedades de las mezclas para tener mejor rendimiento al ser sometidas a mayores exigencias de tráfico y clima. Se desea mejorar la viscosidad, susceptibilidad térmica, resistencia al ahuellamiento y a la fisuración a bajas temperaturas, adherencia, etc. (Rondón y Reyes, 2015, p.105). Las deformaciones plásticas se presentan mayormente en zonas con temperaturas altas y la fisuración por fatiga se da en temperaturas intermedias a bajas, por eso es conveniente la modificación. (Vila y Jaramillo, 2018, p.322)

En general, la modificación tiene la función de mejorar el comportamiento del asfalto ante deformaciones permanentes, fisuración y envejecimiento. Algunos polímeros modifican la elasticidad como el SBS y otros, como los plastómeros, mejoran la rigidez del asfalto dándole mayor resistencia a las altas temperaturas. Sin embargo, cada polímero tiene buen desempeño en un rango específico de temperaturas y mejora una o pocas propiedades del asfalto. (Bustos et al., 2018, p.60)

b. Métodos de modificación de asfaltos

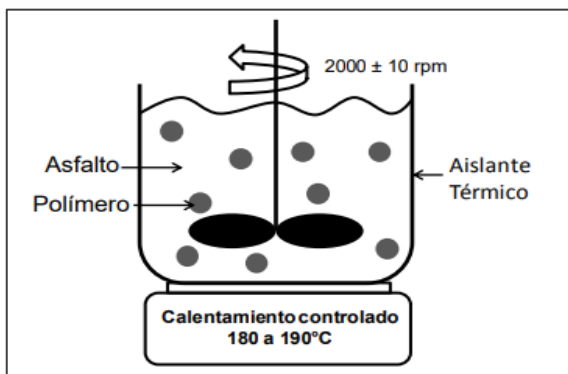
Existen dos formas de modificación:

- **Vía húmeda:** el polímero se adiciona al asfalto a temperaturas altas antes de incorporarse a la mezcla. El asfalto ya modificado se mezcla con el agregado previamente calentado para formar la mezcla.
- **Vía seca:** se incorpora el modificador al agregado pétreo y éste a la mezcla asfáltica, reemplazando parte del agregado, generalmente las fracciones finas o el filler por el modificador. (Rondón y Reyes, 2015, pp.103-104)

El método por vía húmeda es más costoso, pues necesita un depósito para almacenar el asfalto modificado, una bomba especial porque es más viscoso y se requiere mayor energía al aumentar la temperatura de mezclado. Aun así, es el método más usado pues se obtienen mejores resultados. La capacidad del polímero para mejorar el ligante depende del método de modificación, del tipo y tamaño máximo de los gránulos del polímero, del contenido, la temperatura y tiempo de mezclado (Rondón y Reyes, 2015). Ver Figura 14.

Figura 14

Modificación de asfalto vía húmeda



Nota. Tomado de Múnera (2012)

Por otro lado, la modificación puede ser física o química. La primera consiste en mezclar asfalto y polímero a altas temperaturas (180°C - 190°C), mientras que la modificación química implica una reacción química asfalto-polímero, caso de los polímeros reactivos. Al mezclar físicamente asfalto y polímero, se forman dos fases, fase asfáltica y fase polimérica. Para bajos contenidos de polímero, el asfalto es la fase continua y la dispersa es el polímero. Pero si el contenido de polímero es mayor, se produce una inversión de

fases, teniendo al asfalto disperso en la matriz de polímero. En el caso del SBS, la parte elastómera absorbe parte de los aceites del asfalto y se hincha, creando una buena microestructura tipo red. Con los polímeros reactivos, hay una sola fase, lo cual es observado con microscopía de fluorescencia. (López y Puma, 2017, pp.30-32)

2.2.8 Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC)

La MAC es una combinación en proporciones definidas de cemento asfáltico, agregados graduados y filler (llenante mineral) que se realiza calentando en planta tanto los áridos como el CAP, con la finalidad de que el asfalto recubra a los agregados y se obtenga una mezcla uniforme. (Balbín y Enríquez, 2020, p.38)

Los agregados, el contenido y características del CAP influyen en las propiedades de la MAC y en la carpeta. Para diseñar las mezclas se usa comúnmente el método Marshall mediante el ensayo de estabilidad (Rosales, 2022, pp.24-27), el cual consiste en obtener el óptimo contenido de asfalto para una graduación determinada de áridos, que produzca una mezcla con:

- Suficiente contenido de ligante que asegure la durabilidad de la carpeta.
- Estabilidad que sea adecuada al tránsito sin generar deformaciones.
- Cantidad de vacíos suficiente que logre una compactación adicional y que sea suficientemente baja para no dejar entrar ni al agua ni al aire.
- Suficiente trabajabilidad de la mezcla. (Instituto del Asfalto MS-22, 1992, p.70)

El método Marshall se usa, tanto para diseñar la mezcla en laboratorio, como para efectuar el control en obra (Rosales, 2022).

a. Parámetros considerados en el diseño de las MAC

El método Marshall se basa en el análisis de características o parámetros, volumétricos y mecánicos, que influyen en el comportamiento de la mezcla. Los parámetros volumétricos son: la densidad, la cantidad de vacíos, el contenido de asfalto, vacíos en el agregado y vacíos llenos de asfalto. Los parámetros mecánicos son la estabilidad y fluencia de la mezcla medidos en el ensayo.

Los parámetros considerados en el diseño se definen como:

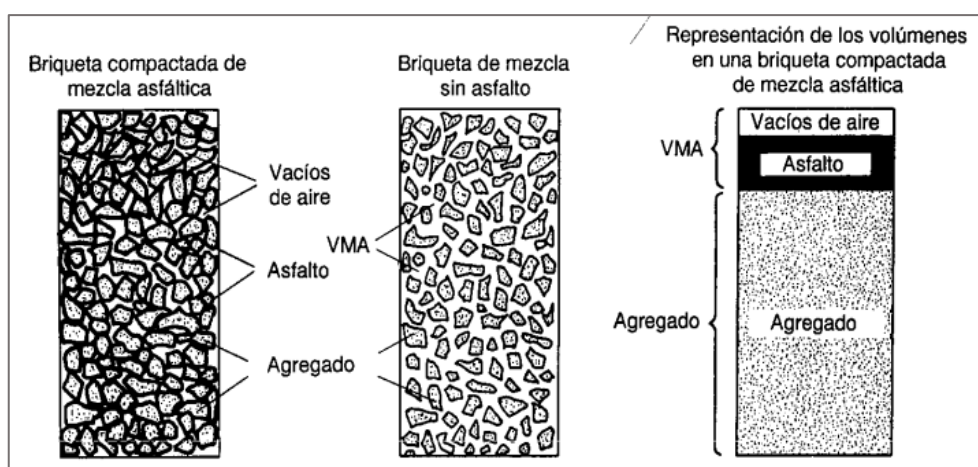
Densidad de la mezcla: referida al peso unitario. Es importante este parámetro porque se usa para el control de compactación en obra, que normalmente debe alcanzar un alto porcentaje de la densidad de laboratorio. (Instituto del Asfalto MS-22, 1997, p. 57)

Vacíos de aire (o sólo vacíos): son los espacios que quedan después de compactada la mezcla, es decir los vacíos llenos de aire que quedan entre los áridos ya recubiertos de asfalto. Es necesario que haya un espacio donde el asfalto pueda acomodarse y permita la compactación. Densidad y vacíos están muy ligados, a menos vacíos, más densidad, pero éstos deben ser controlados. De acuerdo a Marshall estos vacíos deben estar entre 3% y 5%. Un contenido bajo origina que el asfalto no tenga sitio y tienda a exudar hacia la superficie y un contenido alto provee mucha permeabilidad para que aire y agua puedan pasar y originar deterioro. (Arellano y Cáceres, 2018; MS-22, 1992, p.58)

Vacíos en el agregado mineral (VMA): corresponde a los vacíos que quedan en la mezcla compactada si se extrae el asfalto. Es todo el espacio disponible que tendría el asfalto para acomodarse (menos lo que absorbe el agregado). Está relacionado con la durabilidad de la mezcla porque a más película de árido recubierta más durable será, por lo que Marshall recomienda valores mínimos para VMA. Si se diseñara con valores de VMA inferiores a los mínimos recomendados, la mezcla no tendría espacio para la película que recubre a los áridos y, por lo tanto, resultaría una mezcla seca de baja durabilidad. Y si hubiera mucho espacio, entraría más asfalto produciendo una mezcla inestable (Vílchez y Yerén, 2022, p.26; MS-22, 1992, p.26). Ver Figura 15.

Figura 15

Esquema del VMA en la mezcla compactada.



Nota. Tomado del MS-22 (p.59), por Instituto del Asfalto, 1992.

Contenido de asfalto: referido al porcentaje de cemento asfáltico que se define de acuerdo a los criterios del método Marshall. Este contenido también está relacionado con las características del agregado (Huillcapoma et al., 2022, p.21).

Vacíos llenos de asfalto (VFA): se refieren a los vacíos efectivos de ligante, es decir, el contenido de asfalto menos lo que ha absorbido el agregado. Es el asfalto que va a formar efectivamente la película que recubre a los áridos. (Huillcapoma et al., 2022)

Estabilidad: resistencia para soportar deformaciones y desplazamientos bajo carga. Cuando una carpeta es estable, es capaz de resistir las cargas manteniendo su forma; si es inestable se producirían ahuellamientos u otros cambios en la mezcla. En el ensayo Marshall, corresponde a la carga máxima al momento antes de la rotura de la probeta. (Instituto del Asfalto MS-22, 1992, p.61)

Fluencia: es la deformación de la mezcla medida por medio del ensayo Marshall correspondiente al momento de la falla. (Huillcapoma y Figueroa, 2022, p.20)

b. Propiedades consideradas en el diseño de las mezclas

Las propiedades deseadas son:

Estabilidad: capacidad para soportar deformaciones y desplazamientos bajo cargas de tráfico. Dependiente de la fricción interna del agregado y de la cohesión. La fricción guarda relación con la forma y textura del agregado. Un árido angular y de textura áspera brinda mayor estabilidad pues se opone al desplazamiento. Mucha arena de tamaño dificulta la compactación. La cohesión en la mezcla la aporta el ligante, por lo tanto, depende de su viscosidad y temperatura. Un exceso de ligante también genera exudación y ahuellamiento en la carpeta. (Instituto del Asfalto MS-22, 1992, p.61)

Durabilidad: característica por la cual la mezcla puede soportar factores como la desintegración de los áridos, desprendimiento del ligante, oxidación u otras modificaciones en el asfalto. Esta propiedad depende de los materiales, de un buen diseño y del control en el mezclado, colocación y compactación, así como también de factores climáticos. Está relacionada con la cantidad de ligante, pues debe recubrir bien a los agregados, pero también no debe haber mucho contenido de vacíos. (Instituto del Asfalto MS-22, 1992, p.62)

Impermeabilidad: característica por la cual el aire y el agua no pueden entrar con facilidad en el pavimento. Relacionada con la cantidad de vacíos en la mezcla compactada, siendo más importante el tamaño de los vacíos y si tienen acceso a la

superficie. Si hay muchos vacíos, se produce oxidación y se desintegra la mezcla. El contenido de asfalto también influye, ya que si es poco se forma una película tan delgada que se envejece rápidamente causando desintegración. (Instituto del Asfalto MS-22, 1992, p.62)

Trabajabilidad: facilidad con que la mezcla se puede extender y compactar. La gradación del agregado y la temperatura de colocación influyen en esta propiedad. Las mezclas gruesas se hacen difíciles de compactar, pero también mucho relleno mineral (filler) le quita trabajabilidad. Mucha arena de tamaño mediano produce una mezcla blanda que se desplaza y cuando se enfría la mezcla es poco trabajable. (Instituto del Asfalto MS-22, 1992, pp.63-64)

Flexibilidad: característica del pavimento asfáltico por la cual puede acomodarse, sin fisurarse, a los movimientos de la subrasante o a los asentamientos graduales. Es la propiedad que se requiere para que la carpeta asfáltica se acomode al paso de los vehículos y porque la subrasante puede asentarse con las cargas o expandirse por características del suelo. (Jara y Machado, 2020, pp.24-25)

Resistencia a la fatiga: capacidad ante la flexión repetida por cargas de tránsito, que se manifiesta como fisuración. Los vacíos con asfalto y la viscosidad tienen gran influencia en esta propiedad. Si hay muchos vacíos, ya sea por diseño o mala compactación, el asfalto envejece y comienza el agrietamiento por fatiga. (Instituto del Asfalto MS-22, 1992, pp.64-65)

Resistencia al deslizamiento: característica de la superficie de rodadura para reducir el resbalamiento de las llantas, especialmente en superficies mojadas, por lo que es necesario que la carpeta tenga una cierta rugosidad. (Martínez, 2021) Una superficie áspera ofrece más resistencia al resbalamiento. Se mide en campo a través de la macro y micro textura, mediante el ensayo del círculo de arena y del péndulo británico (TRRL), respectivamente. (Huamán, 2022)

2.2.9 Mecanismos de falla en los pavimentos asfálticos

Los pavimentos asfálticos presentan principalmente fallas como: deformación permanente y fisuración por fatiga. En estos fenómenos interviene el clima, la temperatura de servicio, tráfico, los ciclos de carga, etc. Además, el comportamiento del pavimento está ligado al desempeño de la mezcla asfáltica. (Pfeiff et al., 2019, p.2)

a. Fisuración

Son fallas que se producen inicialmente debido a esfuerzos tensionales que no son absorbidos por las capas granulares, que afloran apareciendo fisuras longitudinales y transversales. La fisuración ocurre cuando los esfuerzos inducidos por el tráfico y por el gradiente térmico sobrepasan la resistencia a tracción de la mezcla. Después de innumerables ciclos de carga y descarga, aumenta la fisuración, la cual también está afectada por la oxidación y envejecimiento del asfalto. Cuando el daño aumenta las fisuras se interconectan formando la falla “piel de cocodrilo”. (Morea, 2011, p.6)

En forma general, se agrupa la fisuración en: fisuración por fatiga y fisuración por contracción térmica. La primera ocurre por sucesivos ciclos de carga y descarga o ciclos térmicos, y se da en temperaturas medias de servicio (entre 10°C y 30°C aproximadamente). La segunda ocurre en un solo ciclo de enfriamiento y se produce a temperaturas mucho menores a 0°C. (Morea, 2011, pp.5-7; Pfeiff et al., 2019). Por otro lado, hay relación con la deformación permanente, pues al iniciarse la fisuración, el módulo de la mezcla disminuye, luego la fisuración progresa y acelera el proceso de la deformación permanente (Pfeiff et al., 2019). Los tipos de fisuras son mostradas en la Figura 16.

Figura 16

Tipos de Fisuración



Nota. Tomada de Morea, (2011).

b. Deformación permanente

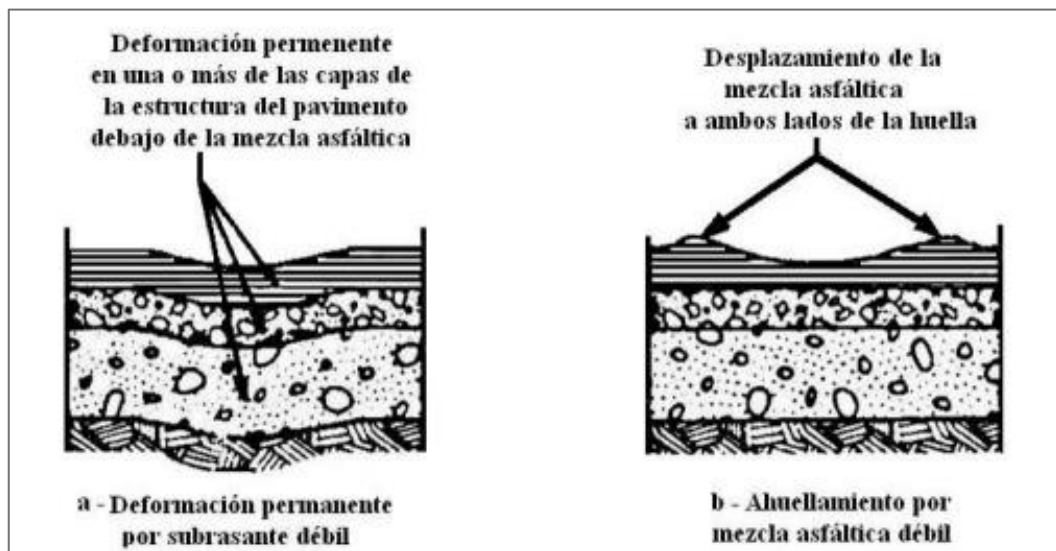
La deformación permanente es la falla más frecuente en los pavimentos asfálticos. Es la acumulación de pequeñas deformaciones irreversibles que se van produciendo con cada aplicación de carga. Se conoce también como ahuellamiento porque es un hundimiento a lo largo de las huellas de los neumáticos, debido a distintos factores como una mezcla con poca resistencia a la deformación (inestable), problemas constructivos o problemas en las capas inferiores, altas temperaturas, etc. (Pfeiff et al., 2019)

Existen dos tipos de deformación permanente: por falla estructural (en todo el paquete estructural) y por falla de la carpeta (problemas de mezcla o de compactación). El ahuellamiento en la carpeta se produce por acumulación de deformaciones plásticas en la mezcla. A veces, se llama ahuellamiento a la falla en la carpeta y deformación a la del paquete. (Morea, 2011)

Ver Figura 17.

Figura 17

Tipos de Deformación Permanente



Nota. Morea (2011)

c. Exudación

Es una falla que se produce generalmente en lugares calurosos, por exceso de asfalto o por el uso de un ligante blando que, por las altas temperaturas aflora hacia la superficie de la carpeta. (Universidad Nacional de Colombia, 2006, p.20)

d. Deformación plástica

Es un fenómeno que ocurre en la mezcla debido a pérdida de estabilidad ya sea por un diseño inadecuado o mala compactación, dando una mezcla blanda que, en combinación con climas calurosos ocasionan corrimientos de la carpeta. Si se usan ligantes blandos, se producen ondulaciones en zonas de frenado (Huamán y Chang, 2016). Las deformaciones plásticas se presentan mayormente en zonas con temperaturas altas (Vila y Jaramillo, 2018, p.322).

2.2.10 Propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas

De acuerdo al Instituto del Asfalto (1992) las propiedades de las mezclas asfálticas son cualidades que deben tener las mismas para obtener un buen diseño (p.60). En el ítem 2.2.8 se trató sobre las propiedades consideradas en el diseño de las mezclas mediante el método Marshall. Por otro lado, las propiedades mecánicas son aquellas relacionadas con su resistencia mecánica, es decir, relacionadas con esfuerzos y deformaciones.

De esta manera, se define las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas como la capacidad de resistir esfuerzos y deformaciones sin fallar, adquirir deformaciones permanentes o algún deterioro que no afecte la seguridad de la vía. La estabilidad, que se define como la capacidad para soportar las cargas de los vehículos con deformaciones compatibles con su función de servicio, determina en gran parte, la resistencia mecánica de la mezcla. (Instituto del Asfalto MS-22, 1992, p.61)

Además, mediante el ensayo Marshall se determina la estabilidad como la carga máxima al momento de la rotura, pero como parte del ensayo también se consideran parámetros volumétricos para garantizar la durabilidad de la mezcla, ya que justamente Marshall considera porcentajes de vacíos que permitan obtener mezclas densas, impermeables y que permitan cierta compactación adicional bajo cargas de tránsito. (Huamán, 2022)

Adicionalmente, la deformación permanente es la principal forma de deterioro en los pavimentos asfálticos y corresponde a la acumulación de pequeñas deformaciones que no se recuperan y que ocurren al ser sometidos repetidamente a las cargas de tránsito. La susceptibilidad a la deformación permanente es la característica de las mezclas asfálticas para acumular estas deformaciones. (Pay, 2017, p.10)

De esta manera, teniendo en cuenta que las propiedades mecánicas se han definido como propiedades relacionadas con esfuerzos y deformaciones, se ha considerado conveniente estudiar tres principales propiedades de las mezclas asfálticas en caliente:

- Estabilidad, en función de los parámetros mecánicos (estabilidad y fluencia) por medio del Ensayo Marshall.
- Durabilidad, en función de los parámetros volumétricos (vacíos de aire, vacíos en el agregado mineral, densidad de la mezcla, contenido de asfalto, etc.) del Ensayo Marshall.
- Susceptibilidad a la deformación permanente, en función de los valores de ahuellamiento mediante el ensayo de la Rueda de Hamburgo.

2.2.11 Estructura técnica normativa y ensayos de laboratorio

El marco normativo está descrito en el Manual del Ministerio de Transportes y Comunicaciones MTC EG 2013, de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción, Secciones 415 y 423, y en el Manual MTC EM 2016 de Ensayo de Materiales, secciones 2, 3 y 5.

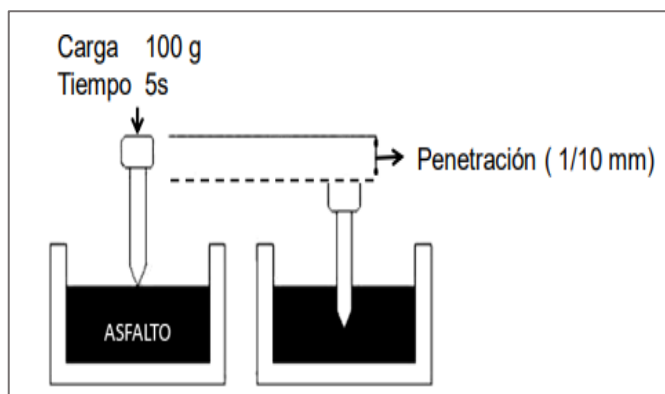
a. Caracterización del cemento asfáltico

Para cumplir requisitos de la sección 415.02 del Manual EG 2013, se hacen los ensayos:

Penetración (ASTM D 5). El procedimiento consiste en introducir una aguja estándar con peso de 100 gramos en una muestra de CAP a 25°C durante 5 segundos. La longitud que penetra se mide en décimas de milímetros (dmm). El esquema del ensayo se presenta en la Figura 18.

Figura 18

Esquema del ensayo de Penetración



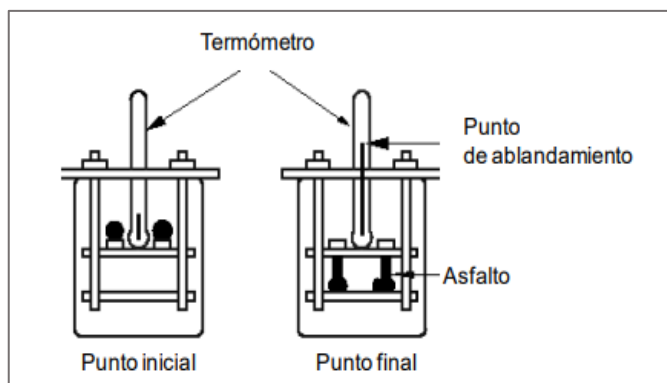
Nota. Múnera (2012)

Punto de ablandamiento (ASTM D 36). También denominado método de anillo y bola. Se coloca una bola de CAP en un anillo y luego se calienta a razón de 5°C/minuto mediante un baño de inmersión. La temperatura en la cual la bola de asfalto cae 1” se denomina punto de ablandamiento.

Ver Figura 19.

Figura 19

Esquema del ensayo de Punto de Ablandamiento



Nota. Múnera (2012)

Viscosidad (Absoluta a 60°C ASTM D 2171 y Cinemática a 135°C ASTM 2170).

Se desea conocer la viscosidad del CAP a dos temperaturas para evaluar si la consistencia es la adecuada: a 60°C para clasificar el CAP y a 135°C que es la temperatura de mezclado aproximadamente. Para 60°C se utiliza el viscosímetro capilar de vacío, que es un tubo de vidrio con un extremo más ancho, por donde se vierte el asfalto que fluye hacia la parte angosta. Se toma el tiempo en que demora en pasar de un lado a otro y se convierte a poises, que es la medida de viscosidad dinámica (o absoluta) y equivale a 1 gr/cm-segundo.

Para 135°C, la prueba es similar, pero sin aplicar vacío ya que el asfalto a esta temperatura es más fluido y se obtiene la viscosidad cinemática en centistokes. (Instituto del Asfalto, 1992, pp.21-22)

Punto de inflamación o Copa Abierta de Cleveland (ASTM D 92). Se efectúa el ensayo para evaluar la mayor temperatura a la cual el CAP puede ser manipulado sin peligro. Es la temperatura en la cual se pierden vapores creando una combustión instantánea de elementos volátiles. No corresponde al punto de combustión, en el cual, el CAP se quema. Consiste en calentar el CAP lentamente en una copa de metal e ir

colocando una pequeña llama en la superficie, hasta que se produzcan ligeros destellos de vapores, entonces esa es la temperatura buscada. (Instituto del Asfalto, 1992, p.23)

Ensayo de ductilidad (ASTM D 113). Consiste en estirar una muestra de asfalto, previamente moldeada a velocidad de 5 cm/min y a 25°C dentro del ductilómetro (que es un baño María) hasta la rotura. Se mide la longitud estirada en cm, el cual corresponde al valor de la ductilidad. (Instituto del Asfalto, 1992, pp.24-26)

Recuperación elástica (ASTM D 6084). Se estira una muestra de asfalto a 5 cm/min hasta una longitud de 20 cm dentro del baño María a 25°C en el ductilómetro. Se corta al medio y se mide la recuperación elástica. Los asfaltos convencionales tienen muy poca recuperación elástica, mientras que los modificados dan valores mayores. Ver el esquema en la Figura 20.

Figura 20

Ensayo de Recuperación Elástica



Nota. Huamán (2022)

Solubilidad en tricloroetileno (ASTM D 2042). Se usa para determinar si el CAP es puro. Se sumerge una muestra en tricloroetileno el cual disuelve los componentes cementantes. Las impurezas insolubles (sales y otros) se depositan al fondo. Se filtran y se miden en proporción de la muestra inicial. (Instituto del Asfalto, 1992, p.26)

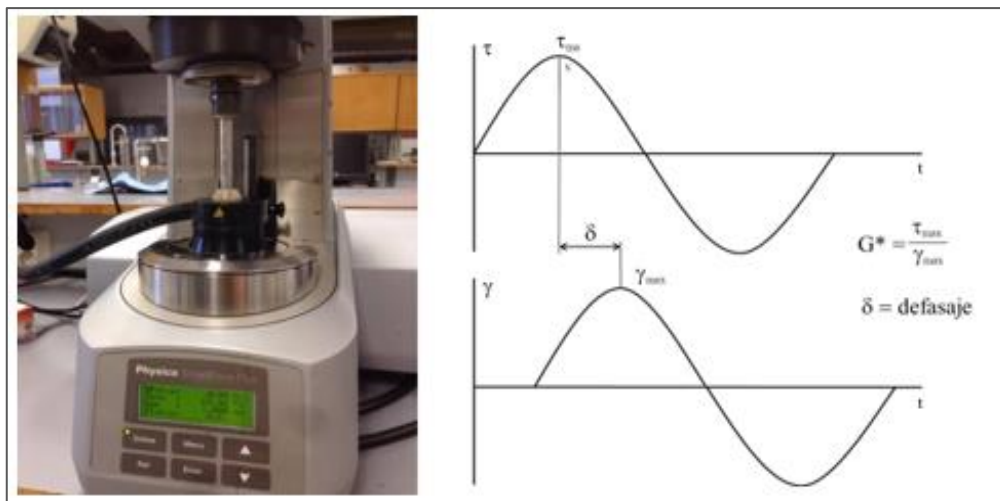
Ensayos Reológicos Superpave:

Reómetro Dinámico de Corte DSR (ASTM D 7175, AASHTO T 315). En este equipo se determinan los parámetros reológicos: módulo complejo G^* y ángulo de fase δ , que caracterizan el comportamiento viscoelástico. Se aplica un esfuerzo cortante a una muestra de CAP sobre un molde entre dos platos con temperatura controlada, se registra la deformación y el desfase. Un plato es fijo y otro móvil que rota en ambos sentidos a velocidad constante generando un esfuerzo de corte sinusoidal. La deformación que resulta es tipo sinusoidal pero desfasada. Se obtienen G^* y δ mediante un software. G^*

es la suma vectorial de dos componentes, una elástica G' (recuperable, en fase con la deformación) y otra viscosa G'' (desfasada). El ángulo (δ) brinda información sobre la respuesta viscosa/elástica. Un material elástico no tiene desfase entre cortante y deformación, es decir $\delta=0$, y uno totalmente viscoso tiene un desfase de 90° . El asfalto que es viscoelástico tiene valores de δ entre 0 y 90° según la temperatura y la frecuencia de carga (Morea, 2011, pp.61-62). Ver Figura 21.

Figura 21

Reómetro Dinámico de Corte DSR y respuesta esfuerzo-deformación.



Nota. Pay (2017)

Horno de Película Delgada TFOT (ASTM D 1754). En este horno se colocan 50 ml de CAP en un plato de 14 cm de diámetro, que da una lámina delgada de 3.2 mm de asfalto. Se colocan varios de esos recipientes en un aparato que rota en el horno por 5 horas a 163°C . El envejecimiento sólo ocurre en la parte superficial de la muestra por esto se modificó el ensayo al RTFOT. (Instituto del Asfalto, 1992, p.24)

Horno Rotatorio de Película Delgada RTFOT (ASTM D 2872). En el RTFOT se ponen recipientes cilíndricos de vidrio con 35 gr de CAP que hacen una película de 1.25 mm. Dentro de él, un aparato rota verticalmente a 15 rpm por 85 minutos y a la vez se aplica aire caliente a las muestras a temperaturas de 163°C que simulen el envejecimiento a corto plazo (etapa de elaboración de mezcla). Se obtiene la pérdida de masa, que es el envejecimiento en la prueba. Se obtiene el asfalto envejecido para usarlo en otros ensayos. (Morea, 2011, p.59; Rondón y Reyes, 2015, p.240)

Ver Figura 22.

Figura 22

Horno RTFOT



Nota. Lanamme UCR (2019)

Viscosímetro Rotacional Brookfield VR (ASTM D 4402, AASHTO T 316). Sirve para establecer temperaturas de mezclado y compactación de los ligantes. El ensayo se hace a 135°C y 165°C, en el que se mide el torque requerido para que rote un eje a una velocidad de 20 rpm dentro de la muestra de asfalto. El torque luego se convierte a viscosidad dinámica en Pascal-segundo. (Rondón y Reyes, 2015, p.234)

Viga BBR (ASTM D 6648). El “Bending Beam Rheometer” es usado para evaluar la resistencia a la fisuración térmica y rigidez a flexión del asfalto a bajas temperaturas. Se ensaya una viga de asfalto de 12.5 cm de longitud simplemente apoyada a la que se le aplica una carga constante en el centro por 4 minutos dentro de un fluido refrigerante. Previamente se ha acondicionado la viga a baja temperatura por una hora. Se mide la deflexión bajo la carga en función del tiempo. En la prueba, que termina a los 4 minutos, se miden dos parámetros: rigidez de fluencia por flexión y velocidad de fluencia. El software del reómetro genera los gráficos de carga y deflexión versus tiempo y calcula los parámetros a los 60 s. Si la rigidez por fluencia es alta el asfalto tiene comportamiento frágil y tiende a fisurar a baja temperatura. Además, es deseable una tasa de fluencia alta, porque al cambiar la temperatura el asfalto cambiará rápidamente su rigidez evitando fisurarse. Adicionalmente, las muestras ensayadas en BBR, previamente han sido envejecidas en RTFOT y PAV, de manera que simulan todo el proceso y periodo de servicio. (Pay, 2017, pp.27-28)

Recipiente de Envejecimiento a presión PAV (ASTM D 6521). Simula el envejecimiento a largo plazo (de la etapa de servicio) donde se somete el asfalto a presión y calor para simular años de servicio. Antes del ensayo se envejece la muestra en TFOT o RTFOT, lo cual se hace porque antes de colocarse en pista se envejece en la preparación. Se ponen las muestras de CAP en bandejas dentro del PAV (Pressure Aging Vessel) a temperaturas de 90°C-110°C y presión por 20 horas. Luego, se despresurizan y se llevan a la estufa a 163°C por 30 minutos para quitarles el aire atrapado, quedando el asfalto envejecido para usarse en otros ensayos. (Morea, 2011, p.60). Ver Figura 23.

Figura 23

Equipo PAV



Nota. Morea (2011)

b. Ensayos a los agregados

Se cumplirá con los ensayos dispuestos en EG 2013 para agregados gruesos y finos, y con la granulometría de la MAC. Además del análisis granulométrico y peso unitario, los ensayos más importantes son:

Agregado grueso:

Abrasión Los Ángeles (ASTM C 131): sirve para evaluar la resistencia al desgaste del agregado mediante unas bolas abrasivas de acero dentro de un tambor metálico que rota. (Bernardo y Mendiguri, 2022, p.30)

Partículas planas y alargadas (ASTM D 4791): es un conteo manual, pues hay un porcentaje admisible de estas partículas para evitar problemas en la compactación.

Caras fracturadas (ASTM D 5821): consiste en una inspección visual. Es necesario tener un porcentaje de caras fracturadas que aporten fricción y resistencia. (López y Puma, 2017, pp.86-88)

Agregado fino:

Equivalente de arena (ASTM D 2419): utilizado para evaluar el contenido de finos plásticos en el agregado fino. Una muestra del árido se coloca en un recipiente cilíndrico graduado con solución floculante, luego se agita para que las arcillas queden en suspensión y se dejan sedimentar. Se toman las alturas de arena y del material arcilloso. El equivalente de arena es la relación entre ambas alturas. (Rubio y Moreno, 2017, p.34)

Valor de Azul de Metileno (AASTHO TP 57): se usa para evaluar la cantidad de material indeseable en los áridos finos (orgánico u otros), añadiendo en forma gradual una solución azul de metileno a una muestra del árido fino con agua hasta saturarlo. (Rubio y Moreno, 2017, p.35)

c. Ensayos a las mezclas asfálticas en caliente

Ensayo Marshall (ASTM D 1559)

Este ensayo tiene la finalidad de encontrar el contenido óptimo de ligante para una determinada gradación de áridos, con tamaño máximo de 1” o menor. Se obtiene, además información sobre parámetros volumétricos como densidad, vacíos y parámetros mecánicos como la estabilidad de la mezcla y la fluencia. Se elaboran briquetas con cinco contenidos de asfalto, se ensayan en el aparato Marshall que les aplica una carga vertical. Se elaboran las gráficas de estos parámetros y se efectúa el diseño de acuerdo a las tablas del Instituto del Asfalto. Este ensayo se usa para diseñar en laboratorio y también para el control en campo. (Rosales, 2022)

Ensayos de Desempeño

Actualmente se consideran tres ensayos de desempeño: ensayo de módulo resiliente, ensayo de fatiga y ensayo de ahuellamiento (o de la rueda cargada de Hamburgo).

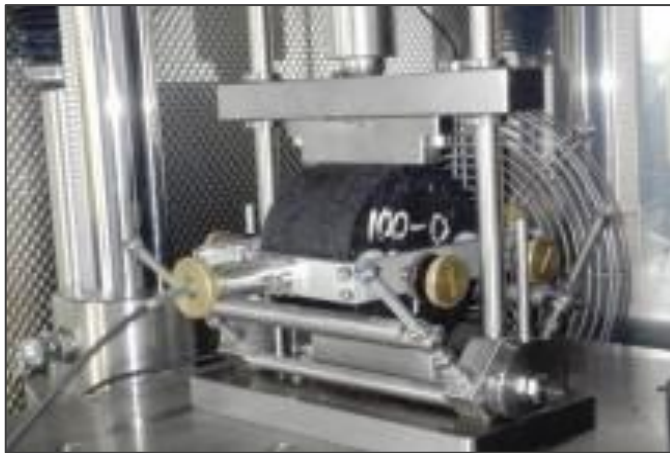
Módulo Resiliente o Dinámico por Tracción Indirecta ASTM D 4123-82

El módulo resiliente se considera una medida de la rigidez de la mezcla. Se define como la relación del esfuerzo de tracción repetitivo entre la deformación recuperable. Este parámetro indica la rigidez bajo carga cíclica, pero depende de temperatura y frecuencia de cargas, por lo que se hace el ensayo a varias temperaturas y frecuencias.

Consiste en un ensayo de tracción indirecta por compresión diametral pues las muestras cilíndricas se someten a carga diametral que induce tracción en el sentido perpendicular. Con el fin de simular las cargas reales del tránsito de tipo cíclico, se somete a las muestras a ciclos de carga y descarga con lapsos de reposo, y también a pulsaciones de carga. Se recomiendan temperaturas de ensayo de 5°C, 25°C y 40°C. (Rosales, 2022, pp.55-56). Ver Figura 24.

Figura 24

Ensayo de tracción indirecta



Nota. Rubio y Moreno (2019)

De forma similar se puede evaluar el daño por humedad, pues si la mezcla es susceptible a la humedad, la adherencia asfalto-árido disminuye y se podría presentar el fenómeno de peladura en la carpeta. Se hace acondicionando las muestras en agua y luego medirles el valor de TSR (Tasa de resistencia a la tracción).

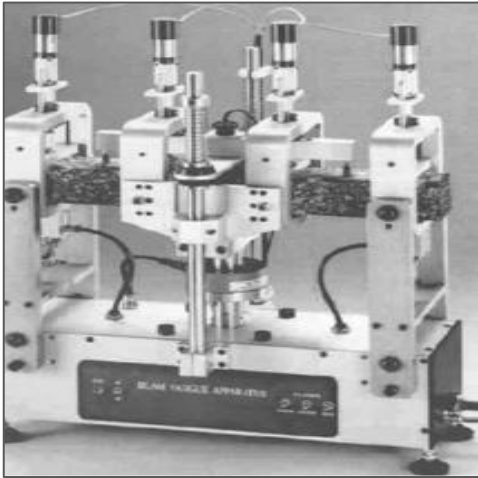
Ensayo de Fatiga en Viga (AASHTO T 321)

También denominado ensayo de Vida a Fatiga o en viga de cuatro puntos. Se ensaya una pequeña viga de mezcla de tamaño normalizado simplemente apoyada en los extremos y cargas aplicadas en los tercios generando esfuerzos de flexo tracción de tal forma que, el tramo central tiene fuerza cortante cero y momento puro constante positivo. Se aplican varios ciclos de carga, se determina el módulo de rigidez en el ciclo 100, asumido como inicial. La falla se considera a la disminución del 50% del módulo inicial. (Pfeiff et al., 2019, p.5)

Ver equipo en la Figura 25.

Figura 25

Equipo de Viga en flexión



Nota. Rondón y Reyes (2015)

Rueda Cargada de Hamburgo (AASHTO T 324, ASTM D 4867)

Este ensayo mide la deformación permanente de las mezclas asfálticas. En el ensayo HWTT (Hamburg Wheel Tracking Test), una muestra de mezcla de 15 cm de diámetro y generalmente un espesor de 10 cm se introduce en agua a 50°C y se hace pasar repetidamente sobre ella una rueda de acero de 703 N que simula una llanta vehicular. Se aplican máximo 20000 ciclos de carga o hasta que se alcance una deformación máxima de 12.5 mms. Se mide al final, la profundidad de la huella y la tasa de ahuellamiento. En este ensayo también se puede evaluar el daño por humedad (Rondón y Reyes, 2015, p.132-133; Peiff, 2019, p.4). Ver Figura 26

Figura 26

Equipo de la Rueda Cargada



Nota. Morea (2011)

2.3 Definición de términos básicos

Polímeros:

Compuestos de alto peso molecular constituidos por la unión de muchas moléculas simples y pequeñas, llamadas monómeros, para formar macromoléculas. (Franco et al, 2015, p.18)

Elastómeros:

“Polímeros con características de deformabilidad recuperable, pueden ser extendidos para luego regresar a su posición inicial sin deformación remanente”. (Palma et al, 2015, p.121)

Asfaltos modificados:

“Son ligantes asfálticos cuyas propiedades han sido mejoradas con una adición de polímero que altera su estructura química y sus propiedades físicas y/o mecánicas. Una de sus principales funciones es incrementar la resistencia a la deformación”. (Pay, 2017, p.16)

Mezclas asfálticas en caliente:

Combinación de CAP, agregados y filler en cantidades diseñadas que se efectúa a temperaturas alrededor de 160°C. (Huillcapoma y Figueroa, 2022, p.11)

Propiedades de la mezcla:

Son cualidades que deben tener las mezclas asfálticas para obtener un buen diseño (Instituto del Asfalto, 1992, p.60).

Resistencia:

Es la resistencia mecánica de la mezcla, determinada mediante el valor de estabilidad. (Huamán, 2022)

Estabilidad:

Capacidad para soportar las cargas de los vehículos con deformaciones compatibles con su función de servicio. En el aparato Marshall es la carga máxima bajo la cual la briqueta cede o falla. (Instituto del Asfalto MS-22, 1992, p.61)

Fluencia:

Deformación de la mezcla bajo carga al momento de la rotura en el ensayo Marshall. (MS-22, 1992, pp.75-76)

Durabilidad:

Habilidad del pavimento para resistir las acciones de cargas, clima y efectos de la oxidación que provocan el envejecimiento del asfalto, desintegración de la mezcla por separación de las películas de asfalto y fallas. (Alfaro y Jáuregui, 2022, p.14)

Susceptibilidad a la deformación permanente:

Característica para acumular deformaciones, manifestado por una sección transversal del pavimento que ya no se encuentra en su estado original. (Pay, 2017, p.10)

Deformación permanente:

Acumulación de pequeñas deformaciones irreversibles que ocurren al cargar repetidamente el pavimento. Principal forma de deterioro en pavimentos asfálticos. (Pay, 2017, p.10)

Ahuellamiento de la carpeta:

Surcos o hundimientos en la línea de las huellas en la superficie de la carpeta que se deben a una serie de causas como mezclas con poca resistencia, altas temperaturas y/o defectos constructivos. (Pfeiff et al., 2019)

CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS

3.1 Hipótesis

3.1.1 *Hipótesis general*

Las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos mejorarán sus propiedades mecánicas, en zonas de climas cálidos, año 2023.

3.1.2 *Hipótesis específicas*

- a. Las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos mejorarán la estabilidad, en zonas de climas cálidos, año 2023.
- b. Las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos mejorarán la durabilidad, en zonas de climas cálidos, año 2023.
- c. Las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos mejorarán la susceptibilidad a la deformación permanente, en zonas de climas cálidos, año 2023.

3.2 Variables

3.2.1 *Definición conceptual de las variables*

Variable independiente: Polímeros elastoméricos reactivos.

El polímero elastomérico reactivo (RET por las siglas en inglés) es un modificador formado por tres monómeros: Etileno, n-Butil Acrilato y Glicidil Metacrilato, por lo que también se le denomina terpolímero y es reactivo debido a su distribución química, que le permite reaccionar químicamente con los asfáltenos del asfalto para formar un compuesto inseparable. Tiene un excelente desempeño para alto tráfico, buenos resultados ante temperaturas extremas y alta resistencia a la deformación permanente o ahuellamiento.

Variable dependiente: Propiedades mecánicas.

Son cualidades que poseen las mezclas asfálticas, las cuales se diseñan mediante parámetros (mecánicos y volumétricos) necesarios para que resistan condiciones de cargas de tránsito y de clima durante su vida útil. Cuando son compactadas, tienen propiedades mecánicas de estabilidad (resistencia a la deformación bajo cargas), durabilidad y susceptibilidad a la deformación permanente.

3.2.2 Operacionalización de las variables

La matriz de operacionalización de las variables se adjunta al final del documento en el Anexo B.

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Tipo y nivel

La presente investigación es de tipo descriptivo pues buscó conocer y describir el grado de asociación entre los polímeros elastoméricos reactivos (RET) y las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente (MAC). La metodología se apoyó en el análisis de antecedentes, estudio de la teoría, proposición de hipótesis y recolección de datos de los resultados de los ensayos efectuados por otros investigadores para luego presentar las conclusiones del estudio.

4.1.1 Método

El método utilizado fue deductivo debido a que, partió de la teoría general para, después de la revisión de antecedentes, plantear las hipótesis que luego de operacionalizar las variables se contrastaron, por medio de la observación de los resultados de las pruebas realizadas por otros investigadores a las mezclas, convencional y modificada, para lo cual se analizaron sus propiedades verificando si éstas mejoraron. Se analizaron los resultados y se discutieron con los antecedentes para establecer la relación entre las variables.

4.1.2 Orientación

El estudio tuvo orientación aplicada, pues propone dar solución al problema de obtener mejores propiedades mecánicas de las mezclas en caliente mediante polímeros elastoméricos reactivos, para aplicarlas en zonas de climas cálidos.

4.1.3 Enfoque

Se trató de un enfoque cuantitativo pues se recolectó, analizó y relacionó datos cuantitativos de resultados de ensayos de laboratorio realizados al asfalto y a las mezclas. Se obtuvieron resultados cuantitativos en función a los ensayos.

De acuerdo a la recolección de datos, fue retrolectiva, pues se recogieron los datos de otros investigadores.

4.1.4 Tipo de investigación

Se trató de una investigación de tipo descriptivo, pues se evaluó la dependencia entre variables de estudio: el polímero elastomérico reactivo (RET) y las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente (MAC).

4.1.5 Nivel de la investigación

El nivel fue descriptivo, porque describe la relación que hay entre el polímero RET y las propiedades mecánicas de las MAC. También explicativo, porque se explicó cómo se relaciona el contenido de polímero RET con las propiedades mecánicas de las mezclas.

4.2 Diseño de la investigación

El diseño ha sido clasificado de diferentes maneras:

Según la intervención del investigador, el diseño fue no experimental, ya que no hubo intervención del investigador para manipular la variable independiente.

Según la toma de datos, el diseño fue retrospectivo ya que los datos se recogieron de fuente secundaria.

Según la cantidad de veces que medimos las variables, el diseño fue transversal pues las variables se midieron en una oportunidad.

4.3 Población y muestra

4.3.1 Población

Para Hernández et al (2014) población es “el conjunto de casos con las mismas especificaciones” (p. 235). Para este estudio, la población consistió en todas las mezclas asfálticas en caliente: convencionales (sin polímero) y mezclas modificadas con polímeros elastoméricos reactivos (RET), elaboradas en las investigaciones.

4.3.2 Diseño muestral

En este estudio se empleó el muestreo por conveniencia, ya que la selección no depende del azar pues los elementos se escogen de acuerdo a los criterios. Los criterios de inclusión fueron: diseños de mezcla, convencional y modificada con polímero RET realizadas en las investigaciones, de las cuales, se recopilamos los datos para el análisis de resultados. Los criterios de exclusión fueron: otras mezclas que no corresponden a diseños con polímero RET.

La unidad de observación fueron los resultados de los ensayos a las mezclas asfálticas elaboradas por los investigadores. La unidad de análisis según Hernández et al. (2014), son los sujetos que se van a medir. En este caso, fueron los resultados de los ensayos Marshall y ensayos de desempeño realizados a los dos tipos de mezcla.

4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se recogieron los datos de fuentes secundarias por observación.

4.4.1 Tipos de técnicas e instrumentos

Para recolectar los datos utilizamos la técnica de la observación, pues se recogieron resultados de ensayos de laboratorio realizados por otros investigadores. Los

instrumentos consistieron en los formatos de los ensayos de laboratorio correspondientes a los cementos asfálticos, a los agregados y ensayos a las mezclas realizados.

4.4.2 Criterios de validez y confiabilidad de los instrumentos

En la investigación, se tomaron en cuenta resultados de ensayos de laboratorio normalizados por la ASTM, AASHTO o MTC, los cuales ya se encuentran validados y no será necesario efectuar nuevamente la validación de estos instrumentos.

4.4.3 Procedimientos para la recolección de datos

La primera etapa de recolección correspondió a la búsqueda de antecedentes y la conceptualización del marco teórico como fundamento para el estudio.

La segunda etapa correspondió a la recolección de datos de fuente secundaria correspondientes a resultados de pruebas de laboratorio ejecutadas por otros investigadores con el polímero RET. Como primer paso, se buscó investigaciones, tesis o artículos científicos que han trabajado con RET, que no son muchas ya que es un polímero poco difundido en la actualidad. De esas tesis o artículos se recogió información sobre los materiales utilizados, luego se recopilaron los resultados de los ensayos, teniendo en consideración que se requieren datos de ensayos de calidad de los materiales para preparar las mezclas, como agregados, asfalto convencional y asfalto modificado con RET. También se recogió información sobre resultados de los ensayos a las mezclas asfálticas, como ensayos para el diseño de mezcla y ensayos de desempeño que permiten evaluar su comportamiento. En este proceso los datos se recogen en forma retro lectiva, de los resultados de laboratorio mediante los formatos correspondientes para cada prueba. Los procedimientos de todos los ensayos son normalizados.

La tercera etapa consistió en el análisis, comparación y procesamiento de la información de los ensayos para obtener los resultados. Una vez con los resultados, se analizaron y se procedió a la contrastación de hipótesis para poder elaborar las conclusiones. Finalmente, se hicieron las recomendaciones que estimamos pertinentes.

4.5 Técnicas para el procesamiento y análisis de la información

Se recopiló la información de los diferentes ensayos, utilizando sus formatos para procesar los resultados. La información que se obtuvo se presentó en cuadros, tablas y gráficos para ser analizada, contrastada y para establecer la relación entre variables. El análisis de información se efectuó mediante tablas de frecuencia y gráficos de barra que permiten visualizar la relación entre variables y mediante estadística inferencial se comprobó la dependencia entre variables.

El procedimiento inició con la revisión de antecedentes que sirvieron para estudiar la cantidad de polímero usada en las mezclas modificadas, de acuerdo a varios métodos de obtención del porcentaje óptimo. Se revisaron tesis y artículos científicos que estudiaron mezclas con Elvaloy RET, que es el nombre comercial del polímero en estudio. Se encontró que los contenidos óptimos que tomaron en dichas tesis por diferentes métodos, fluctuaban entre 1.0% y 1.4%, que está de acuerdo con la recomendación del fabricante. Luego, se efectuó la recolección de la información de los ensayos de calidad que se requieren para los materiales que se utilizan para preparar las mezclas. Se estudiaron los agregados, el asfalto base para elaborar las mezclas que corresponde al CAP PEN 60/70 y el asfalto modificado con polímero Elvaloy RET. Lo siguiente fue recoger información de los ensayos de calidad a los áridos y verificar si cumplían con las normas del EG 2013, verificando los requisitos indicados en el marco teórico. Posteriormente, se recogió información de los ensayos de caracterización a los CAP convencional y al asfalto modificado. El siguiente paso fue recoger los resultados de los ensayos Marshall a las mezclas convencionales para evaluar el diseño. De la misma manera, recogimos información sobre el diseño de las mezclas modificadas. La práctica más difundida es considerar 15 briquetas para cada ensayo Marshall, 3 unidades para cada contenido de ligante. Teniendo los datos de los resultados de los ensayos Marshall, pasamos a evaluar todos los parámetros de diseño, para efectuar luego el análisis de los resultados. Lo siguiente fue evaluar los ensayos de desempeño. En relación a estos, cabe mencionar que se consideró únicamente el ensayo de la Rueda cargada de Hamburgo para medir la deformación permanente y obtener el resultado del valor de ahuellamiento de la mezcla. Con la información recogida, pasamos a la comparación de los resultados y poder inferir las propiedades que tendrán las mezclas mediante los parámetros volumétricos y mecánicos obtenidos del Marshall. Y con los resultados de la prueba de Hamburgo pudimos inferir sobre el comportamiento de la mezcla ante la deformación permanente. Con estos análisis hicimos la contrastación de las hipótesis planteadas para luego enunciar las conclusiones.

CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

5.1 Recolección de datos

La recolección de datos se hizo a partir de investigaciones donde hayan estudiado la influencia del polímero RET en las propiedades de las mezclas y en su comportamiento con respecto a la deformación permanente que, es una de las fallas recurrentes en los pavimentos asfálticos en zonas calurosas.

Siendo una investigación No Experimental, nos basamos en un estudio de casos, en los cuales, se hayan realizado ensayos Marshall y Rueda de Hamburgo, ya que, para contrastar las hipótesis planteadas es necesario obtener valores de estabilidad, parámetros volumétricos y ahuellamiento.

Cabe indicar que son pocas las investigaciones sobre este polímero en mezclas asfálticas mediante Marshall y pruebas de desempeño. Incluso, algunas investigaciones mencionadas en los antecedentes sólo estudiaron al asfalto modificado mediante ensayos de caracterización con pruebas convencionales como penetración, recuperación elástica y algunos ensayos reológicos.

Los casos de estudio corresponden a mezclas asfálticas con RET y son los siguientes:

Caso 1. Broncano y Campos (2021): Influencia del cemento asfáltico modificado con polímeros SBS y ELVALOY sobre las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente. Arequipa.

Caso 2. Chávez (2019): Mejoramiento del comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica convencional adicionando polímero Elvaloy 4170 RET para la Av. José Granda, SMP. Lima-Perú.

Caso 3. López y Puma (2017): Caracterización de mezclas asfálticas en caliente elaboradas con cemento asfáltico modificado con polímeros SBS y RET, mediante la determinación del módulo de rigidez. Quito-Ecuador.

5.1.1 Agregados pétreos

Caso 1. Los agregados provienen de la cantera La Poderosa-Supermix, distrito de Uchumayo, provincia de Arequipa, a 2040 m.s.n.m.

Caso 2. Los agregados proceden de la cantera Carapongo en Huachipa, en el departamento de Lima, de donde los investigadores recolectaron el material grueso y la arena gruesa, de los cuales se tomó la fracción menor a 1”.

Caso 3. Los agregados que han sido utilizados para las mezclas provienen de la cantera Pintag sobre el río Pita, a 20 Km de la Planta Asfáltica Naranjo-López, en la provincia de Pichincha, Ecuador. Los agregados que se utilizaron fueron: agregado triturado grueso de ¾”, agregado triturado grueso de ½” y arena de trituración.

5.1.2 Cementos asfálticos

Los asfaltos considerados en este estudio son: cemento asfáltico PEN 60-70 y el mismo, modificado con Elvaloy RET. El ligante convencional se seleccionó de acuerdo a la temperatura del lugar y según lo señalado en la Tabla 415-01 del EG 2013 (MTC, 2013, p.222). Los CAP usados en los casos de estudio son los siguientes:

Caso 1. En esta investigación (Broncano y Campos, 2021) trabajaron con cemento asfáltico convencional PEN 60/70. Como asfalto modificado con Elvaloy, utilizaron el asfalto “Betutec IC con Elvaloy” proporcionado por TDM Asfaltos.

Caso 2. En este estudio (Chávez, 2019) experimentó con cemento asfáltico (CAP) convencional 60/70 de Refinería La Pampilla proporcionado por Repsol. El asfalto modificado correspondió a un CAP modificado con Elvaloy 4170 RET, con tres contenidos de polímero RET (1.1%, 1.4% y 1.7%), proporcionados por TDM. (p. 70)

Caso 3. En este estudio (López y Puma, 2017) trabajaron con cemento asfáltico AC-20 de la Refinería Esmeraldas de Petroecuador y con asfalto modificado con RET de Emulsiones Ecuador EMULDEC (Quito). El polímero usado fue Elvaloy 4170 RET de DuPont. Mencionamos que el asfalto AC-20 (clasificado por viscosidad), es similar a un CAP 60/70, según lo indicado en las Especificaciones para asfaltos clasificados por viscosidad a 60°C de la ASTM, como se presenta en la Figura 27.

Figura 27

Especificaciones para CAP clasificado por viscosidad a 60°C (ASTM)

Designación	Grado de Viscosidad						Norma
	AC-25	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40	
Viscosidad, 140°F (60°C), P	250 ± 20	500 ± 100	1000 ± 200	2000 ± 400	300 ± 600	400 ± 800	D-2170
Viscosidad, 275°F(135°C), mín., cSt	125	175	250	300	350	400	D-2170
Penetración, 77°F (25°C), 100g, 5 s, mín.	220	140	80	60	50	40	D-5
Punto de Inflamación, Cleveland Copa Abierta, mín., °F (°C)	325 (163)	350 (177)	425 (219)	450 (232)	450 (232)	450 (232)	D-92
Solubilidad en tricloroetileno, mínimo, %	99	99	99	99	99	99	D-2042
Pruebas de los residuos de la prueba de horno de película delgada							D-1754
Viscosidad, (140°C) 60°C, máx., P	1250	2500	5000	10000	15000	20000	D-2171
Ductilidad, 77°F (25°C), 5cm/min, mín., cm	100 ^A	100	75	50	40	25	D-113

^ASi la ductilidad es menor que 100, se aceptará el material si la ductilidad a 15,5 ° C es de 100% a una velocidad de tracción de 5 cm / min

Nota. López y Puma (2017)

5.1.3 Polímero

Se estudió el polímero elastomérico reactivo (RET) cuyo nombre comercial es Elvaloy RET. Es un terpolímero de Etileno-Acrilato de Butilo-Glicidil Metacrilato (con nombre genérico EBAGMA).

Las características del polímero Elvaloy RET se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7

Características del polímero ELVALOY™ 4170 Copolímero

Característica	Método de Prueba	Unidad	Valor
Índice de Fluidez (190°C)	ASTM D 1238	g/10min.	8
Punto de Fusión	ISO 11357-3	°C	72°
Densidad	ASTM D150	g/cm3	0.94

Nota. Hoja de Datos Técnicos de Dow.com (2020).

Se presenta el polímero RET que viene en forma de pellets (gránulos) cristalinos. en la Figura 28.

Figura 28

Presentación del polímero Elvaloy 4170 RET de DuPont



Nota. López y Puma (2017)

Se usa el RET en contenidos bajos, de 0.8%-1.5%, pues es muy reactivo y tiene riesgo de formación de gel. Por esto, se usa ácido poli fosfórico (PPA) para facilitar la reacción (catalizador). En Perú se usa PPA al 116%, concentración que permite usar contenidos bajos de PPA y menor porcentaje de polímero.

La cantidad de RET y ácido poli fosfórico (PPA) usado en investigaciones se expone en la Tabla 8.

Tabla 8*Cantidad óptima de polímero (RET) y método de determinación*

Tema de las Investigaciones	Autor	Año	Método	% RET	Asfalto PEN % PPA
<u>Tesis Nacionales:</u>					
1. Polímeros para mejorar propiedades Del CAP. Cajamarca.	Ibáñez	2015	Ensayos al ligante	1.3% 0.08%	120/150 PPA
2. Comportamiento mecánico de una MAC con Elvaloy 4170 RET. Lima.	Chávez	2019	Marshall	1.4% 0.02%	60/70 PPA
<u>Tesis Internacionales:</u>					
1. Incidencia de Elvaloy en las Propiedades de las MAC. Colombia.	Franco	2015	Marshall y Desempeño	1.2% 0.4%	60/70 PPA
2. Caracterización de las MAC con AMP con SBS y RET. Ecuador.	López y Puma	2017	Desempeño	1.3%	AC 20
3. Adhesión de AMP con distintos Polímeros. Costa Rica.	Chen	2018	Adherencia	1.0% 0.2%	AC 30 PPA
<u>Artículos Científicos Internacionales:</u>					
1. Modificación del asfalto con ter-Polímero Etileno-MA-GMA. Brasil	Da Silva	2017	Desempeño	1.0% 0.3%	AC 50/70 PPA
2. Propiedades de desempeño del AMP Terpolímero Reactivo. Turquía.	Geçkil	2018	Desempeño y Reológicos	1.0%	100/150
3. Mejora de la estabilidad al Almacenamiento de AMP con SBS y desechos plásticos con RET. Australia.	Joohari	2022	Almacenamiento	1.0% 0.2%	PEN 70 PPA

Nota. Elaboración propia.

MAC: Mezcla asfáltica en caliente. AMP: Asfalto modificado con polímeros. CAP: Cemento asfáltico de petróleo. PEN: Grado de penetración.

RET: Terpolímero elastomérico reactivo.

En cada caso de estudio se utilizaron los siguientes polímeros y contenidos:

Caso 1. Broncano y Campos (2021) trabajaron con el polímero Elvaloy, pero no indicaron el porcentaje pues usaron el asfalto “Betutec IC con Elvaloy” que lo brindó TDM ya como asfalto modificado (p. 257).

Caso 2. Chávez (2019) utilizó el polímero Elvaloy 4170 RET, en contenidos de 1.1%, 1.4% y 1.7% con 0.02% de PPA para los tres contenidos (p.55).

Caso 3. López y Puma (2017) trabajaron con el polímero Elvaloy 4170 RET de DuPont, en contenidos de 1.0%, 1.3%, 1.5% y 2.0% (p.109).

5.1.4 Filler

Como filler o relleno mineral se ha usado en las investigaciones, el cemento Portland tipo I o también cal hidratada.

5.2 Procesamiento de datos de ensayos

Este ítem está referido a la toma de datos de los ensayos de laboratorio realizados en las investigaciones. Incluye ensayos de caracterización de los materiales que conforman las mezclas, Marshall y ensayos de desempeño.

5.2.1 Ensayos de caracterización de los agregados

Caso 1. Broncano y Campos (2021)

a. Características del agregado grueso. Los ensayos según la normativa MTC son mostrados en la Tabla 9. Los requisitos corresponden a la Tabla 423-01 del EG 2013 (p.265).

Tabla 9

Verificación de Requisitos Agregado Grueso- Cantera La Poderosa. Caso 1

Ensayo	Norma	Resultado	Requisito	Verificación
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	15%	40% máx.	Cumple
Durabilidad (al sulfato de Magnesio)	MTC E 209	4%	18% máx.	Cumple
Adherencia	MTC E 517	+95	+95	Cumple
Índice de durabilidad	MTC E 214	94%	35 mín.	Cumple
Partículas chatas y alargadas	ASTM 4791	6%	10% máx.	Cumple
Caras fracturadas	MTC E 210	85/57	85/50	Cumple
Sales solubles totales	MTC E 219	0.1%	0.5% máx.	Cumple
Absorción	MTC E 206		1.0% máx.	

Nota. Broncano y Campos (2021)

b. Características del agregado fino. Los ensayos según la normativa MTC se muestran en la Tabla 10. Los requisitos corresponden a la Tabla 423-02 del EG 2013 (p.265).

Tabla 10

Verificación de Requisitos Agregado Fino- Cantera La Poderosa. Caso 1

Ensayo	Norma	Resultado	Requisito	Verificación
Equivalente de arena	MTC E 114	85%	60% mín.	Cumple
Angularidad	MTC E 222	29.1%	30% mín.	No C.
Azul de metileno	AASHTO TP57	4	8% máx.	Cumple
Índice de plasticidad (malla N°40)	MTC E 111	NP	NP	Cumple
Durabilidad (al sulfato de Magnesio)	MTC E 209	8.2%	18% máx.	Cumple
Índice de durabilidad	MTC E 214	94%	35 mín.	Cumple
Índice plasticidad (N°200)	MTC E 111	NP	4% máx.	Cumple
Adhesividad Riedel Weber	MTC E 220		4 mín.	
Sales solubles	MTC E 219	0.24%	0.5% máx.	Cumple

Nota. Broncano y Campos (2021)

c. Granulometría del agregado grueso. Se muestra en la Tabla 11 y Figura 29.

Tabla 11

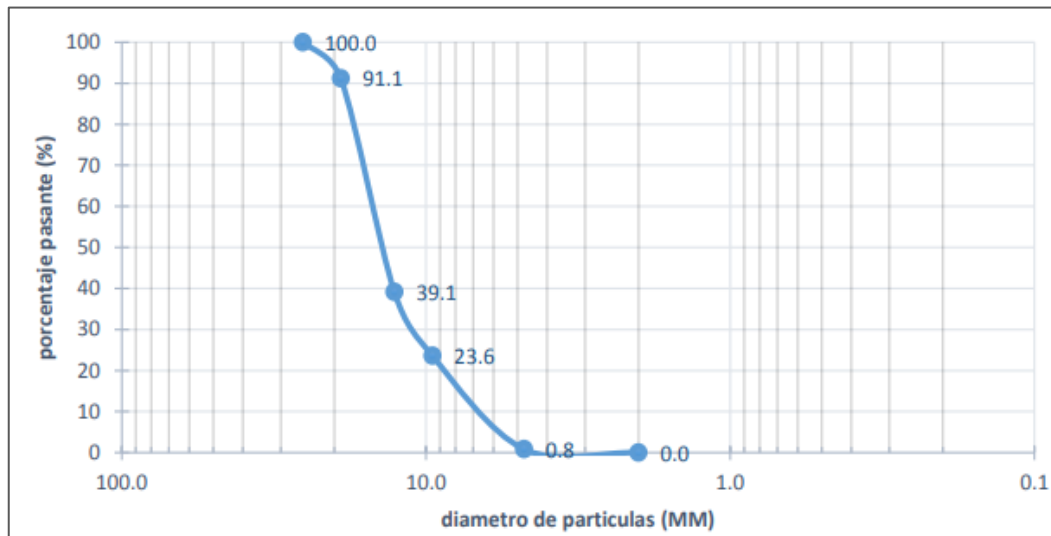
Granulometría del Agregado Grueso. Cantera La Poderosa. Caso 1

Tamiz	D (mm)	Retenido (g)	% Ret.	% Ret. Acum.	% Pasa
1"	25.40	0.0	0.0	0.00	100.00
¾"	19.10	505.8	8.86	8.86	91.14
½"	12.70	2972.0	52.05	60.91	39.09
3/8"	9.50	885.6	15.51	76.42	23.58
N°4	4.80	1300.6	22.78	99.19	0.81
N°10	2.00	46.0	0.81	100.00	0.00
N°40	0.425				
N°80	0.180				
N°200	0.075				
TOTAL		5710.0			

Nota. Broncano y Campos (2021)

Figura 29

Curva Granulométrica del A.G. Cantera La Poderosa, Arequipa. Caso 1



Nota. Broncano y Campos (2021)

d. Granulometría del agregado fino.

Se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12

Granulometría del Agregado Fino. Cantera La Poderosa. Caso 1

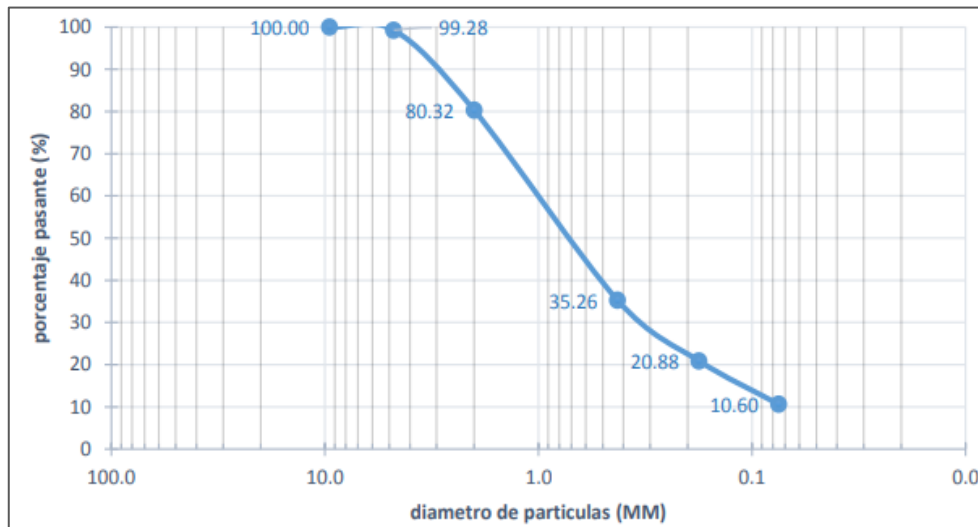
Tamiz	D (mm)	Retenido (g)	% Ret.	% Ret. Acum.	% Pasa
3/8"	9.50	0.0	0.0	0.00	100.00
N°4	4.80	3.6	0.7	0.72	99.28
N°10	2.00	94.8	19.0	19.68	80.32
N°40	0.425	225.3	45.1	64.74	35.26
N°80	0.180	71.9	14.4	79.12	20.88
N°200	0.075	51.4	10.3	89.40	10.60
Fondo		53.0	10.6	100.00	0.00
TOTAL		500.0			

Nota. Broncano y Campos (2021)

La curva granulométrica correspondiente se muestra en la Figura 30.

Figura 30

Curva Granulométrica del A.F. Cantera La Poderosa, Arequipa. Caso 1



Nota. Broncano y Campos (2021)

e. Granulometría de la combinación de agregados

De acuerdo a la Tabla 423-03 del *EG 2013* (p.266), la granulometría de la combinación de agregados debe cumplir con alguna de las gradaciones. Se trabajó con la gradación MAC-1 utilizando 48.5% de Agregado Grueso y 51.5% de Agregado Fino. Ver Tabla 13.

Tabla 13

Granulometría de la Combinación de Agregados La Poderosa. Caso 1

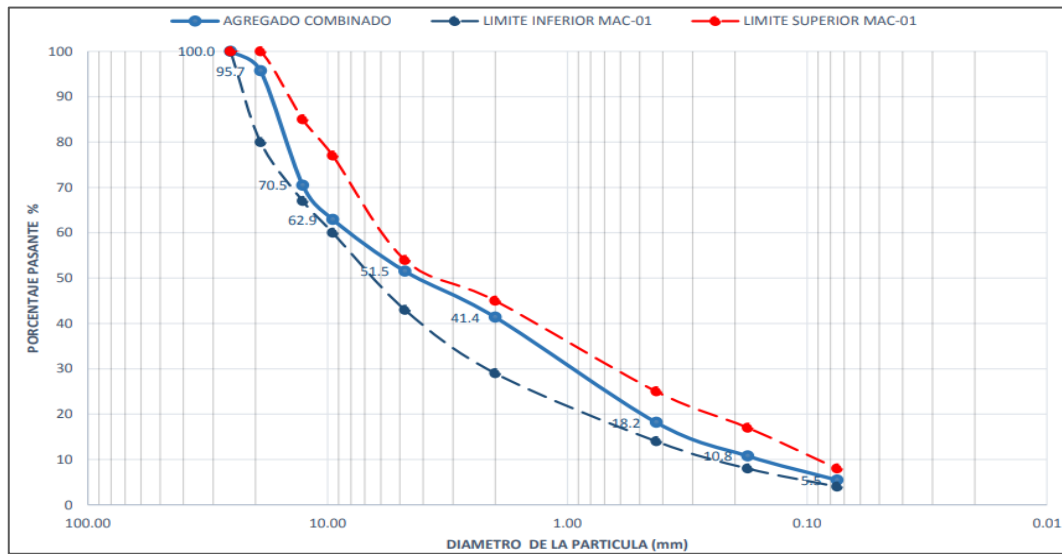
Tamiz D (mm)	% Pasa	MAC-1	Verificación
1”	25.40	100.00	100.0 Cumple
¾”	19.10	95.7	80-100 Cumple
½”	12.70	70.46	67-85 Cumple
3/8”	9.50	62.94	60-77 Cumple
N°4	4.80	51.52	43-54 Cumple
N°10	2.00	41.36	29-45 Cumple
N°40	0.425	18.16	14-25 Cumple
N°80	0.180		
N°200	0.075		

Nota. Broncano y Campos (2021)

La curva granulométrica de la combinación se presenta en la Figura 31.

Figura 31

Curva Granulométrica de la Combinación Cantera La Poderosa. Caso 1



Nota. Broncano y Campos (2021)

Caso 2. Chávez (2019)

a. Características del agregado grueso. Los ensayos de caracterización según la normativa del EG 2013 del MTC se muestran en la Tabla 14. Los requisitos corresponden a la Tabla 423-01 del EG 2013 (p.265) por MTC.

Tabla 14

Verificación de Requisitos Agregado Grueso- Cantera Carapongo. Caso 2

Ensayo	Norma	Resultado/Requisito	Verificación
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	17% 40% máx.	Cumple
Durabilidad (al sulfato de Magnesio)	MTC E 209	1.7% 18% máx.	Cumple
Adherencia	MTC E 517	+95 +95	Cumple
Índice de durabilidad	MTC E 214	94% 35 mín.	Cumple
Partículas chatas y alargadas	ASTM 4791	3.5% 10% máx.	Cumple
Caras fracturadas	MTC E 210	97.1/96.8 85/50	Cumple
Sales solubles totales	MTC E 219	0.06% 0.5% máx.	Cumple
Absorción	MTC E 206	0.68% 1.0% máx.	Cumple

Nota. Chávez (2019)

b. Características del agregado fino.

Los ensayos de caracterización con la normativa MTC se muestran en la Tabla 15. Los requisitos corresponden a la Tabla 423-02 del *EG 2013* (p.265).

Tabla 15

Verificación de Requisitos Agregado Fino- Cantera Carapongo. Caso 2

Ensayo	Norma	Resultado	Requisito	Verificación
Equivalente de arena	MTC E 114	77%	60% mín.	Cumple
Angularidad	MTC E 222	--	30% mín.	
Azul de metileno	AASHTO TP57	0.001	8% máx.	Cumple
Índice de plasticidad (malla N°40)	MTC E 111	NP	NP	Cumple
Durabilidad (sulfato de Magnesio)	MTC E 209	4%	18% máx.	Cumple
Índice de durabilidad	MTC E 214	--	35 mín.	
Índice de plasticidad (malla N°200)	MTC E 111	NP	4% máx.	Cumple
Adhesividad Riedel Weber	MTC E 220	4	4 mín.	Cumple
Sales solubles	MTC E 219	0.12%	0.5% máx.	Cumple

Nota. Chávez (2019)

c. Granulometría de la Combinación de agregados.

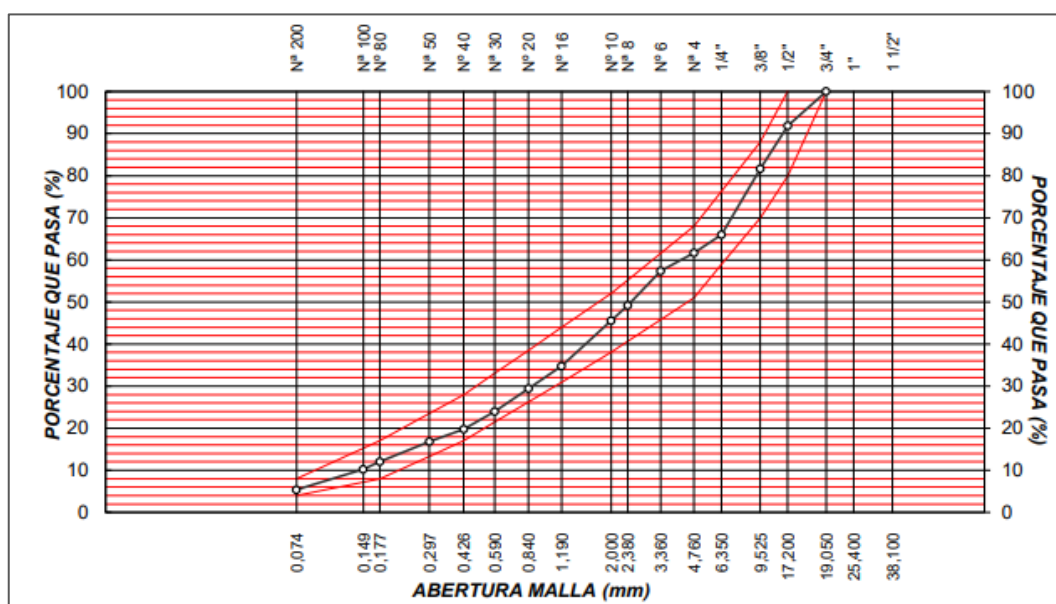
Se utilizó 38% de agregados gruesos y 62% de agregado fino para cumplir con la gradación MAC-2.

La granulometría se presenta en la Tabla 16 y la curva granulométrica correspondiente en la Figura 32.

Tabla 16*Granulometría del Agregado Grueso. Cantera Carapongo. Caso 2*

Tamiz	D (mm)	% Pasa	MAC-2	Verificación
¾"	19.10	100	100	Cumple
½"	12.70	91.9	80-100	Cumple
3/8"	9.50	81.7	70-88	Cumple
N°4	4.80	61.7	51-68	Cumple
N°10	2.00	45.6	38-52	Cumple
N°40	0.425	19.8	17-28	Cumple
N°80	0.180	12.0	8-17	Cumple
N°200	0.075	5.4	4-8	Cumple

Nota. Adaptado de Chávez (2019) p. 66.

Figura 32*Curva Granulométrica de la Combinación Cantera Carapongo. Caso 2*

Nota. Chávez (2019)

Caso 3. López y Puma (2017)

a. Características del agregado grueso. Los ensayos de caracterización según la normativa ecuatoriana NTE INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización) se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17*Verificación de Requisitos Agregado Grueso- Cantera Río Pita. Caso 3*

Ensayo	Norma	Resultado	Requisito	Verific.
Abrasión Los Ángeles	ASTM C 131	33%	40% máx.	Cumple
Durabilidad (al sulfato Magnesio)	ASTM C 88	4.86%	18% máx.	Cumple
Partículas chatas y alargadas	ASTM D 4791	6%	10% máx.	Cumple
Caras fracturadas	ASTM D 5821	86%	80% mín.	Cumple
Absorción	ASTM C 127	2.2%	1.0% máx.	No C.

Nota. López y Puma (2017)**b. Características del agregado fino.**

La caracterización se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18*Verificación de Requisitos Agregado Fino- Cantera Río Pita. Caso 3*

Ensayo	Norma	Resultado	Requisito	Verificación
Equivalente de arena	ASTM D 2419	70%	60% mín.	Cumple
Azul de metileno	AASHTO TP57	8	8% máx.	Cumple
Índice de plasticidad (malla N°40)	ASTM D-4318	NP	NP	Cumple
Durabilidad (al sulfato de Magnesio)	ASTM C 88	5.21%	18% máx.	Cumple
Contenido de terrones de arcilla	ASTM C 142	0.4%	10%	Cumple
Absorción	ASTM C 128	0.9%	1.0% máx.	Cumple

Nota. López y Puma (2017).**c. Granulometría de la combinación de agregados**

Se utilizó 5% de agregado grueso $\frac{3}{4}$ ", 40% de agregado grueso $\frac{1}{2}$ " y 55% de agregado fino.

Ver granulometría en la Figura 33.

Figura 33

Granulometría de la Combinación de Agregados. Cantera Río Pita. Caso 3

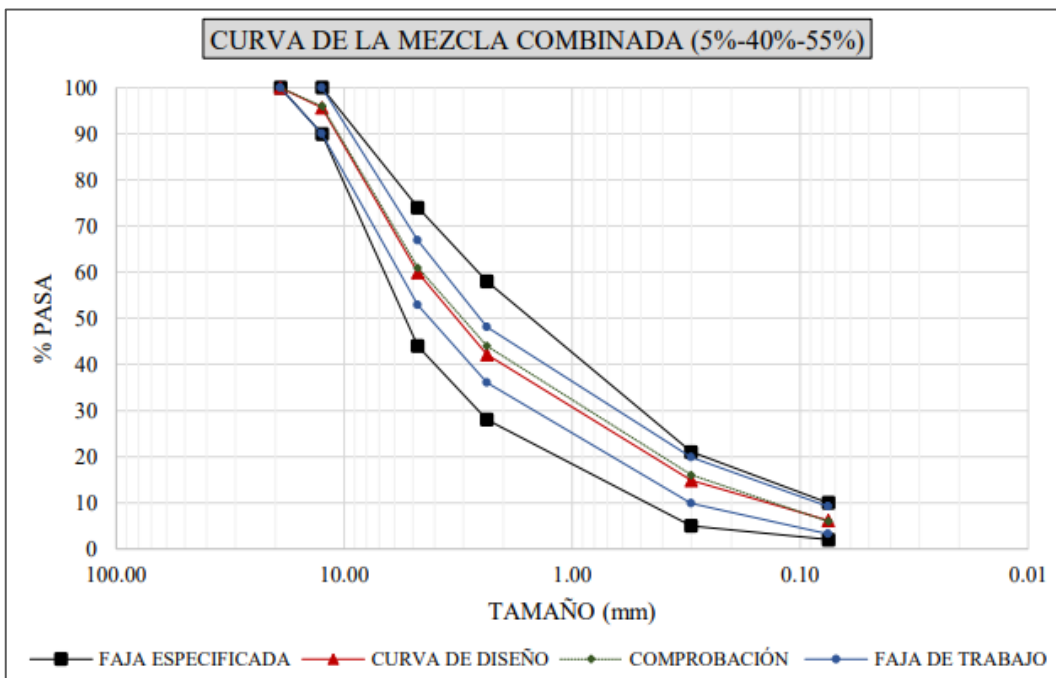
FUENTE DEL MATERIAL: RÍO PITA (Planta Naranjo-López)								
AGREGADO TIPO A: GRUESO (3/4"), MEDIO (1/2") Y FINO (ARENA)								
GRADUACIÓN MATERIAL % QUE PASA								
TAMIZ	pulg mm	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 50	No. 200
GRUESO (3/4" PITA)		100	13,6	2,3	1,4	1,2	0,8	0,5
MEDIO (1/2" PITA)		100	100	72	16,1	8,4	6,2	2,9
FINO (ARENA)		100	100	100	97,1	70,3	22,4	9,1
GRADUACIÓN COMBINADA PARA LA MEZCLA								
FRACCIÓN	pulg mm	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 50	No. 200
GRUESO (3/4" PITA)	5 %	5,0	0,7	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0
MEDIO (1/2" PITA)	40 %	40,0	40,0	28,8	6,4	3,4	2,5	1,2
FINO (ARENA)	55 %	55,0	55,0	55,0	53,4	38,7	12,3	5,0
MEZCLA OBTENIDA	100 %	100	95,7	83,9	59,9	42,1	14,8	6,2
% Retenido acumulado		0,00	4,3	16,1	40,1	57,9	85,2	93,8
% Retenido Parcial		0,00	4,3	11,8	24,0	17,8	27,2	8,7
Comprobación de la mezcla		100	96,0	61,0	44,0	87	16,0	6,0
ESPECIFICACIONES MOP-001-F-2002 TABLA 405-S.1 (1/2")		100	90	--	44	28	5	2
			100	--	74	58	21	10
FAJA IDEAL		100,0	95,0	--	59,0	43,0	13,0	6,0
FAJA DE TRABAJO		100	90	--	53	36	10	3
		±8	±8	--	±7	±6	±5	±3

Nota. López y Puma (2017)

La curva granulométrica de la combinación de áridos se muestra en la Figura 34.

Figura 34

Curva Granulométrica de la Combinación de agregados. Ecuador. Caso 3



Nota. López y Puma (2017)

5.2.2 Caracterización de los cementos asfálticos convencional y modificado

Caso 1. Broncano y Campos (2021)

a. CAP PEN 60/70 Convencional

Los ensayos realizados al CAP 60/70, convencional y al asfalto envejecido verifican los requisitos de la tabla 415-02 del EG 2013.

Están indicados en la Tabla 19.

Tabla 19

Verificación de Requisitos CAP PEN 60/70 (Convencional). Caso 1

Ensayo, Unidad	Norma	Resultado/Requisito	Verificación
Penetración a 25°C, 0.1 mm	MTC E 304	61 60-70	Cumple
Punto de inflamación, °C	MTC E 312	290 232 mín.	Cumple
Punto de ablandamiento, °C	MTC E 307	50	
Ductilidad a 25°C, cm	MTC E 306	150 100 mín.	Cumple
Solubilidad en tricloroetileno, %	MTC E 302	99.7 99 mín.	Cumple
Viscosidad Cinemática 135°C, cSt.	ASTM D2170	424.4 200 mín.	Cumple
Pruebas sobre la Película delgada			
Pérdida de masa, %	ASTM D1754	0.2 0.8% máx.	Cumple
Penetración retenida, %	MTC E 304	66 52+ mín.	Cumple
Ductilidad del residuo a 25°C, cm	MTC E 306	78 50 mín.	Cumple

Nota. Adaptado del Certificado de Calidad de PETROPERU (p.259) por Broncano, 2019.

b. Asfalto Modificado con Polímero (AMP)

Los ensayos que se efectuaron al AMP con RET y al residuo envejecido verifican los requisitos de la sección 431 del EG 2016, listados en la Tabla 20.

Tabla 20*Verificación de Requisitos CAP Modificado con Elvaloy RET. Caso 1*

Ensayo, Unidad	Norma	Resultado/Requisito	Verificación
Penetración a 25°C, dmm.	MTC E 304	58 50-75	Cumple
Punto de inflamación, °C	MTC E 312	283 232 mín.	Cumple
Ductilidad a 25°C, cm	MTC E 306	100 mín.	
Punto de ablandamiento, °C	MTC E 302	62 60 mín.	Cumple
Recuperación elástica a 25°C	ASTM D 6084	80% 60 mín.	Cumple
Viscosidad Abs. 60°C, poise	MTC E 308	67731 5000 mín.	Cumple
Viscosidad Cin. 135°C, cSt.	MTC E 310	1692 3000 máx.	Cumple
Solubilidad en tricloroetileno	MTC E 302	99.75 99%	Cumple
Pruebas sobre la Película delgada			
Recuperación elástica 25°C	ASTM D 6084	78% 60% mín.	Cumple
Penetración 4°C, 60s, dmm	MTC E 304	24 13 mín.	Cumple
Separación, diferencia entre			
Punto de ablandamiento	MTC E 307	2.5 10 máx.	Cumple
Porción superior e inferior, °C			

Nota. Broncano y Campos (2021)**Caso 2. Chávez (2019)****a. CAP PEN 60/70 Convencional**

Los ensayos al CAP y requisitos EG 2013 se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21*Verificación de Requisitos CAP PEN 60/70 (Convencional). Caso 2*

Ensayo, Unidad	Norma	Resultado/Requisito	Verificación
Penetración a 25°C, 0.1 mm	MTC E 304	67 60-70	Cumple
Punto de inflamación, °C	MTC E 312	296 232 mín.	Cumple
Punto de ablandamiento, °C	MTC E 307	50	
Ductilidad a 25°C, cm	MTC E 306	>105 100 mín.	Cumple
Solubilidad en tricloroetileno, %	MTC E 302	99.95 99 mín.	Cumple
Viscosidad Cinemática 135°C, cSt.	ASTM D2170	400 200 mín.	Cumple

Pruebas sobre la Película delgada

Pérdida de masa, %	ASTM D1754	0.39	0.8% máx.	Cumple
Penetración retenida, %	MTC E 304	61.2	52+ mín.	Cumple
Ductilidad del residuo a 25°C, cm	MTC E 306	54.7	50 mín.	Cumple

Nota. Certificado de Calidad de Repsol (p.142) de Chávez (2019)

b. Asfalto Modificado con Polímero (AMP)

Los ensayos efectuados al AMP con 1.4% RET (contenido óptimo de polímero dado por TDM) verifican los requisitos de la sección 431 del EG 2013, en la Tabla 22.

Tabla 22

Verificación de Requisitos CAP Modificado con 1.4% Elvaloy. Caso 2

Ensayo, Unidad	Norma	Resultado	Requisitos	Verificación
Penetración a 25°C, dmm.	MTC E 304	54	50-75	Cumple
Punto de inflamación, °C	MTC E 312	297	232 mín.	Cumple
Ductilidad a 25°C, cm	MTC E 306		100 mín.	
Punto de ablandamiento, °C	MTC E 302	70.2	60 mín.	Cumple
Recuperación elástica a 25°C	ASTM D 6084	76%	60 mín.	Cumple
Viscosidad Abs. a 60°C, ps.	MTC E 308	18871	5000 mín.	Cumple
Viscosidad Cin. 135°C, cSt.	MTC E 310	1483.5	3000 máx.	Cumple
Solubilidad en tricloroetileno	MTC E 302	99.75	99% mín.	Cumple
Pruebas sobre la Película delgada				
Recuperación elástica 25°C	ASTM D 6084	68%	60% mín.	Cumple
Penetración a 4°C, dmm	MTC E 304	24	13 mín.	Cumple
Separación, diferencia entre				
Punto de ablandamiento	MTC E 307	2.5	10 máx.	Cumple
Porción Superior e inferior, °C				

Nota. Chávez (2019)

Caso 3. López y Puma (2017)

a. CAP PEN 60/70 Convencional

Los ensayos realizados al AC-20 (similar al CAP 60/70), están indicados en la Tabla 23.

Los requisitos corresponden a la Norma NTE INEN 2515.

Tabla 23

Verificación de Requisitos del Asfalto Convencional AC-20. Caso 3

Ensayo, Unidad	Norma	Resultado	Requisito	Verificación
Penetración a 25°C, 0.1 mm	ASTM D 5	65	60 mín.	Cumple
Punto de inflamación, °C	ASTM D 92	288	232 mín.	Cumple
Punto de ablandamiento, °C	ASTM D 36	49	48 mín.	Cumple
Ductilidad a 25°C, cm	ASTM D 113	117	100 mín.	Cumple
Viscosidad Absoluta 60°C, Pa.s	ASTM D 2171	206.8	160-240	Cumple
Viscosidad Cinemática 135°C, cSt.	ASTM D 2196	410.1	300 mín.	Cumple
Pruebas sobre la Película delgada				
Pérdida de masa, %	ASTM D 1754	-0.008	0.8% máx.	Cumple

Nota. López y Puma (2017)

b. Asfalto Modificado con Polímero (AMP)

Se presentan los ensayos al AMP con 1%, 1.3%, 1.5% y 2% de RET. Los requisitos se refieren a la norma ASTM D5976 para AMP con polímero tipo I-D.

Los ensayos al AMP con 1% de RET se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24

Verificación de Requisitos del AMP con 1% RET (Elvaloy 4170). Caso 3

Ensayo, Unidad	Norma	Resultado	Requisito	Verificación
Penetración a 25°C, dmm.	ASTM D 5	67	40-75	Cumple
Punto de inflamación, °C	ASTM D 92	282	232 mín.	Cumple
Ductilidad a 25°C, cm	ASTM D 113	28		Cumple
Punto de ablandamiento, °C	ASTM D 36	57		
Recuperación elástica torsional	4-05-024/02 SCT	40%		Cumple
Viscosidad C. 135°C, cSt.	ASTM D 2196	1059	5000 máx.	Cumple
Separación Diferencia, °C	4-05-022 SCT	1	2.2 máx.	Cumple

Pruebas sobre la Película delgada

Pérdida de masa, %	ASTM D 2872	-0.007	1 máx.	Cumple
Recuperación elástica a 25°C	ASTM D 6084	42%	60 mín.	No C.
Penetración a 4°C, dmm	ASTM D 5	57	50 mín.	Cumple
Separación, diferencia entre				
Punto de ablandamiento	ASTM D 36	10	10 máx.	Cumple
Porción superior e inferior, °C				

Nota. López y Puma (2019)

Los ensayos al AMP con 1.3% de RET se muestran en la Tabla 25.

Tabla 25

Verificación de Requisitos AMP con 1.3% RET (Elvaloy 4170). Caso 3

Ensayo, Unidad	Norma	Resultado	Requisito	Verificación
Penetración a 25°C, dmm.	ASTM D 5	65	40-75	Cumple
Punto de inflamación, °C	ASTM D 92	280	232 mín.	Cumple
Ductilidad a 25°C, cm	ASTM D 113	25		Cumple
Punto de ablandamiento, °C	ASTM D 36	62		
Recuperación elástica torsional 25°C	4-05-024/02 SCT		42%	
Viscosidad C. 135°C, cSt.	ASTM D 2196	2690	5000 máx.	Cumple
Separación Diferencia, °C	4-05-022 SCT	2	2.2 máx.	Cumple

Pruebas sobre la Película delgada

Pérdida de masa, %	ASTM D 2872	-0.036	1 máx.	Cumple
Recuperación elástica 25°C	ASTM D 6084	68%	60% mín.	Cumple
Penetración a 4°C, dmm	ASTM D 5	62	50 mín.	Cumple
Separación, diferencia entre				
Punto de ablandamiento	ASTM D 36	14	10 máx.	No C.
Porción superior e inferior, °C				

Nota. López y Puma (2019)

Los ensayos al AMP con 1.5% de RET se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26*Verificación de Requisitos AMP con 1.5% RET (Elvaloy 4170). Caso 3*

Ensayo, Unidad	Norma	Resultado/Requisito	Verificación
Penetración a 25°C, dmm.	ASTM D 5	65 40-75	Cumple
Punto de inflamación, °C	ASTM D 92	280 232 mín.	Cumple
Ductilidad a 25°C, cm	ASTM D 113	25	Cumple
Punto de ablandamiento, °C	ASTM D 36	62	
Recuperación elástica torsional 25°C	4-05-024/02SCT	42%	
Viscosidad Cinemática 135°C, cSt.	ASTM D2196	2690 5000 máx.	Cumple
Separación Diferencia R&B, °C	4-05-022SCT	2 2.2 máx.	Cumple
Pruebas sobre la Película delgada			
Pérdida de masa, %	ASTM D2872	-0.036 1 máx.	Cumple
Recuperación elástica a 25°C, %	ASTM D6084	68% 60 mín.	Cumple
Penetración a 4°C, 60s, dmm	ASTM D5	62 50 mín.	Cumple
Separación, diferencia entre			
Punto de ablandamiento porción Superior e inferior, °C	ASTM D36	14 10 máx.	No C.

Nota. López y Puma (2019)

Los ensayos al AMP con 2% de RET se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27*Verificación de Requisitos AMP con 2% RET (Elvaloy 4170). Caso 3*

Ensayo, Unidad	Norma	Resultado/Requisito	Verificación
Penetración a 25°C, dmm.	ASTM D 5	65 40-75	Cumple
Punto de inflamación, °C	ASTM D 92	280 232 mín.	Cumple
Ductilidad a 25°C, cm	ASTM D 113	25	Cumple
Punto de ablandamiento, °C	ASTM D 36	62	
Recuperación elástica torsional 25°C	405024/02SCT	42%	
Viscosidad Cinemática 135°C, cSt.	ASTM D2196	2690 5000 máx.	Cumple
Separación Diferencia R&B, °C	4-05-022 SCT	2 2.2 máx.	Cumple
Pruebas sobre la Película delgada			
Pérdida de masa, %	ASTM D2872-0.036	1 máx.	Cumple

Recuperación elástica a 25°C, %	ASTM D6084	68%	60 mín.	Cumple
Penetración a 4°C, 60s, dmm	ASTM D 5	62	50 mín.	Cumple
Separación, diferencia entre				
Punto de ablandamiento porción Superior e inferior, °C	ASTM D 36	14	10 máx.	No C.

Nota. López y Puma (2019)

5.2.3 *Ensayos Marshall a las MAC convencional y modificada*

Caso 1. Broncano y Campos (2021). Influencia del AMP con Elvaloy sobre las propiedades de la MAC. Arequipa.

a. Ensayo Marshall de la Mezcla Convencional- Caso 1

Para encontrar el contenido óptimo de asfalto 60/70 se prepararon briquetas para 6 contenidos de asfalto. Consideraron 3 briquetas de cada contenido de ligante desde 3.5%, 4%, 4.5%, 5%, 5.5% y 6% que se ensayaron en el aparato Marshall. Se consideraron 75 golpes por cara de acuerdo a la norma MTC para tráfico pesado. Se hizo un primer grupo de 3 briquetas a un mismo porcentaje. Primero se limpiaron los moldes y base para las briquetas, y luego se calentaron a 100°-150°C. Se prepararon las fracciones de agregados, calculadas según la gradación de la MAC y se pusieron en bandejas para ser calentados a 175°-190°C. Se calentó el CAP convencional a 140°C±5°C, revolviendo para homogenizar el calor. Se pesaron todas las fracciones de áridos y se mezclaron para luego hacer un hueco al centro. Allí se incorporó el CAP caliente hasta llegar al peso calculado previamente de la mezcla. Se mezcló todo hasta lograr una mezcla homogénea, sin que exceda de 107°C. Luego se prepararon las briquetas en moldes de 4" (10.2 cm) de diámetro y 2.5" (6.4 cm) de alto, abierto en ambos lados para compactarse por ambos extremos. En el molde caliente, se colocó la mezcla hasta llenarlo bien poniendo papel filtro en la base antes de compactarla. Se compacta cada briketa con el martillo Marshall 75 golpes por lado. El martillo tiene un peso de 4.54 Kg (10 libras) y una altura de caída de 18". Se dejó enfriar el conjunto molde/briketa hasta el día siguiente. Se extraen las briquetas y se colocaron en baño María a 60°C considerando que es la temperatura máxima a la que pudieran estar expuestas las carpetas. Se secaron y se ensayaron las briquetas en la prensa Marshall hasta la rotura, donde se midió la estabilidad y la fluencia.

Los resultados para todos los contenidos de CAP se incluyen en la Figura 35.

Figura 35

Ensayo Marshall de la Mezcla Convencional con asfalto 60/70. Caso 1

ENSAYO MARSHALL: MEZCLA ASFÁLTICA PEN 60-70								
Nº	ITEM	un/M	1	2	3	4	5	6
1	% Contenido De Cemento Asfáltico En Peso	%	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
2	% Contenido De Agregado Grueso En Peso	%	46.80	46.56	46.32	46.08	45.83	45.59
3	% Contenido De Agregado Fino En Peso	%	49.70	49.44	49.18	48.93	48.67	48.41
4	Peso Especifico Del Cemento Asfáltico	gr/cm ³	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
5	Peso Especifico Bulk De Ag. Grueso (Gsb AG)	gr/cm ³	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725
6	Peso Especifico Bulk De Ag. Fino (Gsb AF)	gr/cm ³	2.594	2.594	2.594	2.594	2.594	2.594
7	Peso Especifico Bulk De Mezcla De Agregados (Gsb)	gr/cm ³	2.656	2.656	2.656	2.656	2.656	2.656
8	Peso Especifico Máximo Teórico De La Mezcla (Gmm)	gr/cm ³	2.581	2.559	2.542	2.518	2.502	2.481
9	Volumen De Aire (A%)	%	8.06	6.66	5.29	3.75	3.13	2.68
10	Grado De Compactación (R)	%	91.94	93.35	94.71	96.25	96.87	97.32
11	Volumen De Aire En El Agregado Mineral (V.A.M)	%	16.16	16.09	15.87	15.72	16.15	16.94
12	Porcentaje De Vacios Llenos De Asfalto (V.F.A)	%	50.13	58.67	66.69	76.19	80.62	84.22
13	Peso Especifico Del Espécimen (P.U.)	gr/cm ³	2.373	2.389	2.407	2.425	2.424	2.415
14	Estabilidad Corregida (Carga)	kg	1356.39	1744.60	1718.16	1609.48	1397.70	978.72
15	Flujo	mm	3.33	3.50	3.63	3.85	4.63	5.98

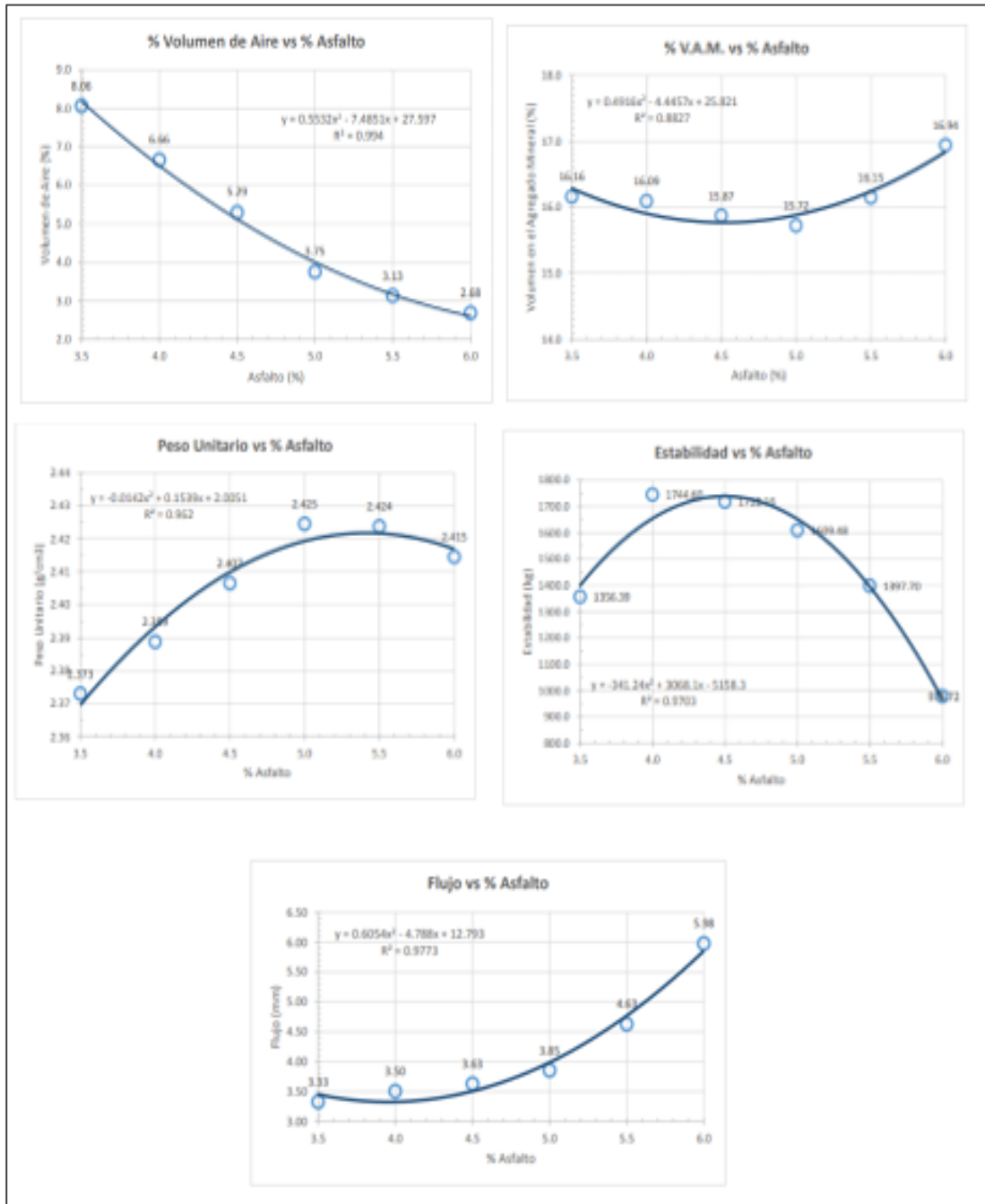
Nota. Broncano y Campos (2021)

Con estos datos se construyeron las gráficas para determinar el contenido óptimo de asfalto 60/70.

Las gráficas se presentan en la Figura 36.

Figura 36

Gráficos del Ensayo Marshall de la MAC Convencional. Caso 1



Nota. Tomada de *Influencia del AMP con Elvaloy sobre las propiedades de la MAC* (pp.120-122) por Broncano y Campos, 2021.

Utilizando las gráficas se obtuvieron los valores de diseño para un contenido óptimo de 5.03% de asfalto 60/70, que presentamos en la Figura 37.

Figura 37*Resultados del Ensayo Marshall de la MAC Convencional. Caso 1*

CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA CON C.A. 5.03%	
Volumen de Aire (a%)	3.94
Volumen en el A. Mineral (VAM%)	15.90
Peso Unitario (g/cm ³)	2.420
Estabilidad (Kg)	1639.65
Flujo (mm)	4.10
Estabilidad/Flujo (Kg/cm)	3999.00
Temperatura de la Mezcla (°C)	140 °C

Nota. Broncano y Campos (2021)

La verificación del diseño se presenta en la Figura 38.

Figura 38*Resultados del Ensayo de Verificación Mezcla Convencional. Caso 1*

ENSAYO MARSHALL DE VERIFICACIÓN: MEZCLA ASFÁLTICA PEN 60-70						
Nº	ITEM	n/M	1	2	PROMEDIO	REQUERIMIENTOS DE NORMA
1	% CONTENIDO DE CEMENTO ASFÁLTICO EN PESO	%	5.03	5.03	5.03	
2	% CONTENIDO DE AGREGADO GRUESO EN PESO	%	46.06	46.06	46.06	
3	% CONTENIDO DE AGREGADO FINO EN PESO	%	48.91	48.91	48.91	
4	PESO ESPECÍFICO DEL CEMENTO ASFÁLTICO	gr./cm ³	1.02	1.02	1.02	
5	PESO ESPECÍFICO BULK DE AG. GRUESO (Gsb AG)	gr/cm ³	2.725	2.725	2.725	
6	PESO ESPECÍFICO BULK DE AG. FINO (Gsb AF)	gr/cm ³	2.594	2.594	2.594	
7	PESO ESPECÍFICO BULK DE MEZCLA DE AGREGADOS (Gsb)	gr/cm ³	2.656	2.656	2.656	
8	PESO ESPECÍFICO MÁXIMO TEÓRICO DE LA MEZCLA (Gmm)	gr/cm ³	2.513	2.513	2.513	
9	VOLUMEN DE AIRE (a%)	%	3.90	3.86	3.88	3-5 CUMPLE
10	GRADO DE COMPACTACION (R)	%	96.10	96.14	96.12	95%-98%
11	VOLUMEN DE AIRE EN EL AGREGADO MINERAL (VAM)	%	16.05	16.02	16.04	Min 14 CUMPLE
12	PORCENTAJE DE VACIOS LLENOS DE ASFALTO (VFA)	%	75.70	75.91	75.80	
13	PESO ESPECÍFICO DEL ESPECIMEN (P.U.)	gr/cm ³	2.42	2.42	2.42	
14	ESTABILIDAD CORREGIDA (CARGA)	kg	1652.20	1645.30	1648.25	Min 831 CUMPLE
15	FLUJO	mm	4.10	4.20	4.15	2-5 CUMPLE

Nota. Broncano y Campos (2021)

A continuación, se presenta el ensayo para la mezcla modificada.

b. Ensayo Marshall de la Mezcla Modificada – Caso 1

De la misma forma que para la mezcla convencional se realizó el ensayo Marshall para encontrar el contenido óptimo de asfalto modificado con Elvaloy RET para lo cual se prepararon briquetas, 3 de cada contenido de ligante desde 3.0% hasta 6%, variando cada 0.5%. Se consideraron 75 golpes de la misma forma por tratarse de tráfico pesado. Los resultados de las briquetas se muestran en la Figura 39.

Figura 39

Ensayo Marshall de la Mezcla Modificada con Elvaloy. Caso 1

ENSAYO MARSHALL: MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON ELVALOY									
Nº	ÍTEM	un/M	1	2	3	4	5	6	7
1	% Contenido De Cemento Asfáltico En Peso	%	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
2	% Contenido De Agregado Grueso En Peso	%	47.05	46.80	46.56	46.32	46.08	45.83	45.59
3	% Contenido De Agregado Fino En Peso	%	49.96	49.70	49.44	49.18	48.93	48.67	48.41
4	Peso Especifico Del Cemento Asfáltico	gr/cm ³	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
5	Peso Especifico Bulk De Ag. Grueso (Gsb AG)	gr/cm ³	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725
6	Peso Especifico Bulk De Ag. Fino (Gsb AF)	gr/cm ³	2.594	2.594	2.594	2.594	2.594	2.594	2.594
7	Peso Especifico Bulk De Mezcla De Agregados (Gsb Mez)	gr/cm ³	2.656	2.656	2.656	2.656	2.656	2.656	2.656
8	Peso Especifico Máximo Teórico De La Mezcla (Gmm)	gr/cm ³	2.601	2.581	2.559	2.541	2.519	2.502	2.481
9	Volumen De Aire (a%)	%	7.52	6.21	5.04	3.97	3.36	3.30	3.25
10	Grado De Compactación (R)	%	92.49	93.79	94.96	96.03	96.64	96.70	96.75
11	Volumen De Aire En El Agregado Mineral (V.A.M)	%	14.60	14.47	14.64	14.70	15.38	16.30	17.43
12	Porcentaje De Vacios Llenos De Asfalto (V.F.A)	%	48.52	57.10	65.55	72.98	78.15	79.75	81.34
13	Peso Especifico Del Espécimen (P.U.)	gr/cm ³	2.406	2.421	2.430	2.440	2.434	2.420	2.400
14	Estabilidad Corregida (Carga)	kg	1612.04	1667.35	1764.46	1838.19	1818.15	1730.18	1591.89
15	Flujo	mm	3.75	3.68	3.65	3.93	4.70	5.63	6.25

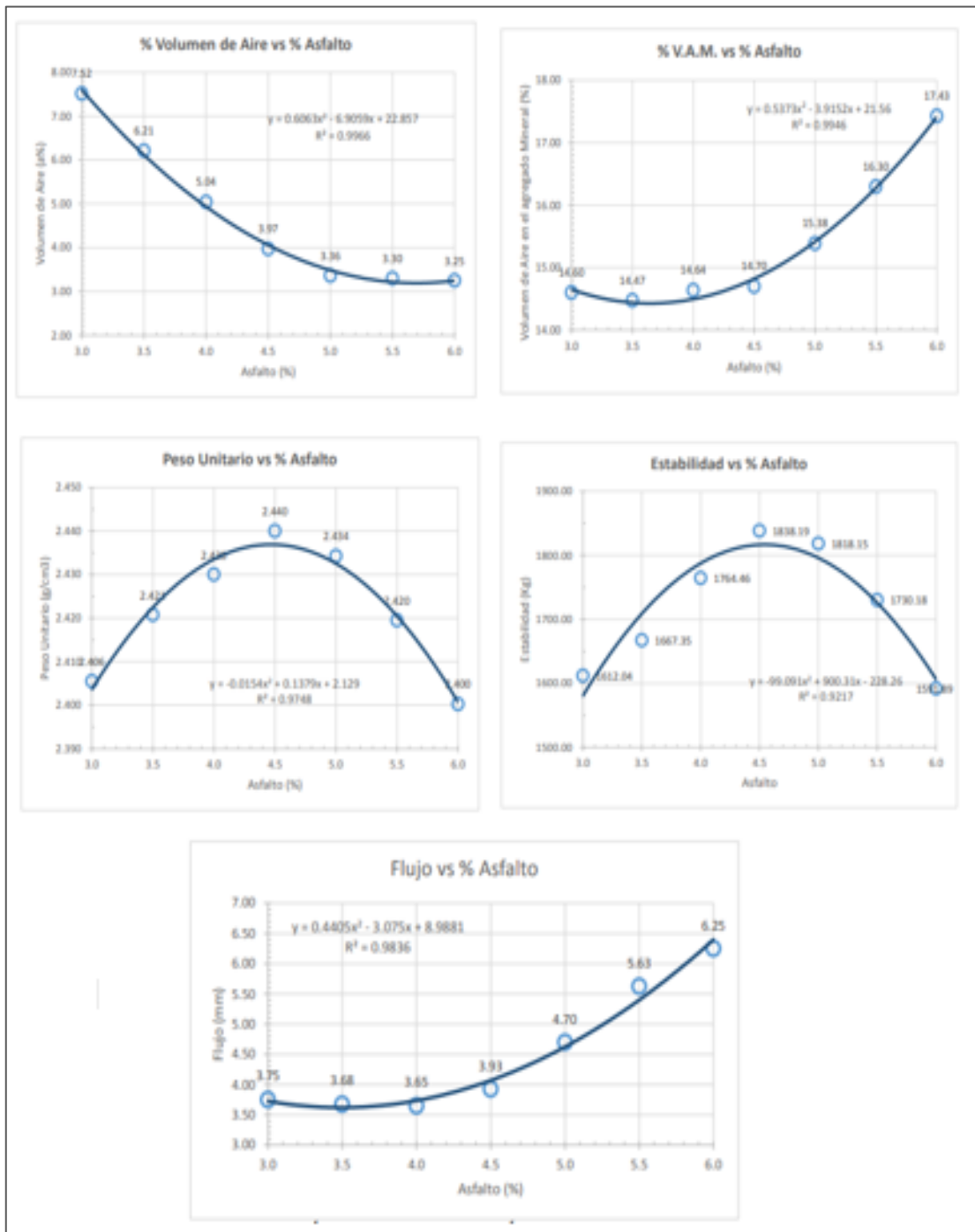
Nota. Broncano y Campos (2021)

Con estos datos se construyeron las gráficas para determinar el contenido óptimo de asfalto modificado. Cabe mencionar que Broncano y Campos (Caso 1) experimentaron con un solo contenido de Elvaloy no especificado en su estudio.

Las gráficas se presentan en la Figura 40.

Figura 40

Gráficos del Ensayo Marshall de la Mezcla Modificada. Caso 1



Nota. Broncano y Campos (2021)

Utilizando las gráficas se obtuvieron los valores de diseño para un contenido óptimo de 4.4% de asfalto, que presentamos en la Figura 41.

Figura 41

Resultados del Ensayo Marshall de la Mezcla Modificada. Caso 1

CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON ELVALOY - C.A. 4.40%	
Volumen de Aire (a%)	4.20
Volumen en el A. Mineral (VAM%)	14.74
Peso Unitario (g/cm ³)	2.43
Estabilidad (Kg)	1814.70
Flujo (mm)	3.98
Estabilidad/Flujo (Kg/cm)	4041.00
Temperatura de la Mezcla (°C)	160 °C

Nota. Broncano y Campos (2021)

La comparación del diseño de las MAC se presenta en la Figura 42.

Figura 42

Comparación de Resultados Mezcla Convencional vs. Modificada. Caso 1

Nº	ÍTEM	un	PEN 60-70	SBS	ELVALOY	NORMA	
1	Contenido Óptimo De Cemento Asfáltico	%	5.03	4.50	4.40		
2	Contenido de Agregado Grueso	%	46.06	46.32	46.37		
3	Contenido de Agregado Fino	%	48.91	49.18	49.23		
4	Gravedad Específica Máxima Teórica (Gmm)	g/cm ³	2.513	2.540	2.538		
5	Grado de Compactación (R)	%	96.12	95.87	95.73	95%-98%	CUMPLE
6	Volumen de Aire (a%)	%	3.88	4.13	4.28	3-5	CUMPLE
7	Volumen de Aire en el Agregado Mineral (V.A.M)	%	16.04	14.88	14.99	Min 14	CUMPLE
8	Porcentaje de Vacíos llenos de Asfalto (V.F.A)	%	75.80	72.21	71.47		
9	Peso Específico (P.U)	g/cm ³	2.42	2.44	2.43		
10	Estabilidad / Carga	Kg	1648.25	1870.00	1788.25	Min 831	CUMPLE
11	Flujo	mm	4.15	4.07	3.78	2-5	CUMPLE

Nota. Broncano y Campos (2021)

Caso 2. Chávez (2019): Mejoramiento del comportamiento mecánico de una MAC con polímero Elvaloy 4170 RET. Lima.

a. Ensayo Marshall de la Mezcla Convencional- Caso 2

En este caso se trabajó con CAP PEN 60/70 y contenidos de 4%, 4.5%, 5%, 5.5% y 6%, considerando 75 golpes por lado de las probetas. Ver Figura 43.

Figura 43

Ensayo Marshall Mezcla Convencional con 4.0% de asfalto. Caso 2

Ensayo marshall (ASTM D 1559 – MTC E 504)					
Nº	Denominación	1	2	3	Promedio
1	CEMENTO ASFÁLTICO EN PESO DE LA MEZCLA TOTAL (%)	4.0			
2	AGREGADO GRUESO (> N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	38.40			
3	AGREGADO FINO (< N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	57.60			
4	FILLER (MÍNIMO 65% PASA N° 200) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	0.00			
5	PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO - APARENTE	1.010			
6	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO-BULK (< 1")	2.734			
7	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO FINO - BULK	2.725			
8	PESO ESPECÍFICO DEL FILLER - APARENTE	-			
9	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.24	6.28	6.28	
10	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (1) (g)	1,198.2	1,196.2	1,196.2	
11	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AIRE (g)	1,201.2	1,198.2	1,198.2	
12	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AGUA (g)	695.0	689.2	689.2	
13	PESO DEL AGUA ABSORBIDA (g)	3.0	2.0	2.0	
14	VOLUMEN DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (cm ³)	506.2	509.0	509.0	
15	PORCENTAJE DE ABSORCION (%)	0.59	0.39	0.39	
16	PESO ESPECÍFICO BULK DE LA BRIQUETA (g/cm ³)	2.367	2.350	2.350	2.356
17	PESO ESPECÍFICO TEÓRICO MÁXIMO (RICE)-ASTM2041	2.582			
18	PORCENTAJE DE VACÍOS (%)	8.3	9.0	9.0	8.8
19	PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO TOTAL (g/cm ³)	2.729			
20	VACÍOS DE AGREGADO MINERAL (V.M.A.) (%)	16.7	17.3	17.3	17.1
21	VACÍOS LLENADOS CON CEMENTO ASFÁLTICO (%)	50.2	48.1	48.1	48.8
22	PESO ESPECÍFICO EFECTIVO DEL AGREGADO TOTAL	2.761			
23	ASFALTO ABSORVIDO POR EL AGREGADO TOTAL (%)	0.43			
24	PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO (%)	3.57			
25	FLUJO (mm)	2.8	2.8	3.0	2.9
26	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (kg)	1,168.0	1,168.0	1,168.0	
27	FACTOR DE ESTABILIDAD	1.04	1.00	1.00	
28	ESTABILIDAD CORREGIDA (kg)	1,215.0	1,168.0	1,168.0	1,184
29	RELACIÓN ESTAB./FLUJO (kg/mm)	4348.6	4180.4	3832.0	4120

Nota. Chávez (2019)

Los ensayos Marshall realizados por Chávez (Caso 2) para los contenidos de 4.5%, 5%, 5.5% y 6% de asfalto convencional 60/70 son similares al que se muestra en la figura 43 para 4% de asfalto.

Los datos trabajados en cada uno de los ensayos (Caso 2) para cada contenido de asfalto se incluyen en el Anexo 3 y son los siguientes:

- Ensayo Marshall Mezcla Convencional para 4.0% asfalto. Caso 2.
- Ensayo Marshall Mezcla Convencional para 4.5% asfalto. Caso 2.
- Ensayo Marshall Mezcla Convencional para 5.0% asfalto. Caso 2.
- Ensayo Marshall Mezcla Convencional para 5.5% asfalto. Caso 2.
- Ensayo Marshall Mezcla Convencional para 6.0% asfalto. Caso 2.

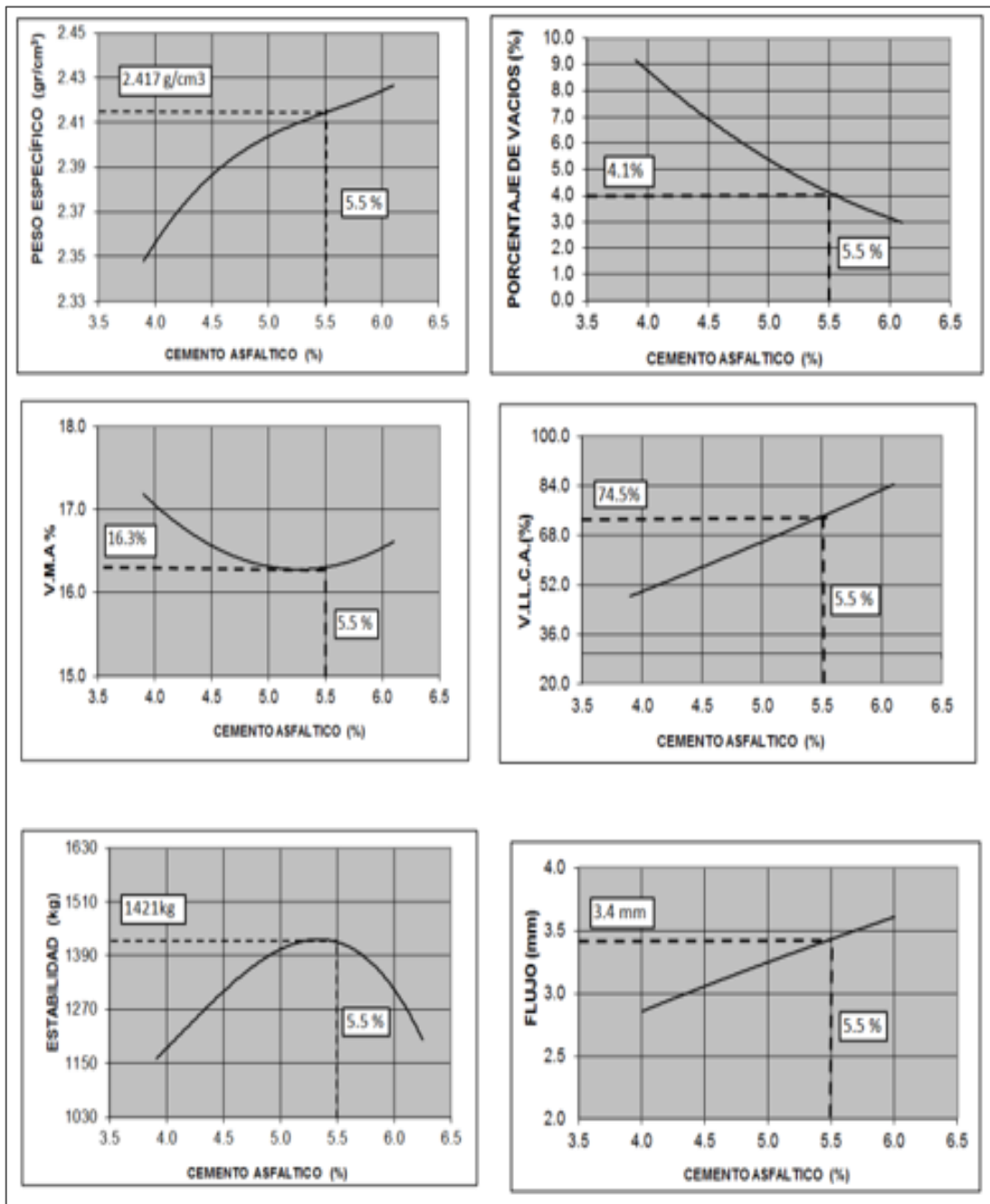
Con estos valores se construyeron las gráficas para el diseño de la mezcla convencional. El diseño Marshall para la mezcla convencional en el Caso 2 (Chávez, 2019) tiene los siguientes parámetros:

Contenido de asfalto 60/70 de 5.5%,
Vacíos 4.1%,
Vacíos en el agregado mineral 16.3%,
Estabilidad 1421 Kg y
Flujo 3.4 mms.

Las gráficas del diseño Marshall se muestran en la Figura 44.

Figura 44

Gráficos del Ensayo Marshall de la Mezcla Convencional con asfalto 60/70. Caso 2.



Nota. Chávez (2019)

b. Ensayo Marshall de la Mezcla Modificada – Caso 2

De la misma forma se realizó el ensayo Marshall para encontrar el contenido óptimo de asfalto para tres diseños de mezcla modificada con contenidos de 1.1%, 1.4% y 1.7% de Elvaloy RET.

b1. Ensayo Marshall de la Mezcla Modificada con 1.1% Elvaloy (Caso 2)

Para diseñar la mezcla modificada con 1.1 % de Elvaloy RET se trabajó similarmente con contenidos de asfalto modificado de 4%, 4.5%, 5%, 5.5% y 6%.

Los datos trabajados en cada uno de los ensayos para cada contenido de asfalto se incluyen en el Anexo 3 y son los siguientes:

- Ensayo Marshall Mezcla Modificada (1.1% RET) para 4.0% asfalto. Caso 2.
- Ensayo Marshall Mezcla Modificada (1.1% RET) para 4.5% asfalto. Caso 2.
- Ensayo Marshall Mezcla Modificada (1.1% RET) para 5.0% asfalto. Caso 2.
- Ensayo Marshall Mezcla Modificada (1.1% RET) para 5.5% asfalto. Caso 2.
- Ensayo Marshall Mezcla Modificada (1.1% RET) para 6% asfalto. Caso 2

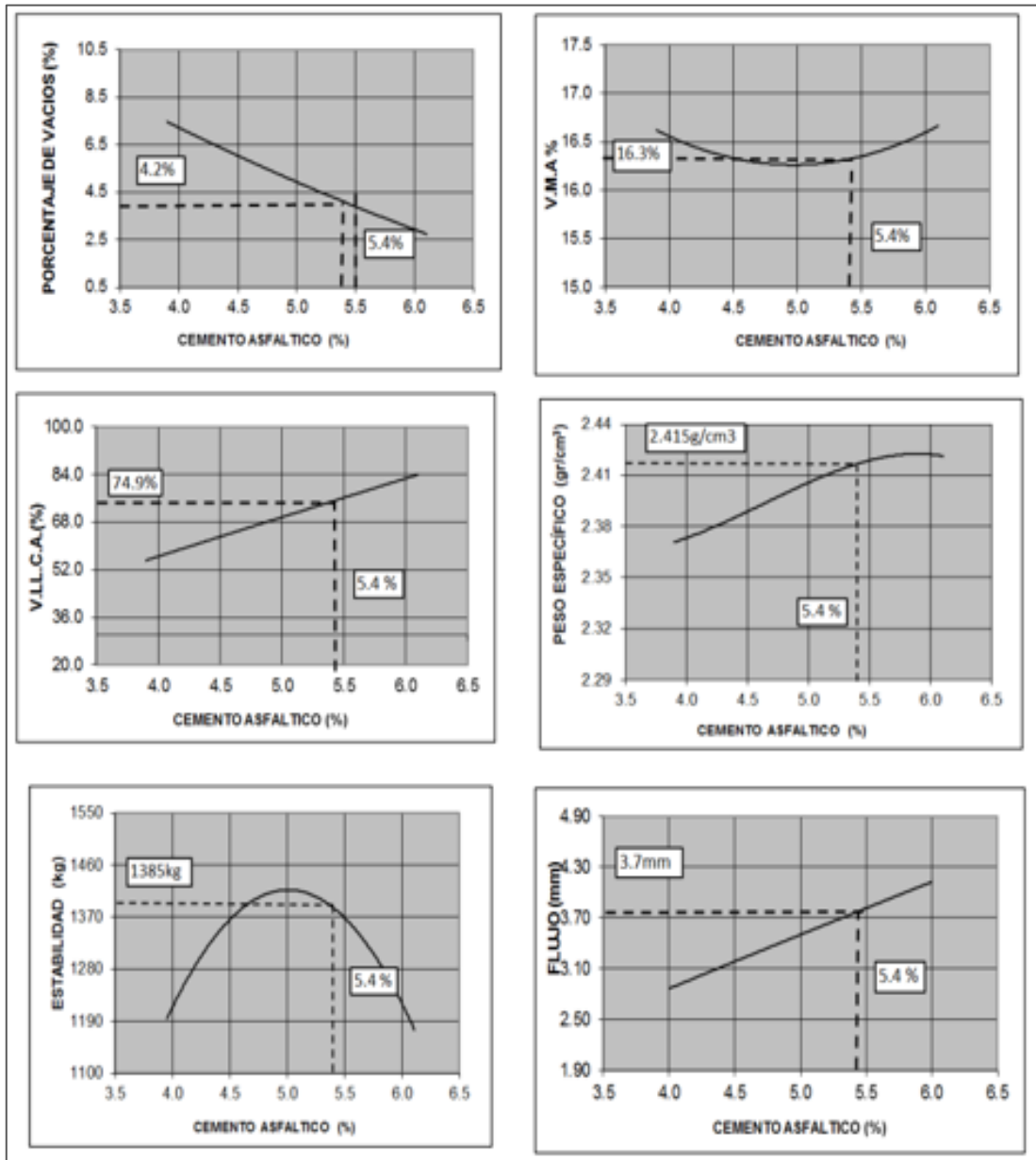
Con estos datos del diseño con 1.1% RET para varios contenidos de asfalto se construyen las gráficas que se requieren para el diseño Marshall.

El diseño de la mezcla modificada con 1.1% de Elvaloy RET tuvo un contenido óptimo de 5.4% de asfalto, contenido de vacíos de 4.2%, VMA 16.3%, VFA 74.9%, estabilidad 1385 Kg y flujo 3.7 milímetros.

Las gráficas se muestran en la Figura 45.

Figura 45

Gráficos del Ensayo Marshall Mezcla Modificada 1.1% RET. Caso 2



Nota. Chávez (2019)

b2. Ensayo Marshall de la Mezcla Modificada con 1.4% Elvaloy (Caso 2)

Para diseñar la mezcla modificada con 1.4 % de Elvaloy RET se trabajó similarmente que la mezcla convencional, con contenidos de asfalto modificado de 4%, 4.5%, 5%, 5.5% y 6%.

Los datos trabajados en cada uno de los ensayos para cada contenido de asfalto se incluyen en el Anexo 3 y son los siguientes:

- Ensayo Marshall Mezcla Modificada (1.4% RET) con 4.5% asfalto. Caso 2.
- Ensayo Marshall Mezcla Modificada (1.4% RET) con 5.0% asfalto. Caso 2.
- Ensayo Marshall Mezcla Modificada (1.4% RET) con 5.5% asfalto. Caso 2.
- Ensayo Marshall Mezcla Modificada (1.4% RET) con 6.0% asfalto. Caso 2.
- Ensayo Marshall Mezcla Modificada (1.4% RET) con 6.5% asfalto. Caso 2

Con estos datos del diseño con 1.4% RET para varios contenidos de asfalto se construyen las gráficas que se requieren para el diseño Marshall.

El diseño de la mezcla modificada con 1.4% de Elvaloy RET tuvo:

Contenido óptimo de asfalto: 5.8%

Vacíos de aire: 4.1%,

Vacíos en el agregado VMA: 16.4%,

Vacíos llenos de asfalto VFA: 74.8%

Peso Unitario: 2.419 g/cm³

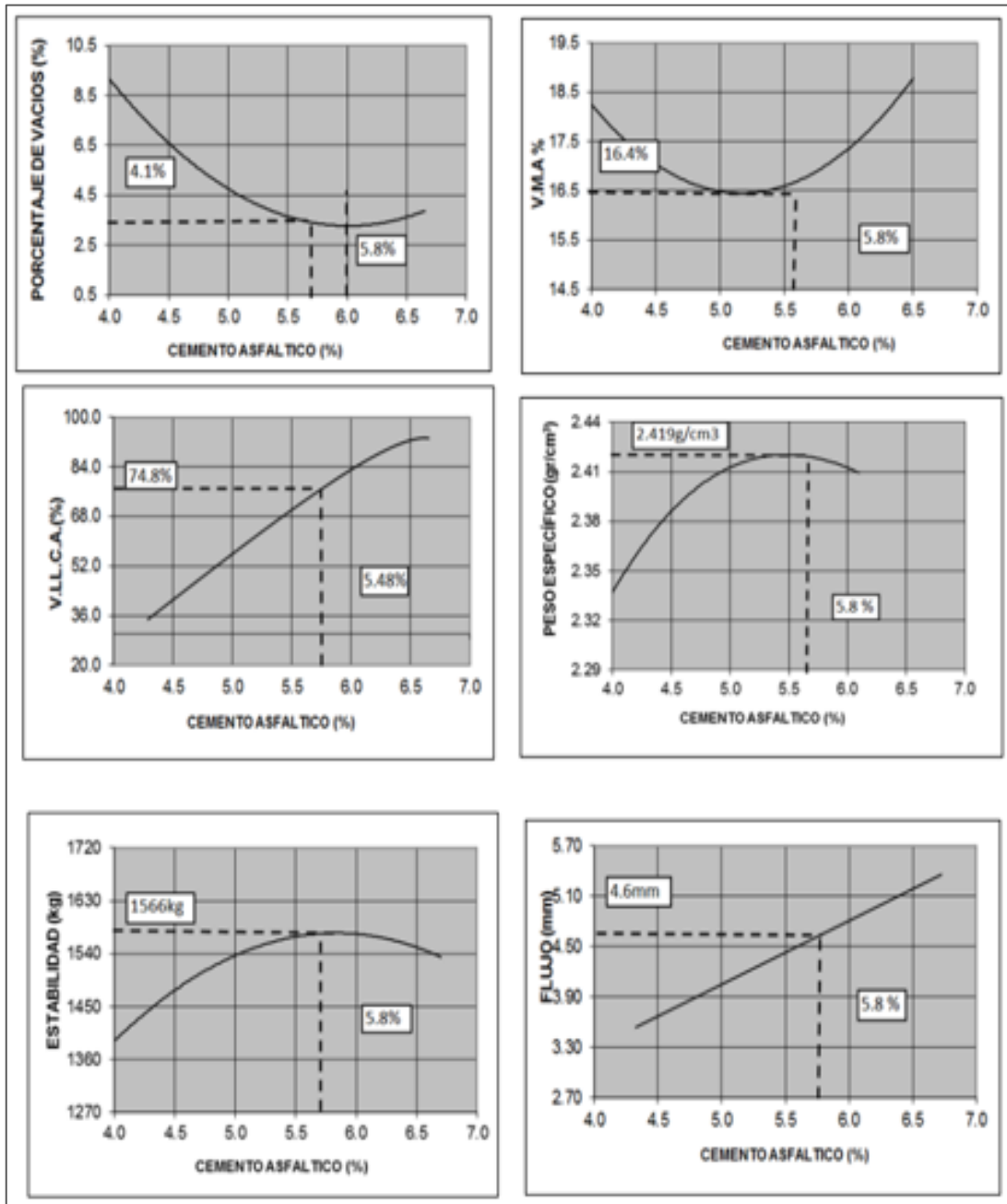
Estabilidad: 1566 Kg

Flujo 4.6 milímetros.

Las gráficas se muestran en la Figura 46.

Figura 46

Gráficos del Ensayo Marshall Mezcla Modificada 1.4% RET. Caso 2



Nota. Chávez (2019)

b3. Ensayo Marshall de la Mezcla Modificada con 1.7% Elvaloy (Caso 2)

Para diseñar la mezcla modificada con 1.7 % de Elvaloy RET se trabajó similarmente que la mezcla convencional, con contenidos de asfalto modificado de 4%, 4.5%, 5%, 5.5% y 6%.

Los datos trabajados en cada uno de los ensayos para cada contenido de asfalto se incluyen en el Anexo 3 y son los siguientes:

- Ensayo Marshall Mezcla Modificada (1.7% RET) con 4.0% asfalto. Caso 2.
- Ensayo Marshall Mezcla Modificada (1.7% RET) con 4.5% asfalto. Caso 2.
- Ensayo Marshall Mezcla Modificada (1.7% RET) con 5.0% asfalto. Caso 2.
- Ensayo Marshall Mezcla Modificada (1.7% RET) con 5.5% asfalto. Caso 2.
- Ensayo Marshall Mezcla Modificada (1.7% RET) con 6.0% asfalto. Caso 2

Con estos datos del diseño con 1.7% RET para varios contenidos de asfalto se construyen las gráficas que se requieren para el diseño Marshall.

El diseño de la mezcla modificada con 1.7% de Elvaloy RET tuvo:

Contenido óptimo de asfalto: 5.3%

Vacíos: 4.1%,

Vacíos VMA: 16.1%,

Vacíos con asfalto VFA: 75.1%

Peso Unitario: 2.418 g/cm³

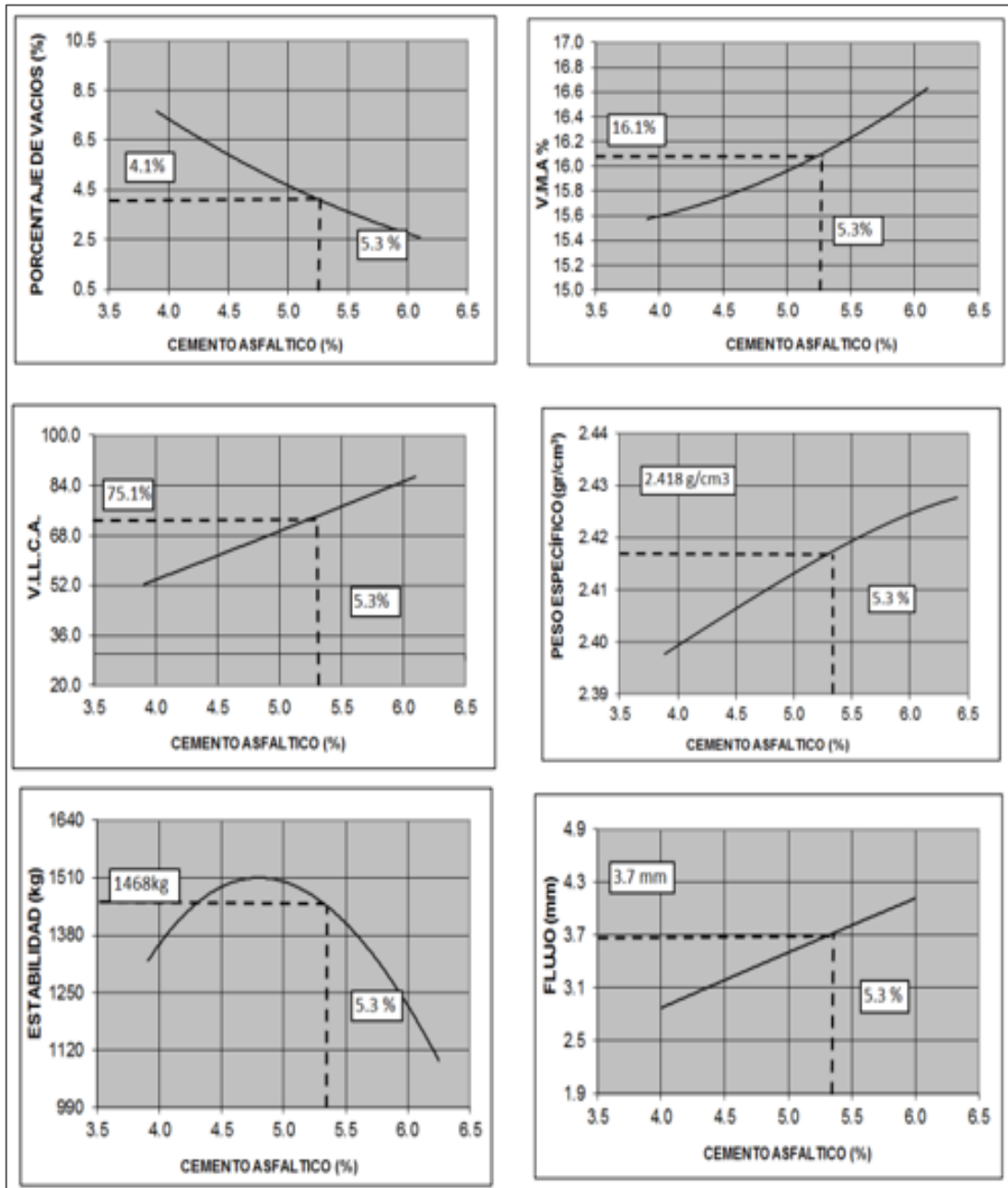
Estabilidad: 1468 Kg

Flujo 3.7 milímetros.

Las gráficas se muestran en la Figura 47.

Figura 47

Gráficos del Ensayo Marshall Mezcla Modificada 1.7% RET. Caso 2



Nota. Chávez (2019)

Caso 3. López y Puma (2017): Caracterización de MAC elaboradas con AMP con polímeros RET. Quito-Ecuador.

a. Ensayo Marshall de la Mezcla Convencional- Caso 3

En este caso se usó cemento asfáltico AC-20 en contenidos de 5.5%, 6%, 6.5% y 7%, considerando 75 golpes por lado y tres briquetas para cada contenido. Las temperaturas de mezclado y compactación fueron 150°C y 140°C.

Ver Figura 48. Se incluye también en el Anexo C.

Figura 48

Ensayo Marshall de la Mezcla Convencional con asfalto AC-20. Caso 3

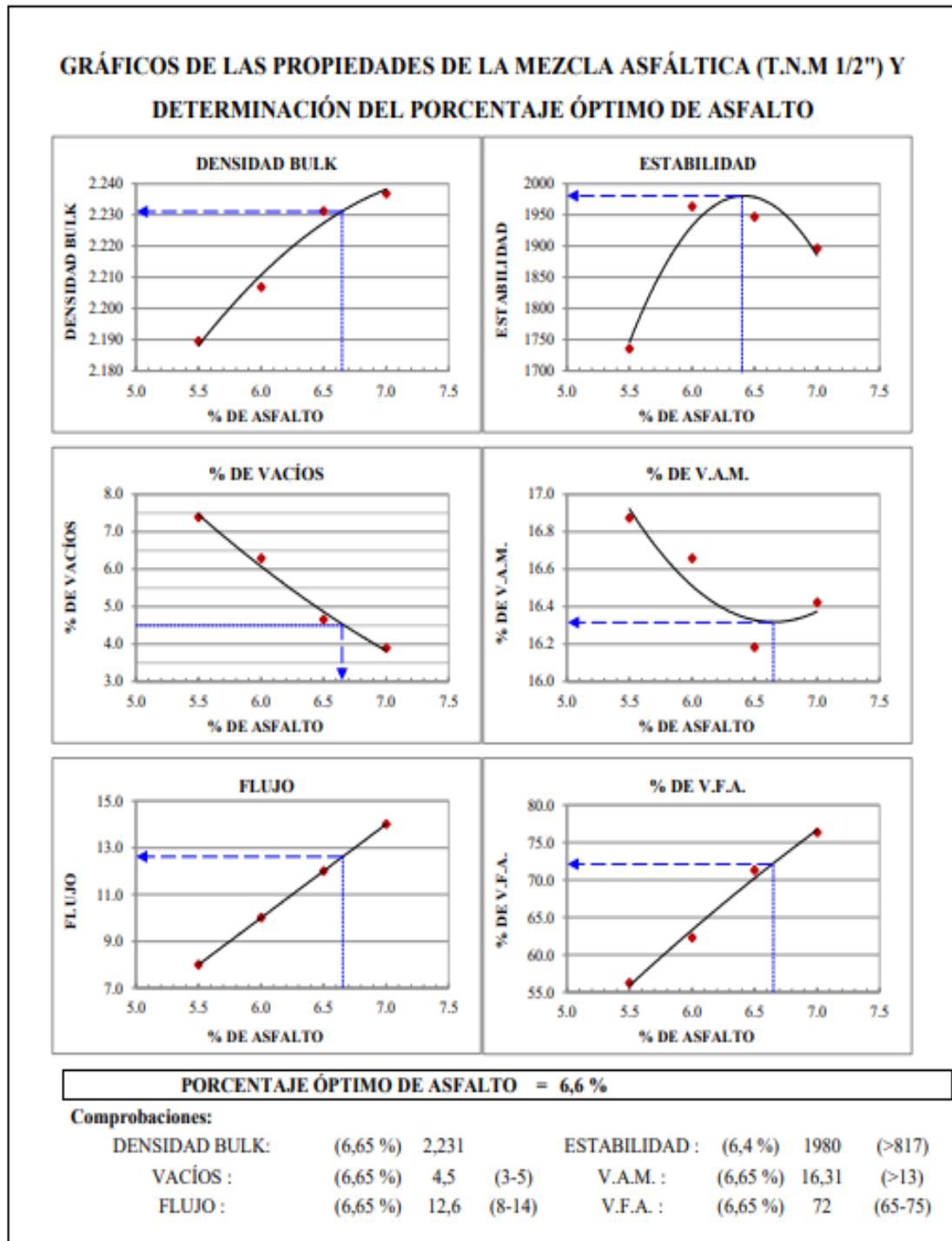
PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE																						
AGREGADO: Tipo A. RÍO PITA (Naranjo-López) 5% Grueso(3/4"), 40% Medio (1/2"), 55% Fino (Arena) Gsb = 2,489										TIPO MEZCLA ASFÁLTICA: Densa gruesa de TMN de 12,5 mm (1/2") PARÁMETRO DE DISEÑO: Compactación : 75 golpes Estabilidad: 1800 lb (816 kg) Flujo: 8-14 (0.25 mm) % de vacíos de aire: 3-5%												
ASFALTO: AC-20 (Clasificado por viscosidad) Ga = 1,012										VMA : > 13 VFA : 65 -75 Fic: 0,8 -1,2												
% asfalto (Pa)	No. Briqueta	PESO (gramo)			Volúmen	GRAVEDAD ESPECÍFICA			% asfalto absorbido (Paa)	VOLUMEN % DEL TOTAL			V.A.M	V.F.A	% asfalto efectivo (Pae)	Relación Filler/Asfalto (Ea)	Peso Uniz. Kg/m ³	ESTABILIDAD (Kg)				FLUJO (1/100")
		Seco aire	S88 aire	En agua		BULK (Gmb)	Max. teorico (Gmt)	Max. medido RICE (Gmm)		Agregado (VA)	Vacío aire (Vv)	Af. Efic. (Vaf)						Vacío Agregado Menor	Vacío Líquido de Asfalto	Letura	Medida	
a		b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v
					c-d	b/c			$\frac{b-i}{1000} \cdot \frac{1}{G_a(100-a)}$	$\frac{100 \cdot g}{G_b}$	$\frac{b-h}{100}$	100-j-k	100-j	$\frac{(m-k) \cdot 100}{m}$	$\frac{a \cdot (100-s)}{100}$	100p						
5,5	1	1099	1103	600	503	2,185												481	1612	1,04	1676	9
	2	1107	1111	603	508	2,179												464	1556	1,04	1618	8
	3	1047	1051	576	475	2,204												500	1676	1,14	1911	8
	Promedio						2,189	2,304	2,364	0,12	83,13	7,39	9,49	16,87	56,22	5,39	1,13	2189				1735
6,0	4	1020	1023	560	463	2,203												486	1629	1,19	1939	10
	5	1114	1117	613	504	2,210												563	1886	1,04	1961	9
	6	1066	1069	586	483	2,207												545	1826	1,09	1990	10
	Promedio						2,207	2,288	2,355	0,13	83,34	6,28	10,37	16,66	62,27	5,88	1,03	2207				1963
6,5	7	1026	1027	568	459	2,235												540	1809	1,19	2153	12
	8	1067	1069	590	479	2,228												468	1569	1,14	1789	11
	9	1044	1045	577	468	2,231												476	1596	1,19	1899	12
	Promedio						2,231	2,273	2,340	0,13	83,82	4,65	11,53	16,18	71,25	6,37	0,95	2231				1947
7,0	10	1047	1049	580	469	2,232												506	1696	1,19	2018	12
	11	1108	1109	614	495	2,238												504	1689	1,09	1841	16
	12	1028	1029	570	459	2,240												458	1536	1,19	1828	14
	Promedio						2,237	2,258	2,327	0,14	83,58	3,89	12,53	16,42	76,30	6,87	0,89	2237				1896
ESPECIFICACIONES:										3 - 5			>13	65 - 75		0,8 - 1,2					> 816	8 - 14

Nota. López y Puma (2017)

El contenido óptimo de asfalto AC-20 para la mezcla convencional resultó 6.6%, considerando 4.5% de vacíos. Los gráficos se muestran en la Figura 49.

Figura 49

Gráficas del Ensayo Marshall Mezcla Convencional con asfalto AC-20. Caso 3



Nota. López y Puma (2017)

b. Ensayo Marshall de la Mezcla Modificada – Caso 3

En este caso se trabajó con cemento asfáltico AC-20 modificado con Elvaloy RET en contenidos de 1.0%, 1.3%, 1.5% y 2.0% de polímero. López y Puma (2017) realizaron los ensayos Marshall para estas mezclas modificadas en Ecuador, pero consignaron sólo datos de estabilidad y fluencia. No incluyeron las gráficas ni los parámetros volumétricos. Los datos de estabilidad y fluencia Marshall de las mezclas convencional (M) y modificadas, denominadas MR1, MR 1.3, MR 1.5 y MR 2 (según su contenido de RET), se muestran en la Figura 50.

Figura 50

Ensayo Marshall de las Mezclas Convencional y Modificadas con Elvaloy RET. Caso 3

ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL						
TIPO DE MEZCLA	No. BRIQUETA	ESTABILIDAD (Kg)				FLUJO (1/100")
		Lectura	Medida	Factor de corrección	Corregida	
M	1a	391	1312	1,19	1561	13
	2a	475	1592	1,09	1735	12
	3a	540	1809	1,04	1881	10
	Promedio				1726	12,0
MR1	13a	518	1736	1,14	1979	14
	14a	517	1732	1,19	2061	14
	15a	613	2052	1,00	2052	13
	Promedio				2031	14,0
MR1.3	16a	672	2249	0,93	2092	16
	17a	452	1516	1,19	1804	15
	18a	674	2256	1,00	2256	11
	Promedio				2051	14,0
MR1.5	19a	683	2286	0,96	2195	16
	20a	665	2226	0,96	2137	15
	21a	645	2159	0,96	2073	13
	Promedio				2135	15,0
MR2	22a	678	2269	0,96	2178	14
	23a	640	2142	1,04	2228	16
	24a	595	1992	0,96	1912	16
	Promedio				2106	15,0

Nota. López y Puma (2017)

5.2.4 Ensayos de Desempeño a las MAC convencional y modificada

Como ensayo de desempeño se ha considerado evaluar la deformación permanente de las mezclas mediante el ensayo de la Rueda de Hamburgo.

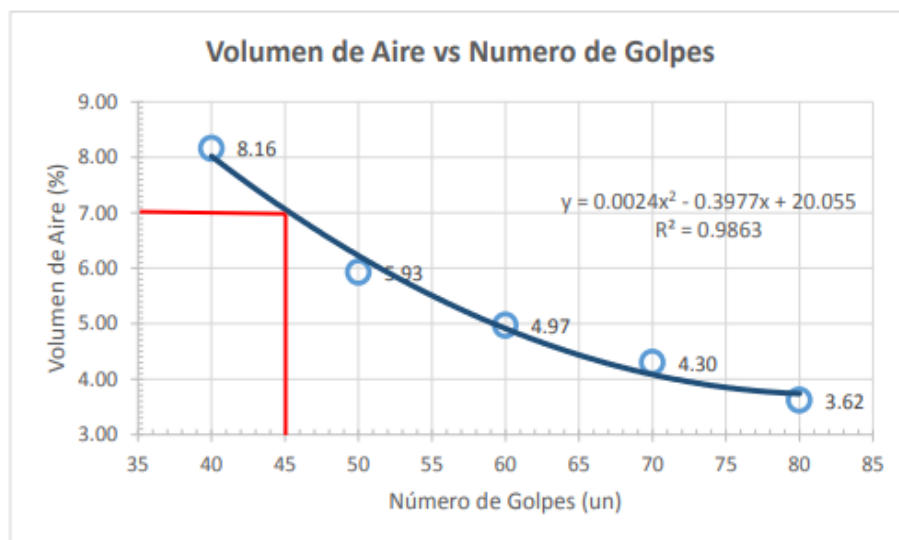
Caso 1. Broncano y Campos (2021)

a. Ensayo de la Rueda de Hamburgo a la mezcla convencional

En este caso, para el ensayo de la Rueda de Hamburgo se prepararon muestras de 15 cm (6") de diámetro y con un contenido de vacíos de aire de 7.0%, tal como lo indica la norma AASHTO T 324. Para esto se fabricaron briquetas con diferente número de golpes y se graficaron para obtener la cantidad de golpes necesarios para lograr un 7% de vacíos de aire. Se presenta la gráfica en la Figura 51.

Figura 51

Vacíos de aire versus número de golpes



Nota. Broncano y Campos (2021)

Se requieren 45 golpes para conseguir 7% de vacíos, con lo que se fabrican dos briquetas. Los datos de las briquetas y los resultados del ensayo se muestran en las Figuras 52 y 53, respectivamente.

Figura 52*Características de mezcla convencional Ensayo Rueda Cargada. Caso 1*

ENSAYO DE RUEDA DE HAMBURGO MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL PEN 60-70				
Nº	ITEM	un/M	1	2
1	PESO ESPECIMEN SECO	gr	2697.5	2698.0
2	PESO ESPECIMEN SUMERGIDO EN AGUA	gr	1543.5	1542.5
3	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	gr	1154	1155.50
4	PESO ESPECIFICO UNITARIO (P.U)	gr/cm3	2.338	2.335
5	PESO ESPECIFICO BULK DE MEZCLA DE AGREGADOS (Gsb)	gr/cm3	2.656	2.656
6	PESO ESPECIFICO MAXIMO TEORICO DE LA MEZCLA (Gmm)	gr/cm3	2.513	2.513
7	GRADO DE COMPACTACION (R)	%	93.04	92.92
8	VOLUMEN DE AIRE (a%)	%	6.96	7.08
9	VOLUMEN DE VACÍOS DE AIRE (Va)	cm3	80.32	81.80

Nota. Broncano y Campos (2021)**Figura 53***Datos del Ensayo Rueda Cargada para la Mezcla Convencional. Caso 1*

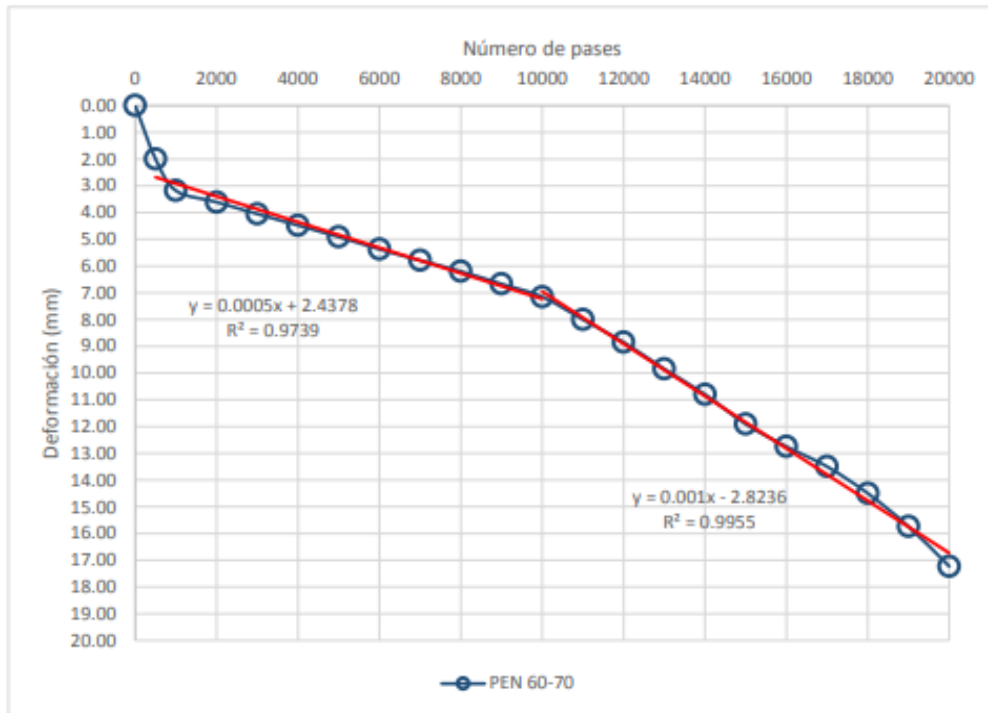
ITEM	NÚMERO DE PASES	NÚMERO DE CICLOS	DEFORMACIÓN	ITEM	NÚMERO DE PASES	NÚMERO DE CICLOS	DEFORMACIÓN
1	0	0	0.00	12	10000	5000	7.15
2	500	250	2.00	13	11000	5500	8.00
3	1000	500	3.18	14	12000	6000	8.85
4	2000	1000	3.61	15	13000	6500	9.85
5	3000	1500	4.05	16	14000	7000	10.80
6	4000	2000	4.48	17	15000	7500	11.91
7	5000	2500	4.91	18	16000	8000	12.75
8	6000	3000	5.37	19	17000	8500	13.50
9	7000	3500	5.79	20	18000	9000	14.50
10	8000	4000	6.20	21	19000	9500	15.74
11	9000	4500	6.67	22	20000	10000	17.23

Nota. Broncano y Campos (2021)

Estos datos se graficaron (Número de pasadas vs Deformación). Ver Figura 54.

Figura 54

Deformación en Ensayo Rueda Cargada para Mezcla Convencional. Caso 1



Nota. Broncano y Campos (2021)

b. Ensayo de la Rueda de Hamburgo a la mezcla modificada. Caso 1

En este caso, los investigadores no realizaron el ensayo de la rueda cargada a las mezclas modificadas con RET, sin embargo, sí lo hicieron a dos mezclas modificadas con SBS. Dichas mezclas se prepararon con 4.5% (contenido óptimo) y 5% de asfalto modificado con SBS en las que obtuvieron valores del ahuellamiento máximo de 7.72 mm y 3.74 mm, respectivamente. (Broncano et al., 2021, p.217).

Ver Figura 55.

Figura 55

Ensayo Rueda de Hamburgo MAC convencional y modificadas con SBS

	PEN 60-70	SBS 4.50%	SBS 5.00%
Rutting Slope	$y=0.0005x+2.4378$	$y=0.0002x+3.4782$	$y=0.00009x+1.6617$
Stripping Slope	$y=0.001x-2.8236$	$y=0.0002x+2.9164$	$y=0.0001x+1.5762$
SIP (Punto de Inflexión del desprendimiento)	(10522, 7.69)	NP	NP
Numero de pases a la falla	20000	20000	20000
Máxima Profundidad (mm)	17.23	7.72	3.74

Nota. Broncano y Campos (2021)

Broncano y Campos (2021) realizaron ensayos de tracción indirecta (TSR) para determinar el desempeño de las mezclas por humedad inducida y de tracción directa por el método de viga semi circular simplemente apoyada (SCB). Se realizaron a las MAC con el contenido óptimo de asfalto cuyos resultados sirven para comparar las tres mezclas: convencional, modificada con SBS y modificada con Elvaloy.

Comparando las mezclas modificadas, se tiene que la mezcla con Elvaloy alcanzó el 95.6% de la estabilidad de la mezcla con SBS. El flujo fue el 93% del flujo de la mezcla con SBS. En condiciones húmedas, ambas mezclas tuvieron similar comportamiento. Entonces, inferimos que la mezcla con Elvaloy tiene una resistencia igual al 95% de la mezcla con SBS y, por lo tanto, podríamos deducir que tendría un ahuellamiento 5% mayor que el que experimentó la mezcla con SBS. Por lo que, estimamos que podemos considerar el valor de $7.72 + 5\%$, es decir 8.11, como el ahuellamiento (en milímetros) que podría haber tenido la mezcla modificada con Elvaloy RET.

Mostramos los resultados de los ensayos Marshall realizados a las tres mezclas en la Figura 56.

Figura 56

Ensayos para MAC convencional y modificadas. Caso 1

ITEM	ENSAYO	Un	PEN 60-70	SBS	ELVALOY
1.0	MARSHALL				
1.1	Estabilidad	Kg	1648.25	1870.00	1788.25
1.2	Flujo	Mm	4.15	4.07	3.78
2.0	TSR				
2.1	Condición Húmedo	%	82.90	87.68	87.17
2.2	Condición Congelado	%	80.92	87.17	80.35
3.0	SCB				
3.1	Índice de Tenacidad	Kg-m/m ²	41.96	50.75	45.69
4.0	RUEDA DE HAMBURGO	mm	17.23	7.72	-

Nota. Broncano y Campos (2021)

Caso 2. Chávez (2019)

Esta investigación no incluyó pruebas de desempeño, sólo realizaron el ensayo Marshall para el diseño de las mezclas y estudiaron los cambios en el ligante PEN 60/70 y modificado con Elvaloy RET mediante ensayos de caracterización.

Caso 3. López y Puma (2017)

Este caso de investigación, no realizaron el ensayo de la Rueda de Hamburgo. Realizaron el ensayo Lottman de tracción indirecta, Cántabro y Módulo Resiliente (o módulo de rigidez) por tracción indirecta.

El módulo resiliente es una medida de la rigidez de la mezcla, definido como la relación entre el esfuerzo de tracción entre la deformación. Estudiaron el módulo para seis temperaturas de ensayo, 5°C, 10°C, 20°C, 30°C, 40°C y 50°C con la finalidad de evaluar el comportamiento de la mezcla a diferentes temperaturas.

De los resultados del ensayo se obtuvo que la mezcla modificada con más alto módulo, en el rango de 20°C a 50°C, es la de 1.3% RET, por lo cual éste es considerado el contenido óptimo de polímero Elvaloy RET según pruebas de desempeño.

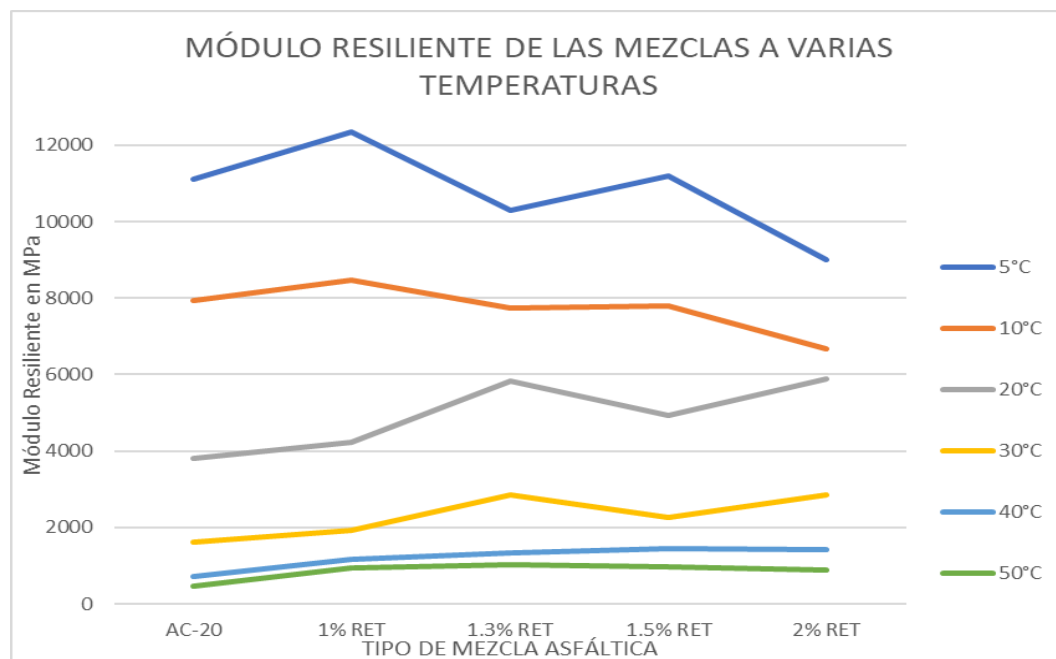
Ver datos en la Tabla 28.

Tabla 28*Ensayo Módulo Resiliente de las MAC. Caso 3*

Módulo en MPa	Convencional	1%	1.3%	1.5%	2%
Temperatura	AC-20	RET	RET	RET	RET
5°C	11116	12358	10311	11186	9001
10°C	7937	8480	7733	7792	6684
20°C	3819	4239	5835	4933	5885
30°C	1610	1933	2845	2268	2844
40°C	713	1164	1339	1451	1433
50°C	462	947	1037	963	883

Nota. Adaptada de datos de la Tabla 139 (p.190) por López y Puma (2017)

Estos datos se grafican en la Figura 57.

Figura 57*Ensayos Módulo Resiliente para MAC convencional y modificadas. Caso 3*

Nota. Elaboración propia.

Datos de Módulo Resiliente evaluados por López y Puma, 2017.

Caso 4. Flores, Delgado y Gómez (2018)

Evaluación del desempeño de MAC con la rueda cargada de Hamburgo. México.

Este caso corresponde a una publicación técnica del Instituto Mexicano del Transporte, en la que usaron asfalto PG 64-16 con aditivo promotor de adherencia y PG 76-16 modificado con 0.75% de Elvaloy RET más 0.1% de PPA. Utilizaron agregados de tamaño nominal (TN) de 12.5 y 19.0 mm. Para este estudio tomamos los datos de las mezclas con agregados de ¾" (19 mm) y valores de ahuellamiento a la temperatura de ensayo de 50°C para 20000 ciclos de carga, para hacer la comparación en las mismas condiciones de ensayo.

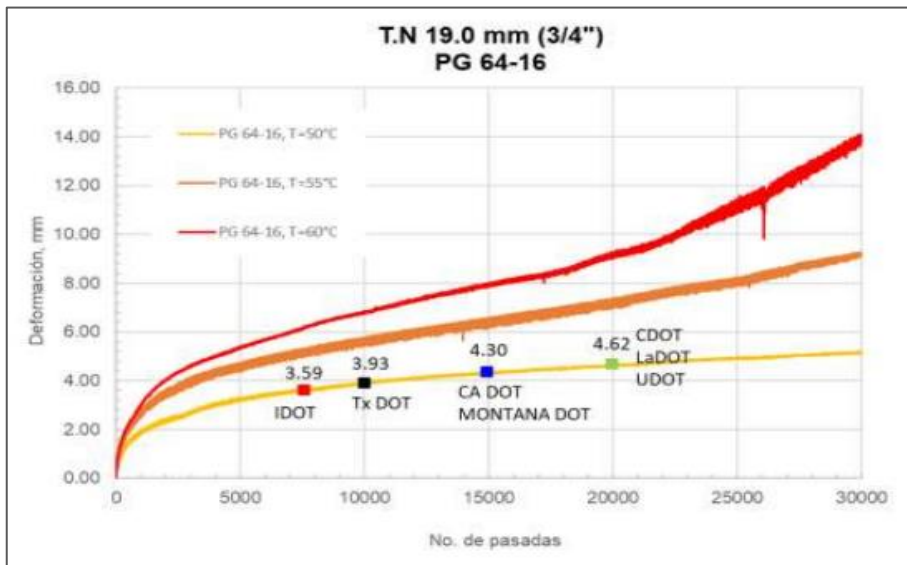
Las gráficas muestran que la deformación permanente depende de la temperatura y del número de pasadas. A más temperatura, mayor ahuellamiento y a más ciclos, mayor deformación permanente. En México las condiciones estandarizadas del ensayo de la rueda cargada son 50°C de temperatura y 20,000 ciclos.

Para 50°C y 20 000 ciclos, el valor del ahuellamiento de la mezcla con 5.4% de asfalto convencional PG 64-16 fue de 4.62 mm y el valor de la mezcla con 5.4% de asfalto modificado PG 76-16 fue de 3.36 mm.

Los resultados de la deformación permanente de las mezclas TN ¾" con asfalto convencional PG 64-16 (a 50°C en línea delgada amarilla) se presentan en la Figura 58 y los resultados de las mezclas TN ¾" con asfalto modificado PG 76-16 con Elvaloy (la correspondiente a 50°C en amarillo) se presentan en la Figura 59.

Figura 58

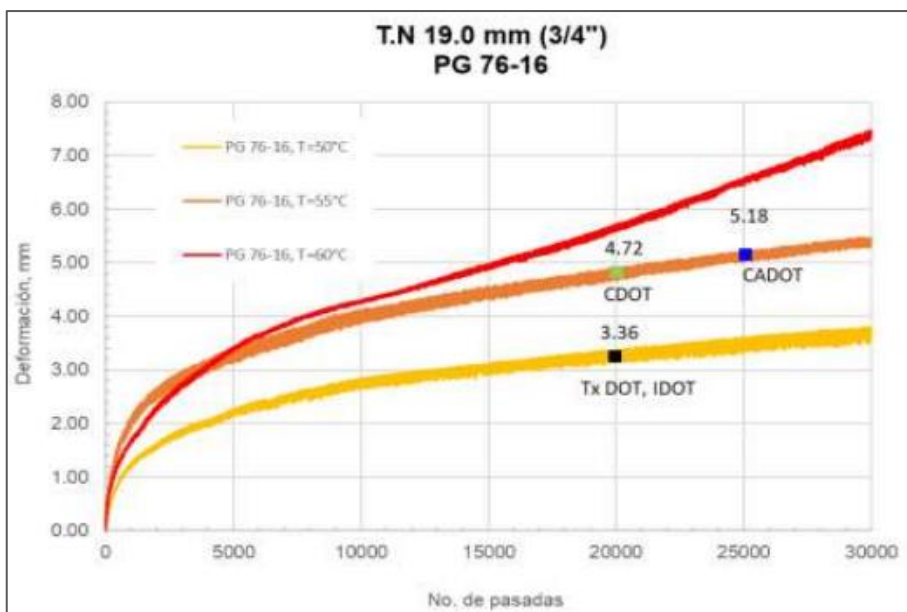
Ensayo de Rueda cargada para mezcla con PG 64-16 y TN 3/4". Caso 4



Nota. Flores, Delgado y Gómez (2018)

Figura 59

Ensayo de Rueda cargada para mezcla modificada PG 76-16 y TN 3/4"



Nota. Flores, Delgado y Gómez (2018)

5.3 Resultados de los ensayos

5.3.1 Resultados de ensayos a los CAP

Se realiza la caracterización de los asfaltos, aunque no sea exactamente un objetivo específico, sin embargo, es importante estudiar sus propiedades para compararlos y evidenciar qué propiedades han sido modificadas, ya que el CAP forma parte de la mezcla.

Caso 1. Broncano y Campos (2021)

Se hace una comparación entre las características del CAP convencional y del asfalto modificado con RET, que se muestra en la Tabla 29.

Tabla 29

Comparación de Resultados del CAP Convencional y Modificado con RET. Caso 1

Ensayo	Unidad	CAP PEN 60/70	CAP Modificado
Penetración a 25°C, 5 s.	dmm	61	58
Punto de inflamación	°C	290°	283°
Punto de ablandamiento	°C	50°	62°
Ductilidad a 25°C	cm	>150	150
Viscosidad Cinemática 135°C	cStokes	424.4	1692
Recuperación elástica a 25°C	%	--	80%
Pruebas sobre la Película delgada			
Pérdida de masa	%	0.2	
Penetración retenida	%	66	
Ductilidad del residuo a 25°C	cm	78	
Recuperación elástica a 25°C	%	--	78%
Penetración a 4°C, 60 s.	dmm.	--	24
Separación, diferencia entre punto de Ablandamiento, porción Superior e Inferior	°C	--	2.5

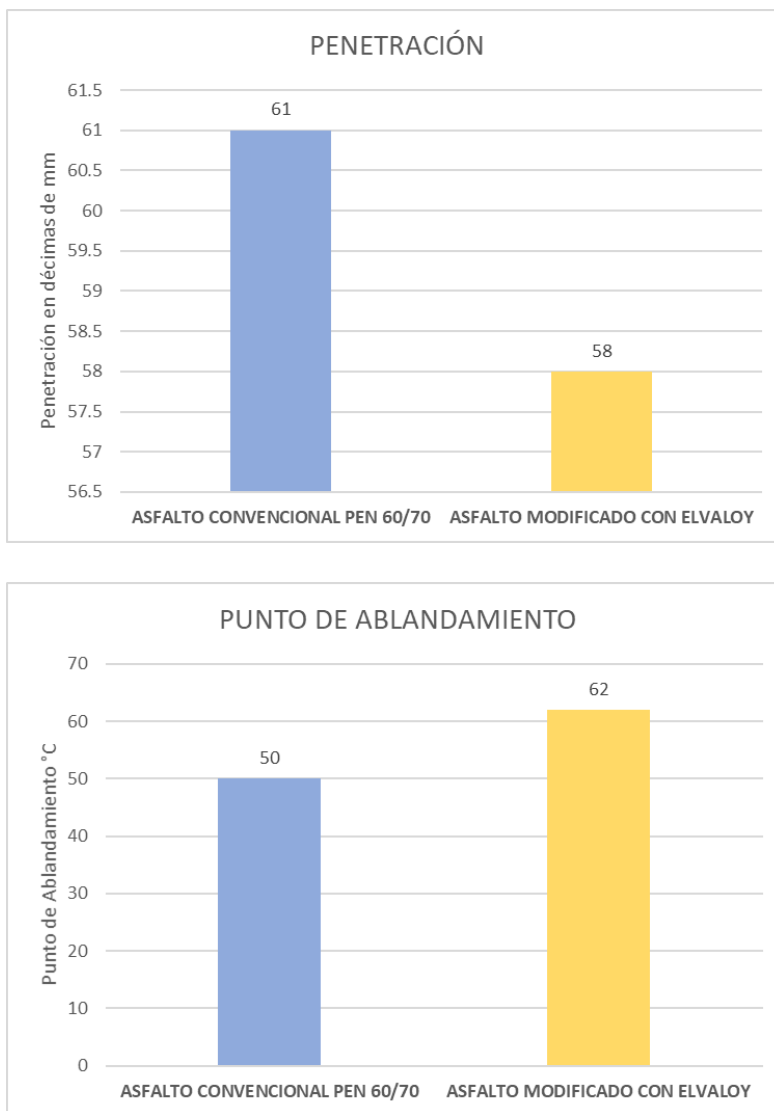
Nota. Broncano y Campos (2021)

Adaptado de los Certificados de Calidad (pp.257-259)

Del cuadro comparativo, vemos que la penetración del asfalto modificado (AMP) disminuyó en 5% (de 61 a 58 décimas de mm) indicando que la consistencia del AMP es más rígida. El punto de ablandamiento aumentó en 24%, de 50°C a 62°C. Ver Figura 60.

Figura 60

Resultados del Ensayo de Penetración y Punto de Ablandamiento. Caso 1



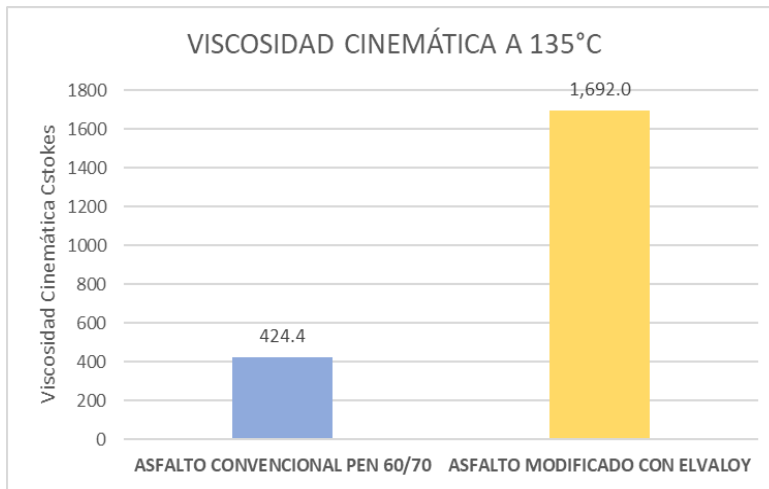
Nota. Elaboración propia.

La ductilidad no mostró mucha variación. La viscosidad cinemática aumentó de 424.4 a 1692 centiStokes, que demuestra que el asfalto modificado es mucho más viscoso.

La variación de la viscosidad se muestra en la Figura 61.

Figura 61

Resultados de la Viscosidad Cinemática. Caso 1

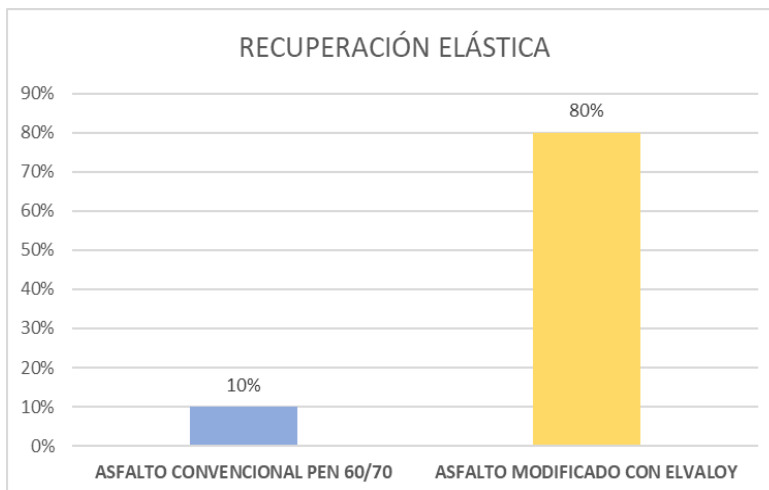


Nota. Elaboración propia.

Aunque las EG 2013 no solicitan recuperación elástica para asfaltos convencionales (Tabla 415-02), un CAP 60/70 tiene valores de recuperación elástica de 10% (Huamán 2022). Mientras que para el asfalto modificado se obtuvo una recuperación elástica de 78%. Ver Figura 62.

Figura 62

Resultados de la Recuperación Elástica. Caso 1



Nota. Elaboración propia.

Caso 2. Chávez (2019)

Se presenta la comparación del asfalto convencional y del modificado para 1.4% de RET en la Tabla 30.

Tabla 30

Comparación de Resultados CAP Convencional y Modificado. Caso 2

Ensayo	Unidad	CAP PEN 60/70	CAP Modificado
Penetración a 25°C, 5 s.	dmm	67	54
Punto de inflamación	°C	296°	297°
Punto de ablandamiento	°C	50°	70.2°
Ductilidad a 25°C	cm	>105	
Viscosidad Cinemática 135°C	cStokes	400	1483.5
Recuperación elástica a 25°C	%		78%
Pruebas sobre la Película delgada			
Pérdida de masa	%	0.39	
Penetración retenida	%	61.2	
Ductilidad del residuo a 25°C	cm	54.7	
Recuperación elástica a 25°C	%		68%
Penetración a 4°C, 60 s.	dmm.		24
Separación, diferencia entre	°C		1.3
Punto de Ablandamiento, porción Superior e Inferior			

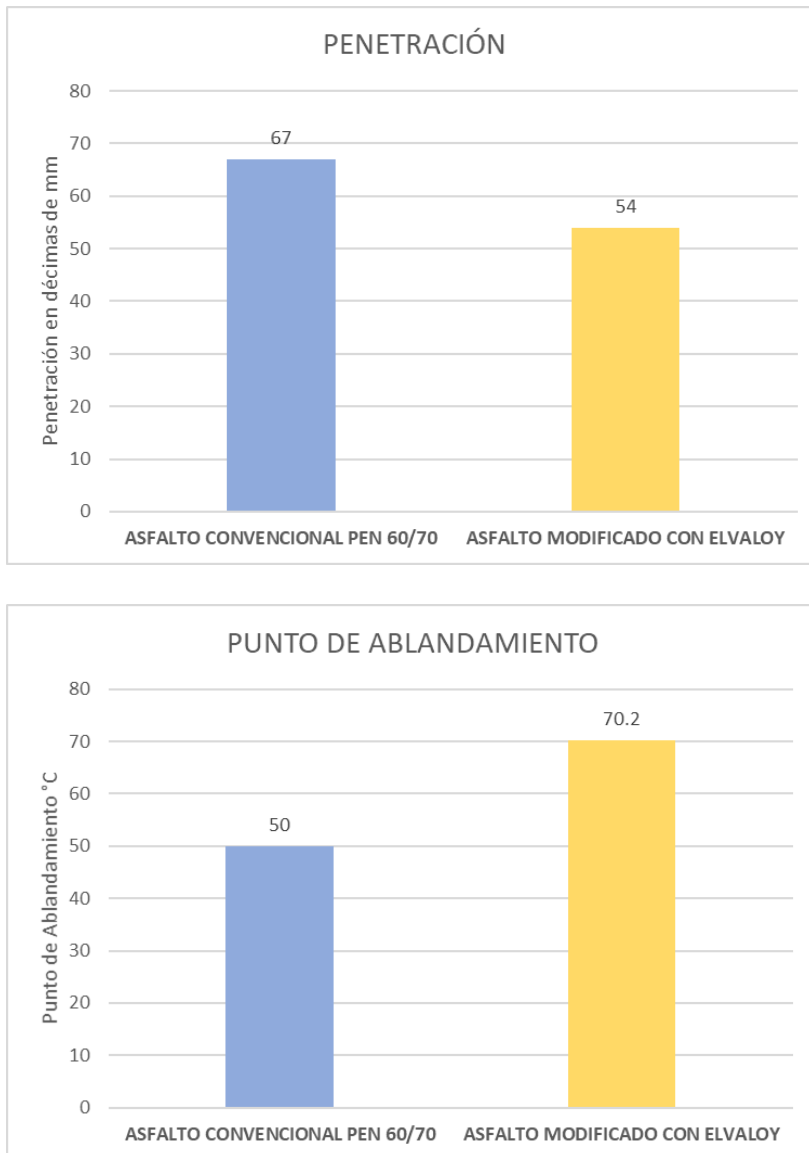
Nota. Chávez (2019)

Adaptado de los ensayos realizados en TDM (p.140).

Del cuadro comparativo, vemos que la penetración del asfalto modificado (AMP) disminuyó en 13% (de 67 a 54 dmm) indicando que la consistencia del AMP es más rígida. El punto de ablandamiento aumentó de 50°C a 70.2°C (40.4% de aumento) indicando un aumento de la consistencia del asfalto. Ver Figura 63.

Figura 63

Resultados de Ensayo de Penetración y Punto de Ablandamiento. Caso 2



Nota. Elaboración propia.

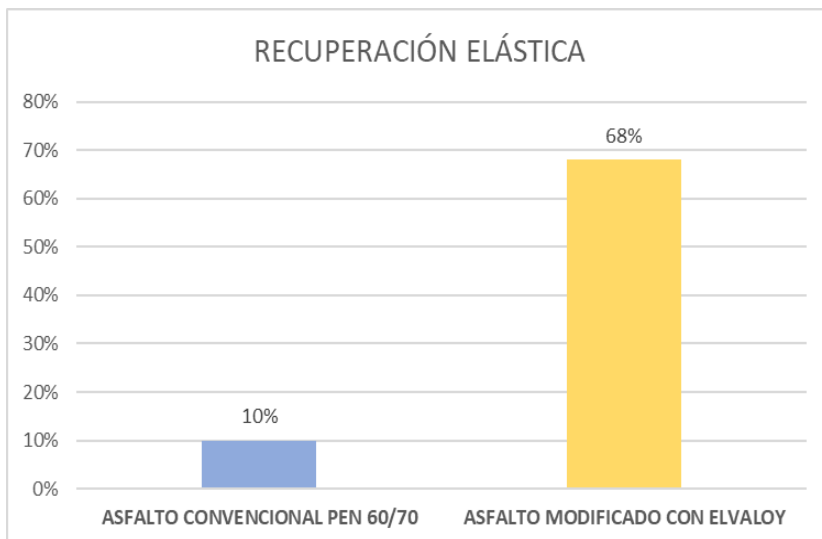
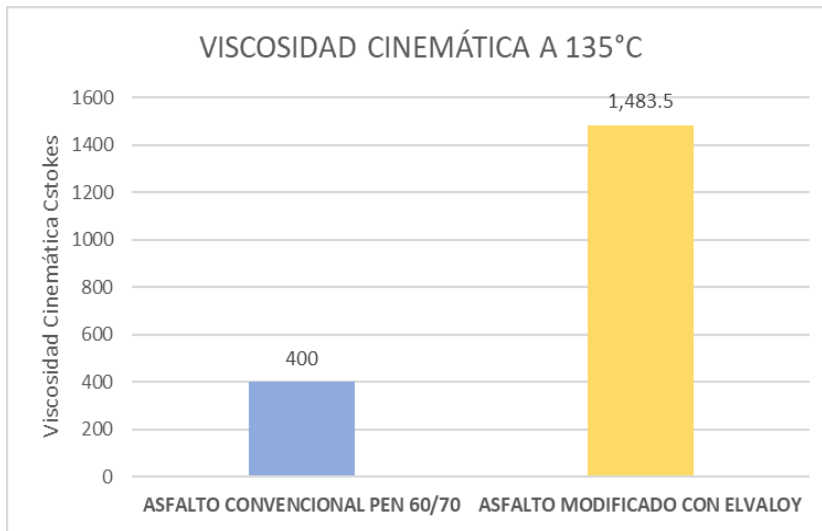
La viscosidad cinemática a 135°C aumentó de 400 a 1483.5 cSt., es decir un 270%, que indica que la consistencia del AMP es mucho más rígida.

Considerando que un CAP 60/70 tiene valores de recuperación elástica de 10% (Huamán 2022) comparamos con la recuperación elástica del asfalto modificado de 68%.

La variación de los valores de la viscosidad cinemática y de la recuperación elástica, se presentan respectivamente en la Figura 64.

Figura 64

Resultados de la Viscosidad Cinemática y Recuperación Elástica. Caso 2



Nota. Elaboración propia.

Caso 3. López y Puma (2017)

Se presenta la comparación de los asfaltos, convencional y los cuatro modificados, en la Tabla 31.

Tabla 31*Comparación de Resultados CAP Convencional y Modificado. Caso 3*

Ensayo	Unid.	AC-20	1%	1.3%	1.5%	2%
Penetración a 25°C, 5 s.	dmm	65	67	65	64	60
Punto de inflamación	°C	288	282	280	276	272
Punto de ablandamiento	°C	49°	57°	62°	64°	66°
Ductilidad a 25°C	cm	117	28	25	21	20
Viscosidad Cinemática 135°C	cSt.	410.1	1059	2690	2667	3554
Viscosidad Rotacional a 135°C	cP.	387.5	1002	2539	2518	3364
Recuperación elástica a 25°C	%	10%	64%	75%	76%	90%
Recuperación elástica torsional	%	7	40	42	48	53
Pruebas sobre la Película delgada						
Pérdida de masa	%	-0.008	-0.007	-0.036	-0.04	-.042
Penetración retenida	%	77	57	62	67	77
Viscosidad Rotacional a 135°C	cP	617.5	2944	3013	6138	25560
Recuperación elástica a 25°C	%	17%	42%	68%	52%	77%
Incremento Punto Ablandamiento	°C	8	10	14	14	15
Separación, diferencia entre	°C	--	1	2	2	2
Punto de Ablandamiento, porción Superior e Inferior						

Nota. López y Puma (2017)

Para López y Puma (2017) un asfalto “con baja penetración tendrá un punto de ablandamiento alto, es decir la rigidez ha incrementado” (p.199).

Galindo (2020) señala que “los asfaltos modificados presentan menor penetración y mayores puntos de ablandamiento, que un asfalto convencional” (p.46).

Se evidencia que, el asfalto modificado con 1.5% RET ha incrementado su rigidez o dureza un 30%, medido desde el punto de ablandamiento.

La penetración no tuvo mucha disminución (1.5%). Ver Figura 65.

Figura 65

Resultados de la Penetración y Punto de Ablandamiento. Caso 3.

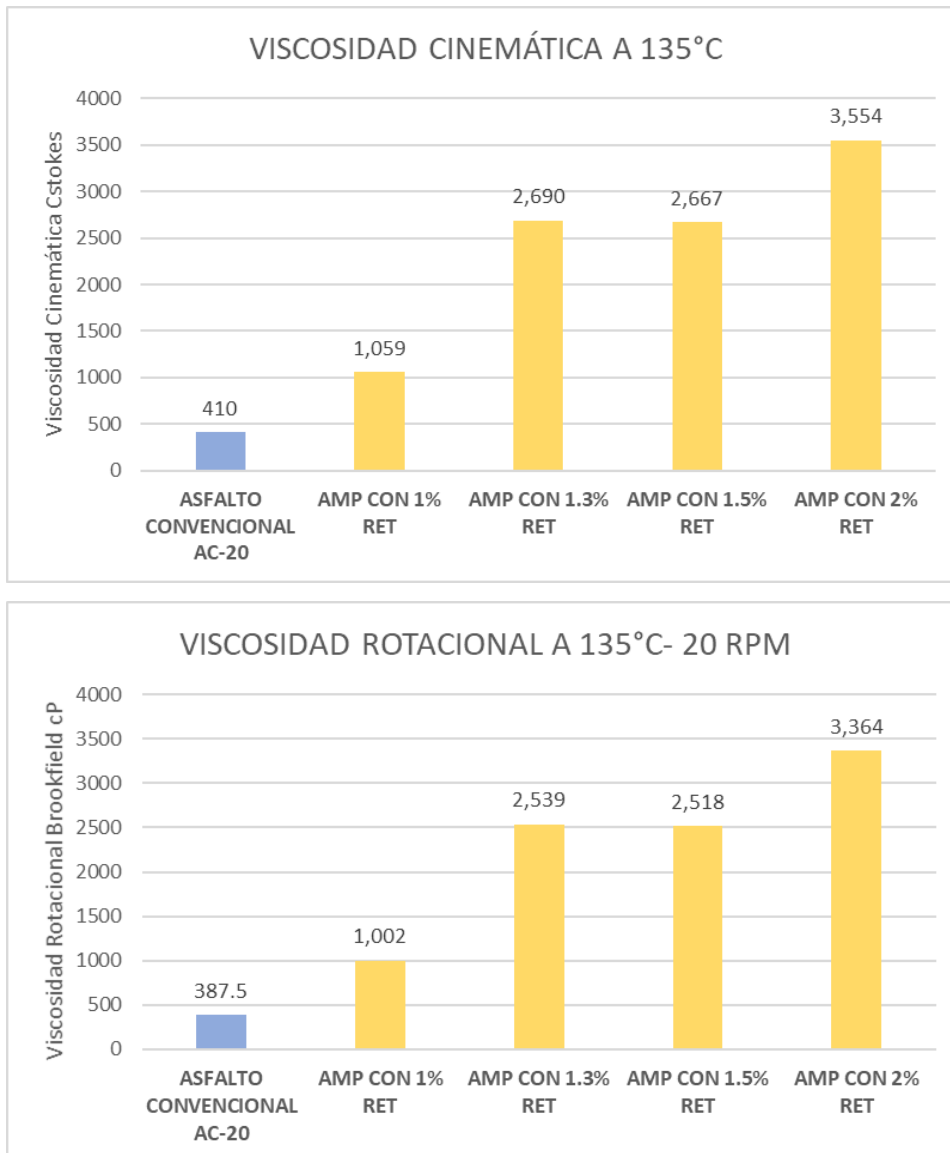


Nota. Adaptado de datos de ensayos por López y Puma, 2017.

Para el AMP con 1.5% RET, la viscosidad cinemática a 135°C aumentó un 550% y en el caso de la viscosidad rotacional aumentó igual 550%. Ver Figura 66.

Figura 66

Resultados de la Viscosidad Cinemática y Rotacional. Caso 3.



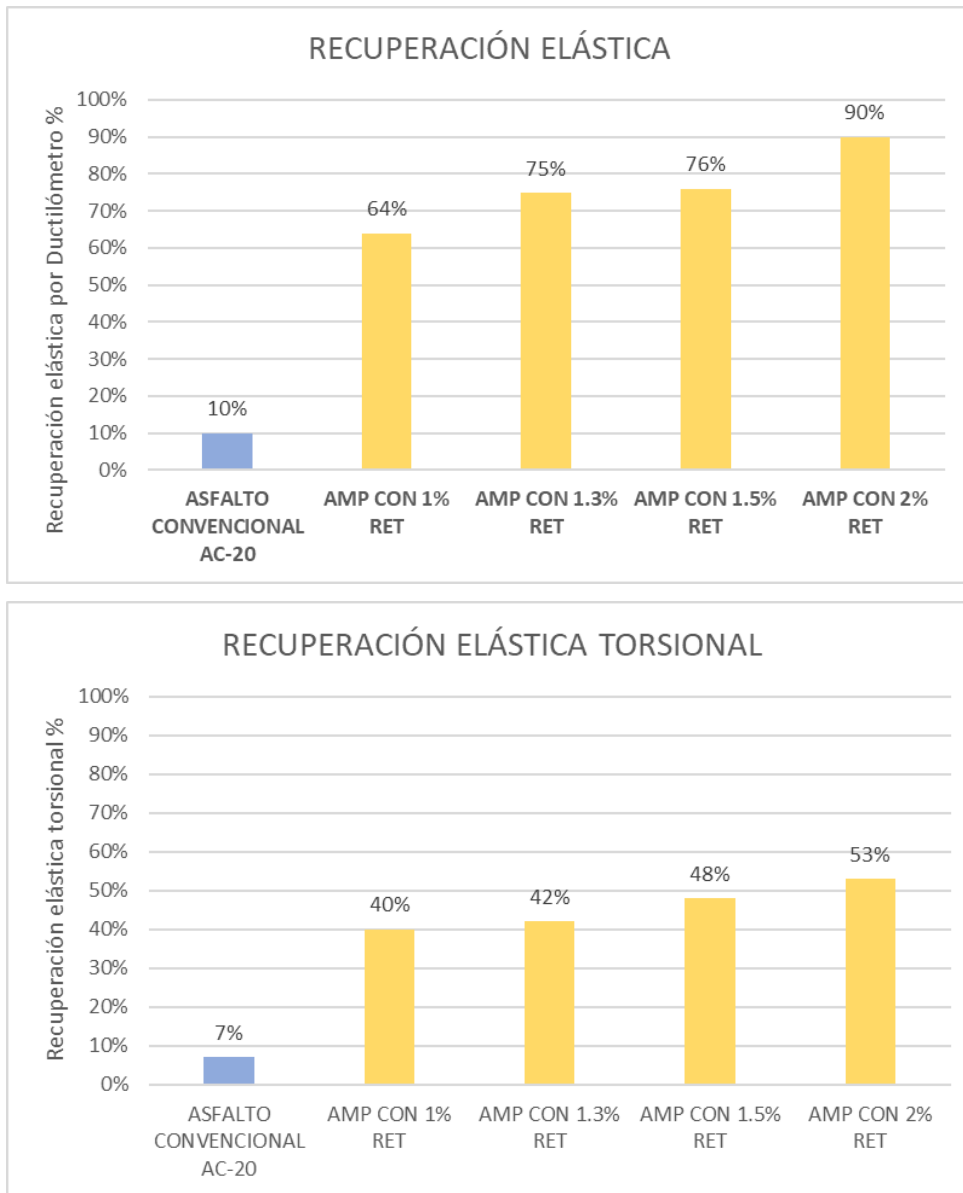
Nota. Elaboración propia.

Adaptado de datos de ensayos (p.142) por López y Puma, 2017.

Para el AMP con 1.5% RET, la recuperación elástica por ductilómetro aumentó de 10% a 76%, es decir se obtuvo una mejora de 660%, mientras que la ductilidad disminuyó en 82%. Ver Figura 67.

Figura 67

Resultados de la Recuperación elástica y elástica torsional. Caso 3.



Nota. Elaboración propia.

Adaptado de datos de ensayos (p.142) por López y Puma, 2017.

5.3.2 Resultados de Ensayos Marshall (O.E.1 y O.E.2)

En este ítem presentamos cuadros comparativos con los resultados de los ensayos Marshall para ambas mezclas, que incluyen tanto parámetros mecánicos como volumétricos. Los parámetros mecánicos se utilizan para evaluar la propiedad de estabilidad (Objetivo Específico 1) y los parámetros volumétricos para evaluar la durabilidad (Objetivo Específico 2), aunque son presentados en conjunto en esta sección, ya que se ambos se obtienen en el mismo ensayo.

El análisis y discusión de los resultados de los parámetros mecánicos y parámetros volumétricos, para evaluar los objetivos específicos 1 y 2 respectivamente, se efectúa en los ítems 5.4.1 y 5.4.2.

Caso 1. Broncano y Campos (2021). Influencia del AMP con Elvaloy sobre las propiedades de la MAC. Arequipa.

Los resultados del ensayo Marshall para la mezcla convencional con CAP 60/70 y para la mezcla modificada con Elvaloy RET se presentan en la Tabla 32, con datos de la tabla 4-32 (p.165) de la investigación de Broncano y Campos (2021).

Tabla 32

Resultados Ensayo Marshall MAC Convencional y Modificada. Caso 1

Descripción	Convencional	Modificada
Contenido óptimo de asfalto	5.03%	4.4%
Vacíos de aire	3.88%	4.28%
Vacíos en agregado mineral (VAM)	16.04%	14.99%
Vacíos llenos de asfalto (VFA)	75.80%	71.47%
Peso Unitario (g/cm ³)	2.42	2.43
Estabilidad (Kg)	1648.25	1788.25
Flujo (mm)	4.15	3.78

Nota. Elaboración propia.

Caso 2. Chávez (2019): Mejoramiento del comportamiento mecánico de una MAC con polímero Elvaloy 4170 RET. Lima.

Los resultados del ensayo Marshall para la mezcla convencional con CAP 60/70 y para las mezclas modificadas con Elvaloy 4170 RET con tres contenidos (1.1%, 1.4% y 1.7%) se presentan en la Tabla 33, con los datos de los resultados (pp.105-113) de Chávez (2019).

Tabla 33

Resultados Ensayo Marshall MAC Convencional y Modificadas. Caso 2

Descripción	60/70	1.1% RET	1.4% RET	1.7%RET
Contenido óptimo asfalto	5.03%	5.4%	5.8%	5.3%
Vacíos de aire	4.1%	4.2%	4.1%	4.1%
Vacíos Agregado (VMA)	16.04%	16.3	16.4%	16.1%
Vacíos con asfalto (VFA)	75.8%	74.9%	74.8%	75.1%
Peso Unitario (g/cm ³)	2.42	2.415	2.419	2.418
Estabilidad (Kg)	1421.4	1385.4	1566.4	1468.4
Flujo (mm)	3.4	3.7	4.6	3.7

Nota. Elaboración propia.

En este caso, según el diseño Marshall, el contenido óptimo de polímero fue de 1.4% RET con 0.02% de ácido poli fosfórico (PPA).

Caso 3. López y Puma (2017): Caracterización de MAC elaboradas con AMP con polímeros RET. Quito-Ecuador.

Los resultados del ensayo Marshall para la mezcla convencional con AC-20 (similar al CAP 60/70) y para las mezclas modificadas con Elvaloy 4170 RET con cuatro contenidos (1.0%, 1.3%, 1.5% y 2.0%) se presentan en la Tabla 34. Los requerimientos corresponden a los parámetros de diseño para tráfico pesado del MS-2 del Instituto del Asfalto.

Tabla 34*Resultados Ensayo Marshall MAC Convencional y Modificadas. Caso 3*

Descripción	AC-20 Requisito	1%	1.3%	1.5%	2%
		RET	RET	RET	RET
Cont. óptimo asfalto	6.6%	6.6%	6.6%	6.6%	6.6%
Vacíos de aire (%)	4.5%	3-5			
Vacíos VMA	16.31%	13 mín.			
Vacíos/Asfalto VFA	72.0%	65-75			
Densidad (g/cm ³)	2.231	2.23	2.23	2.23	2.23
Estabilidad (Kg)	1726	817	2031	2051	2135
Flujo (0.25 mm)	12	8-14	14	14	15

Nota. Elaboración propia.

Datos de los resultados (p.175 y p. 213) por López y Puma, 2017.

Cabe mencionar que los investigadores no hicieron el diseño Marshall de las mezclas modificadas, sino que asumieron el mismo contenido óptimo de asfalto de la MAC convencional, elaboraron las briquetas con él y las ensayaron en la prensa Marshall, donde obtuvieron directamente los valores de estabilidad y flujo, por lo cual no tomaron valores de los parámetros volumétricos.

El óptimo contenido de polímero fue de 1.3% RET determinando en base a las pruebas de desempeño.

Por otro lado, en este caso de estudio, el flujo de las mezclas modificadas con 1.5% RET y 2% RET de 15 centésimas de pulgada (3.75 mm) no cumple con el límite máximo de 14 (3.5 mm) recomendado por el Instituto del Asfalto.

5.3.3 Resultados del Ensayo de Desempeño Rueda de Hamburgo (O.E.3)

En este ítem presentamos cuadros comparativos con los resultados de los ensayos de la Rueda Cargada para ambas mezclas. El análisis y discusión de los resultados (para evaluar el Objetivo Específico 3) se efectúa en el ítem 5.4.3.

Caso 1. Broncano y Campos (2021). Influencia del AMP con Elvaloy sobre las propiedades de la MAC. Arequipa.

Los resultados de la profundidad máxima de ahuellamiento para ambas mezclas, convencional con asfalto 60/70 y modificada con Elvaloy, se presentan en la Tabla 35.

Tabla 35

Resultados de la Deformación Permanente de las mezclas. Caso 1

Deformación Permanente	Unid.	Mezcla Convencional	Mezcla Modificada
Profundidad ahuellamiento	mm	17.23	8.11

Nota. Adaptado de la Tabla 6-15 (p.217) por Broncano y Campos, 2021.

El ahuellamiento de la mezcla con Elvaloy se consideró a partir de un análisis explicado en el ítem 5.2.4, Caso 1 b.

Caso 2. Chávez (2019): Mejoramiento del comportamiento mecánico de una MAC con polímero Elvaloy 4170 RET. Lima.

Esta investigación, no incluyó pruebas de desempeño, únicamente realizaron el ensayo Marshall. También estudiaron los cambios en el ligante convencional PEN 60/70 y el asfalto modificado con RET.

Caso 3. López y Puma (2017): Caracterización de MAC elaboradas con AMP con polímeros RET. Quito-Ecuador.

En esta investigación, no se realizó el ensayo de la Rueda de Hamburgo, más bien, realizaron entre otros ensayos de desempeño, el ensayo de módulo resiliente por tracción indirecta (o módulo de rigidez). Siendo la temperatura de ensayo de la rueda de Hamburgo es 50°C, analizamos los valores del módulo resiliente de las mezclas convencional con asfalto AC-20 y modificadas con 1.0%, 1.3%, 1.5% y 2.0% RET.

De donde se obtiene que la mezcla con mayor módulo fue la de 1.3% RET. Siendo el módulo de esta mezcla de 1037 MPa y el de la convencional de 462 MPa a 50°C, se tiene que, el módulo se ha incrementado en 124.5%. Ya que el módulo resiliente es una medida de la rigidez de la mezcla, esto demuestra que la mezcla modificada con 1.3% Elvaloy RET (contenido óptimo) tiene una mayor rigidez a la temperatura de 50°C que la

convencional, ratificando el buen desempeño del polímero Elvaloy RET a temperaturas de servicio altas.

Caso 4. Flores, Delgado y Gómez (2018): Evaluación del desempeño de MAC con la rueda cargada de Hamburgo. México.

En este caso se utilizaron mezclas con dos cementos asfálticos: PG 64-16 con promotor de adherencia y PG 76-16 modificado con 0.75% de Elvaloy RET.

El ahuellamiento a la temperatura de 50°C y para 20 000 ciclos de carga, se muestran en la Tabla 36.

Tabla 36

Resultados de la Deformación Permanente de las mezclas. Caso 4

Deformación Permanente	Mezcla Convencional	Mezcla Modificada
	PG 64-16 con Aditivo	PG 76-16
	Mejorador de adherencia	con 0.75% Elvaloy
Profundidad ahuellamiento (mm)	4.62	3.36

Nota. Adaptado de los resultados de deformación permanente de las mezclas TN ¾” con asfalto PG 64-16 y PG 76-16, Figuras 3.3 y 3.4 (p.16) por Flores et al., 2018.

De esta tabla, sólo podemos tomar la información sobre el valor del ahuellamiento de la mezcla modificada con Elvaloy de 3.36 mm, ya que la mezcla con PG 64-16 tiene un aditivo promotor de adherencia y, por lo tanto, no la podemos considerar como similar para efectos de comparación con una mezcla convencional con asfalto puro PEN 60/70.

5.4 Análisis y discusión de los resultados

En este ítem presentamos el análisis y la discusión de resultados en función de los tres objetivos específicos planteados.

5.4.1 Análisis y discusión de resultados de parámetros mecánicos Marshall para evaluar la estabilidad (Objetivo Específico 1)

Considerando los parámetros mecánicos, presentamos la comparación de la estabilidad y fluencia Marshall obtenidas en los ensayos, las que determinan la propiedad de resistencia o estabilidad de las mezclas, convencionales y modificadas. Se realiza para los tres casos de estudio y luego se obtiene un resultado final promedio, para discutirlo en contraste con lo obtenido por otros investigadores.

Caso 1. Broncano y Campos (2021). Influencia del AMP con Elvaloy sobre las propiedades de la MAC. Arequipa.

En este caso de estudio se trabajó con una sola mezcla modificada con Elvaloy RET (se utilizó el asfalto modificado Betutec IC con Elvaloy), pero no indicaron el porcentaje de polímero utilizado. La comparación de los parámetros mecánicos referidos a estabilidad y fluencia se presentan en la Tabla 37.

Tabla 37

Cuadro Comparativo de Parámetros Mecánicos de las MAC. Caso 1

Parámetro Mecánico	Mezcla Convencional con CAP PEN 60/70	Modificada con Elvaloy	% Variación
Estabilidad (Kg)	1648.25	1788.25	+ 8.5%
Flujo Marshall (mm)	4.15	3.78	- 8.9%

Nota. Elaboración propia.

Ensayos realizados por Broncano y Campos (2019)

La estabilidad en el Caso 1 tuvo un incremento de 8.5%. El flujo varió de 4.15 mm en la mezcla convencional a 3.78 mm en la modificada. Sin embargo, el valor del flujo de las mezclas modificadas con cualquier polímero normalmente es mayor al de la mezcla

convencional, por lo que esa disminución del flujo no la tomaremos en consideración, pues probablemente hubo algún error en la toma de datos o de otro tipo.

Los criterios del Instituto del Asfalto para tráfico pesado indican que, el flujo debe encontrarse entre 8 y 14 centésimas de pulgada (2 y 3.6 mm). En ambos casos, convencional y modificada, tenemos mezclas con flujos altos que exceden el límite máximo, es decir se tienen mezclas con tendencia plástica, lo que indica que pueden deformarse fácilmente con las cargas del tránsito (MS-22, 1992, p.77).

Caso 2. Chávez (2019): Mejoramiento del comportamiento mecánico de una MAC con polímero Elvaloy 4170 RET. Lima.

Este caso de estudio se trabajó con tres mezclas modificadas con Elvaloy RET, pero en esta parte del análisis se toma únicamente la mezcla con el contenido óptimo de polímero que fue evaluado en la investigación. El contenido óptimo de polímero fue de 1.4% de Elvaloy 4170 RET.

La estabilidad varió de 1421.4 Kg a 1566.4 Kg, con un incremento de 10.2%. La variación del flujo fue de 3.4 mm a 4.6 mm, con un incremento de 35.3%.

La comparación de los parámetros mecánicos de estabilidad y fluencia del Caso 2 se presentan en la Tabla 38.

Tabla 38

Cuadro Comparativo de Parámetros Mecánicos de las MAC. Caso 2

Parámetro Mecánico	Mezcla Convencional con CAP PEN 60/70	Modificada 1.4% RET	% Variación
Estabilidad (Kg)	1421.4	1566.4	+10.2%
Flujo Marshall (mm)	3.4	4.6	+35.3%

Nota. Elaboración propia.

Adaptado de los resultados (pp.94-96) por Chávez, 2019.

Caso 3. López y Puma (2017): Caracterización de MAC elaboradas con AMP con polímeros RET. Quito-Ecuador.

Este caso estudió cuatro mezclas modificadas con Elvaloy RET, pero se toma en cuenta la mezcla con el contenido óptimo de polímero, que corresponde a 1.3%. La comparación de los parámetros de estabilidad y fluencia se presentan en la Tabla 39.

Tabla 39

Cuadro Comparativo de Parámetros Mecánicos de las MAC. Caso 3

Parámetro Mecánico	Mezcla Convencional con AC-20	Modificada 1.3% RET	% Variación
Estabilidad (Kg)	1726	2051	+18.8 %
Flujo (0.25 mm)	12 (3 mm)	14 (3.5 mm)	+16.7 %

Nota. Adaptado de los resultados (p.175) por López y Puma (2019)

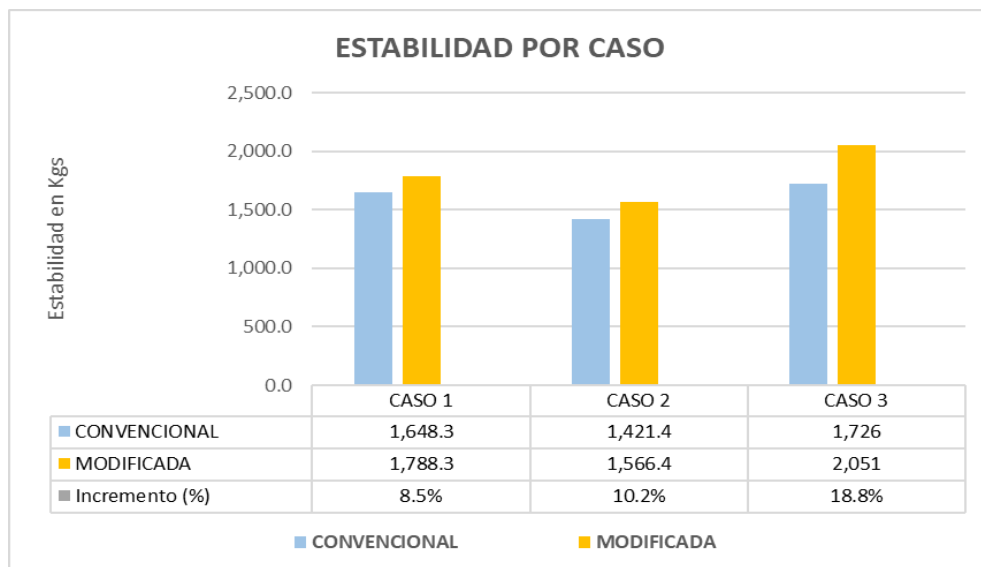
La estabilidad en el Caso 3 tuvo un incremento de 18.8% y el flujo incrementó en 16.7%.

Comparación de los tres casos:

Las variaciones de estabilidad para los tres casos se presentan en la Figura 68.

Figura 68

Resultados de la Estabilidad Marshall por Caso

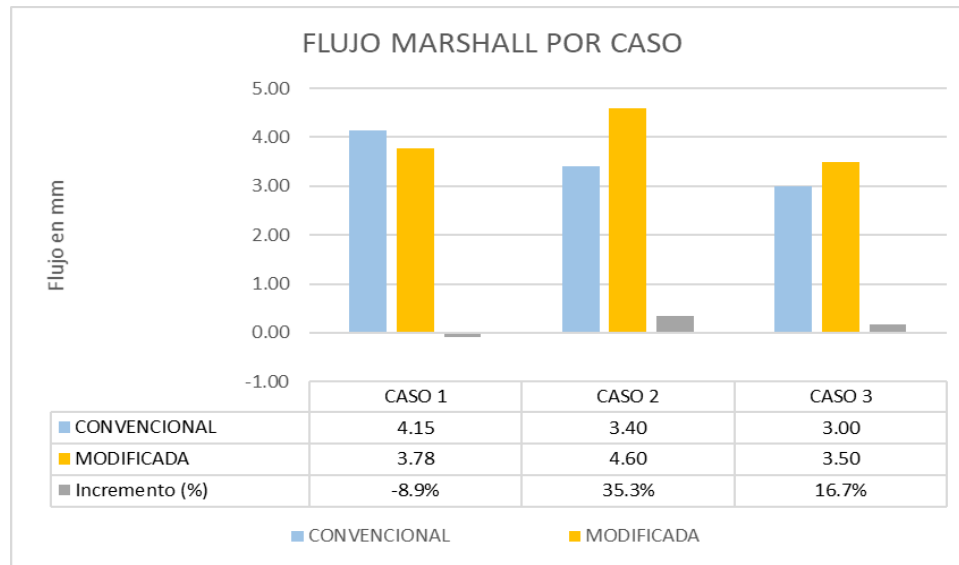


Nota. Elaboración propia.

Las variaciones de flujo para los tres casos se presentan en las Figuras 69.

Figura 69

Resultados del Flujo Marshall por Caso



Nota. Elaboración propia.

Para Broncano y Campos (2021) la estabilidad de la mezcla aumentó de 1648 Kg a 1788 Kg, aumentando 8.5%, y el flujo disminuyó de 4.1 a 3.8 mm (p.220).

Para Chávez (2019) la estabilidad aumentó de 1421.4 Kg a 1556.4 Kg, con un incremento de 10% (p.113). El flujo aumentó de 3.4 a 4.6 mm, es decir de 35% (p.114).

Para López y Puma (2017) la estabilidad de la MAC aumentó de 1726 Kg a 2015 Kg, es decir 18.8%. El flujo varió de 12 centésimas de pulgada (3 mm) a 14 o 3.6 mm, aumentando 16.7% (p.176).

Resultado final de los parámetros mecánicos:

En general, las mezclas con polímeros aumentan la estabilidad y el flujo. Para evaluar las variaciones tomamos una media de los 3 casos. Los parámetros mecánicos de las mezclas convencionales se presentan en la Tabla 40.

Tabla 40

Cuadro Comparativo de Parámetros Mecánicos Mezclas Convencionales

	Caso1	Caso 2	Caso 3	Resultado
Parámetro	PEN 60/70	PEN 60/70	AC-20	Medio
Estabilidad (Kg)	1648.25	1421.4	1726.0	1598.6
Flujo (mm)	--	3.4	3.0	3.2

Nota. Elaboración propia.

El resultado de los parámetros mecánicos de las mezclas modificadas se presenta en la Tabla 41.

Tabla 41

Cuadro Comparativo de Parámetros Mecánicos Mezclas Modificadas

	Caso1	Caso 2	Caso 3	Resultado
Parámetro	Elvaloy	1.4% RET	1.3% RET	Medio
Estabilidad (Kg)	1788.25	1566.4	2051.0	1801.9
Flujo (mm)	--	4.6	3.5	4.05

Nota. Elaboración propia.

Con estos valores medios hacemos la comparación de los parámetros finales para las mezclas convencionales y modificadas mediante la Tabla 42.

Tabla 42

Resultados Finales de los Parámetros Mecánicos de las MAC

Parámetro	Mezcla Convencional	Modificada	%
	Media	con Elvaloy	Variación
Estabilidad (Kg)	1598.6	1801.9	12.7 %
Flujo (mm)	3.2	4.05	26.5 %

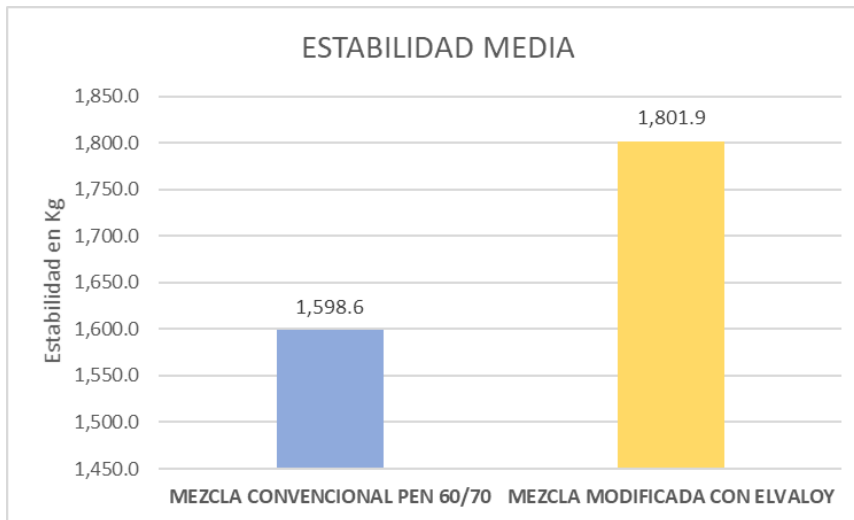
Nota. Elaboración propia.

La estabilidad media varió de 1598.6 Kg a 1801.9 Kg, con un incremento de 12.7%. El flujo varió de 3.2 mm a 4.05 mm, con un incremento de 26.5%. Sin embargo, los criterios del Instituto del Asfalto para tráfico pesado indican que el flujo debe estar entre 8 y 14 centésimas de pulgadas (2 a 3.5 mm). Por lo que, el flujo de la mezcla modificada excedió el valor máximo.

La variación de la estabilidad se muestra en la Figura 70 y la variación del flujo en la Figura 71.

Figura 70

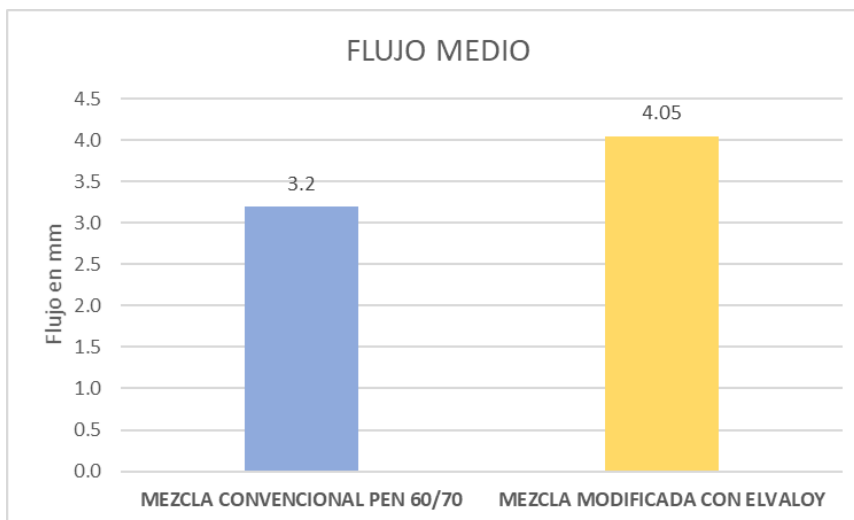
Resultado Final de Estabilidad de las MAC Convencional y Modificada



Nota. Elaboración propia.

Figura 71

Resultado Final del Flujo de las MAC Convencional y Modificada



Nota. Elaboración propia.

Discusión de los resultados de Parámetros Mecánicos:

Franco, León y Ruiz (2015) estudiaron al polímero RET, para lo cual utilizaron una mezcla con asfalto PEN 60/70 y otra con 1.3% de Elvaloy 4170 (RET) en Colombia. La estabilidad varió de 1228 a 1455 Kg. Obtuvieron un incremento de 18.5% en la estabilidad. (p.83)

Villafana y Ramírez (2019) estudiaron una mezcla convencional con PEN 60/70 y una modificada con Betutec IC (SBS). Obtuvieron una estabilidad de 1373 Kg para la MAC convencional y 1964 Kg para la MAC modificada, es decir, un incremento de 43% en la estabilidad. En cuanto al flujo, la mezcla convencional tuvo 3.47 mm y la modificada 3.33 mm, siendo el menor valor el más recomendable. (p.102)

Valdivia (2017) obtuvo para una mezcla convencional con PEN 60/70 una estabilidad de 1389 Kg y un flujo de 3.7 mm (pp.63-65) para un contenido óptimo de asfalto de 5.6%. Para una mezcla modificada con Betutec IC (4% de SBS) obtuvo una estabilidad de 1921 Kg y un flujo de 3.6 mm para 5.0% de asfalto (pp. 71-73). Es decir, obtuvo un incremento de 38.3% en la estabilidad (con SBS).

Estrada (2017) obtuvo para una mezcla convencional con PEN 120/150 en el Cusco una estabilidad de 1382 Kg y para una MAC modificada con SBS obtuvo un valor de 2047 Kg, es decir tuvo un incremento de 48% con SBS. El flujo varió de 14 a 14.1 (1/100”), es decir un aumento mínimo de 0.7%.

Rosales (2022) en su investigación sobre mezclas modificadas con polímero termoplástico LG Luprene (tipo SBS lineal) evaluó la resistencia de estas mezclas y la de una convencional con PEN 60/70 en Lima. Encontró que la estabilidad de la mezcla convencional con un óptimo de asfalto de 5.5% fue de 1242 Kg y el flujo fue de 3.6 mm. La mezcla modificada con 7.5% de polímero tuvo una estabilidad de 1811 Kg y un flujo de 3.5 mm para un contenido óptimo de asfalto modificado de 5.5%. Por lo que, el incremento en la estabilidad fue de 45.8% ya que se trata de un polímero tipo SBS. (pp.74-78)

Entonces, se deduce que las mezclas modificadas con polímeros tienen incrementos en la estabilidad de acuerdo a la cantidad y tipo de polímero. En el caso del polímero elastomérico reactivo (RET) se obtuvo un incremento medio de 12.7% en la estabilidad, acorde con el 18.5% obtenido con el mismo polímero RET por Franco et al. (2015).

5.4.2 Análisis y discusión de resultados de parámetros volumétricos Marshall para evaluar la durabilidad (Objetivo Específico 2)

De acuerdo al Instituto del Asfalto en el MS-22 (1992), la durabilidad de las mezclas depende del contenido de asfalto, de la gradación de los agregados (que está relacionada con los vacíos en el agregado), del diseño y del grado de compactación de la mezcla (p.62).

Los parámetros volumétricos considerados en el diseño Marshall son: vacíos de aire, vacíos en el agregado mineral, vacíos llenos de asfalto, contenido de asfalto y densidad. En este ítem, se comparan los parámetros volumétricos de ambas mezclas para evaluar la durabilidad de las mezclas en función de éstos. Se analizan los tres casos de estudio, se saca un resultado final promedio y luego se discuten los resultados con los valores que obtuvieron otros investigadores.

Caso 1. Broncano y Campos (2021). Influencia del AMP con Elvaloy sobre las propiedades de la MAC. Arequipa.

En este caso se trabajó con una mezcla con 60/70 y una sola mezcla modificada con RET. La comparación de los parámetros volumétricos se presenta en la Tabla 43.

Tabla 43

Cuadro Comparativo de Parámetros Volumétricos de MAC. Caso 1

Parámetro	U	Mezcla	Mezcla
Volumétrico		Convencional	Modificada (RET)
Vacíos de aire	%	3.88 %	4.28%
Contenido de asfalto	%	5.03 %	4.4%
Vacíos en el agregado (VMA)	%	16.04%	14.99%
Vacíos llenos de asfalto (VFA)	%	75.8%	71.47%
Densidad (Peso Unitario)	g/cm3	2.42	2.43

Nota: Broncano y Campos (2021)

En este caso, los vacíos de aire aumentaron 10% y VMA disminuyeron 6.5%. El contenido de asfalto bajó 12% y los VFA disminuyeron en 5.7%. Cabe mencionar que el diseño Marshall realizado por los investigadores no se basó en el criterio del 4% de vacíos como lo recomienda el Instituto del Asfalto. (MS-22, 1992, p.81). Sino que, trabajaron con un valor promedio tal como se muestra en la Figura 72.

Figura 72

Cálculo del contenido óptimo de asfalto de las MAC. Caso 1

PROPIEDAD	% ASFALTO
Min. a%	6.77 %
Min. VAM	4.52 %
Max. P.U.	5.42 %
Max Estabilidad	4.50 %
Min. Flujo	3.95 %
PROMEDIO	5.03 %

PROPIEDAD	% ASFALTO
Min. a%	5.66
Min. VAM	3.65
Max. P.U.	4.50
Max Estabilidad	4.60
Min. Flujo	3.50
PROMEDIO	4.40%

Nota. Broncano y Campos (2021)

Usando las gráficas efectuadas por Broncano et al., con el criterio del 4% de vacíos rehacemos el diseño de las MAC. Se obtiene 5% de asfalto para la convencional y 4.5% para la modificada. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 44.

Tabla 44

Parámetros Corregidos de diseño Marshall de las MAC. Caso 1

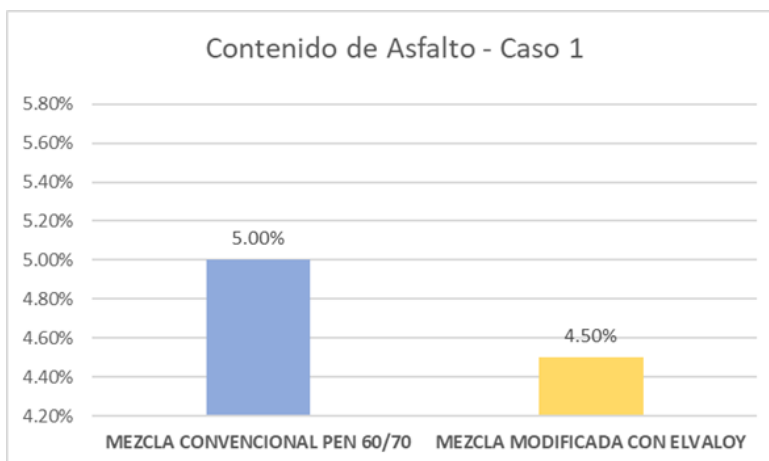
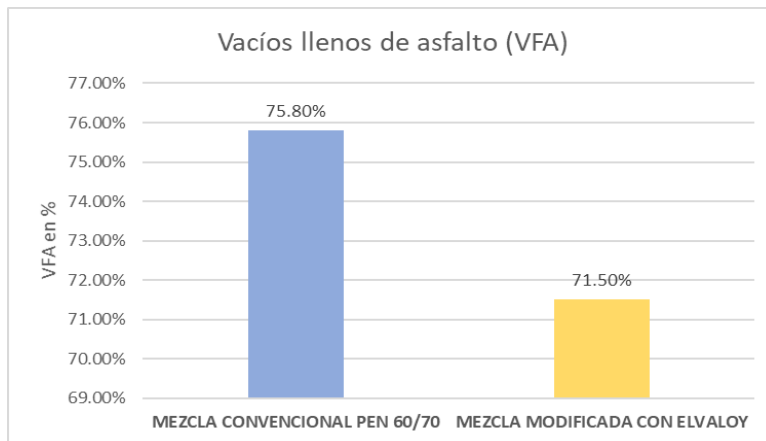
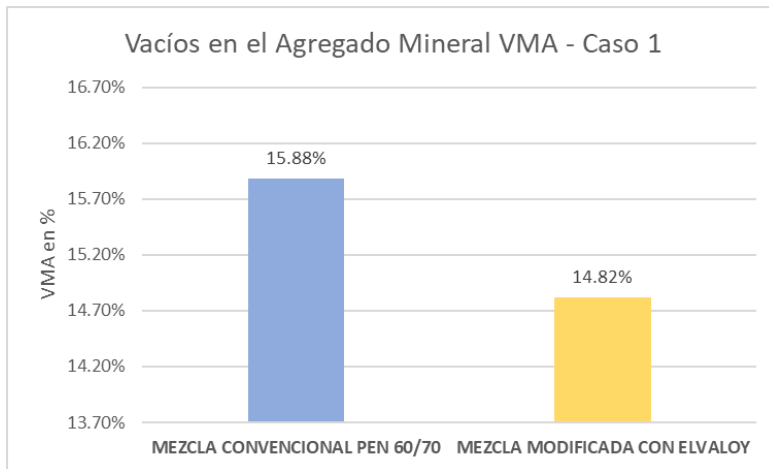
Parámetro de diseño	Convencional	Modificada	Criterio I.A.
	60/70	con Elvaloy	T. Pesado
Vacíos de aire	4.0 %	4.0%	3-5%
Contenido de asfalto	5.0 %	4.5%	
Vacíos en el agregado (VMA)	15.88%	14.82%	13% mín.
Vacíos llenos de asfalto (VFA)	75.8%	71.5%	65-75%
Densidad (Peso Unitario)	2.42	2.435	
Estabilidad (Kg)	1651.2	1816.5	816 mín.
Flujo (mm)	4.0	4.1	2 - 3.5

Nota. Elaboración propia.

Ver variaciones de VMA, VFA y contenido de asfalto en la Figura 73

Figura 73

Variación de VMA, VFA y contenido de asfalto de las MAC. Caso 1.

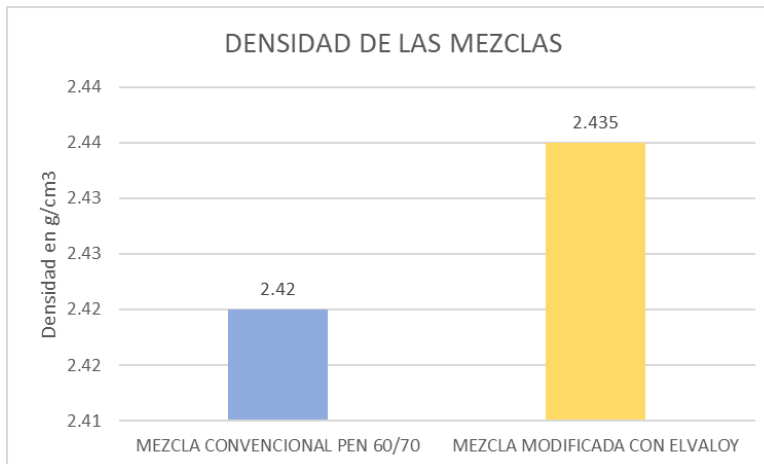


Nota. Elaboración propia.

La variación de la densidad de las mezclas del Caso 1, aunque no es muy significativa, se presenta en la Figura 74.

Figura 74

Variación de la densidad de las MAC. Caso 1



Nota. Elaboración propia.

Según esos valores, los vacíos en el agregado VMA disminuyeron 6.7% y los vacíos llenos de asfalto disminuyeron 5.7%. El contenido de asfalto disminuyó en 10% y la densidad tuvo un ligero aumento de menos de 1%.

En este caso de estudio, de acuerdo al criterio del 4% de vacíos, se obtiene disminución del porcentaje de asfalto, VMA y VFA. Sin embargo, el flujo sí tuvo valores diferentes al diseño inicial. El flujo de la mezcla convencional resultó 4 mm y el de la modificada resultó 4.1 mm, es decir que el flujo aumentó un 2.5% con respecto a la convencional.

Caso 2. Chávez (2019): Mejoramiento del comportamiento mecánico de una MAC con polímero Elvaloy 4170 RET. Lima.

Este caso se experimentó con tres mezclas modificadas con RET, pero se considera sólo la mezcla con el contenido óptimo de polímero, que corresponde a 1.4% de Elvaloy RET, para efectos de comparación con la MAC convencional.

El contenido de asfalto aumentó 5.4%, lo cual es favorable para la durabilidad de la mezcla. Los vacíos de aire se mantuvieron, pero el porcentaje de vacíos llenos de asfalto y también los vacíos en el agregado mineral aumentaron ligeramente. La comparación de los parámetros volumétricos se presenta en la Tabla 45.

Tabla 45

Cuadro Comparativo de Parámetros Volumétricos de las MAC. Caso 2

Parámetro	Mezcla	Mezcla	
Volumétrico	Convencional	Modificada	Variación
	PEN 60/70	1.4% RET	
Vacíos de aire	4.1 %	4.1%	-
Contenido de asfalto	5.5 %	5.8%	+5.4%
Vacíos en el agregado (VMA)	16.3%	16.4%	+0.6%
Vacíos llenos de asfalto (VFA)	74.5%	74.8%	+0.4%
Densidad (Peso Unitario), g/cm ³	2.42	2.43	+0.4%

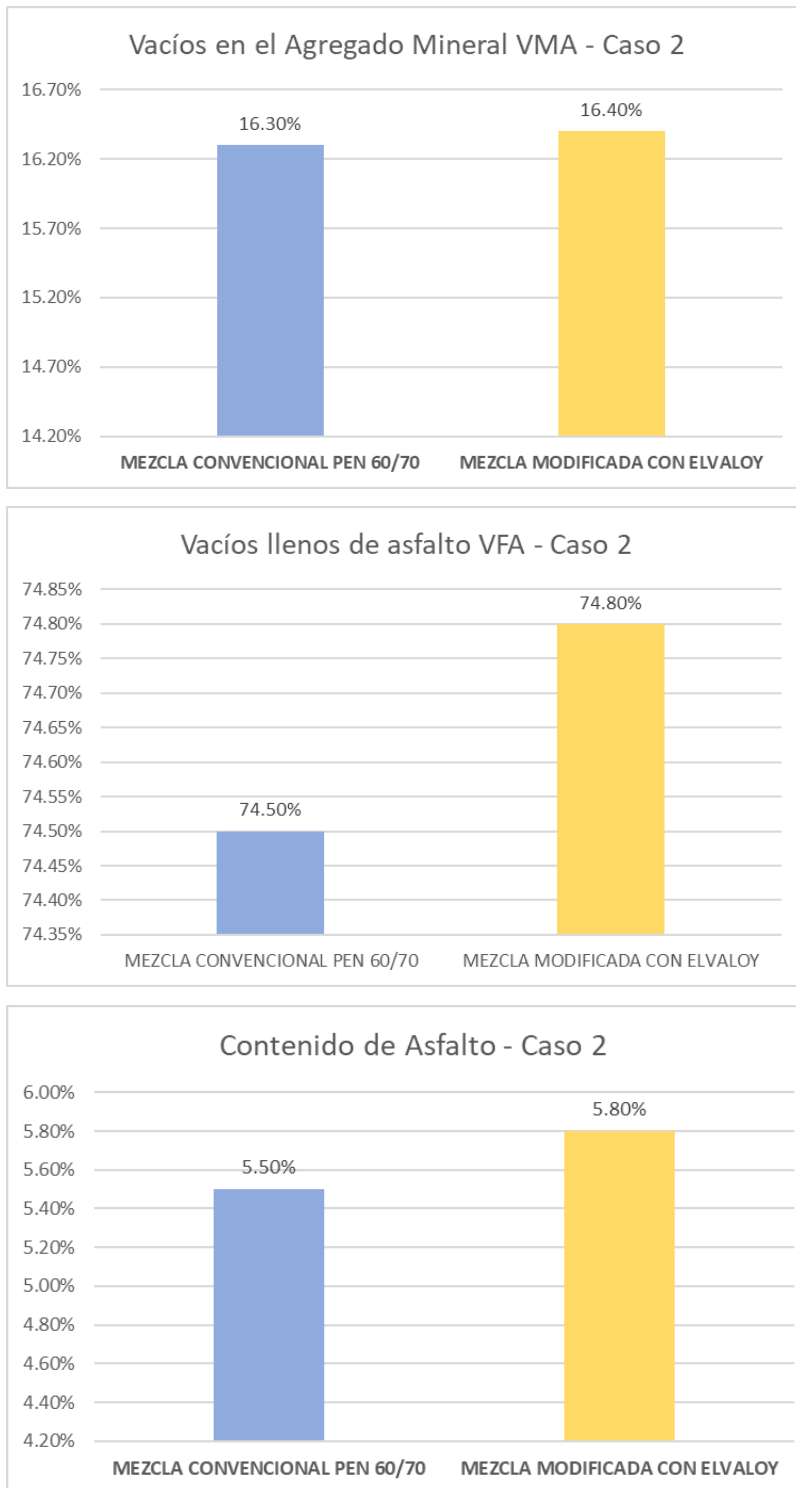
Nota: Elaboración propia.

Datos tomados de los resultados de Chávez (2019).

Se muestran las variaciones en la Figura 75.

Figura 75

Variación de VMA, VFA y % de asfalto de las MAC. Caso 2

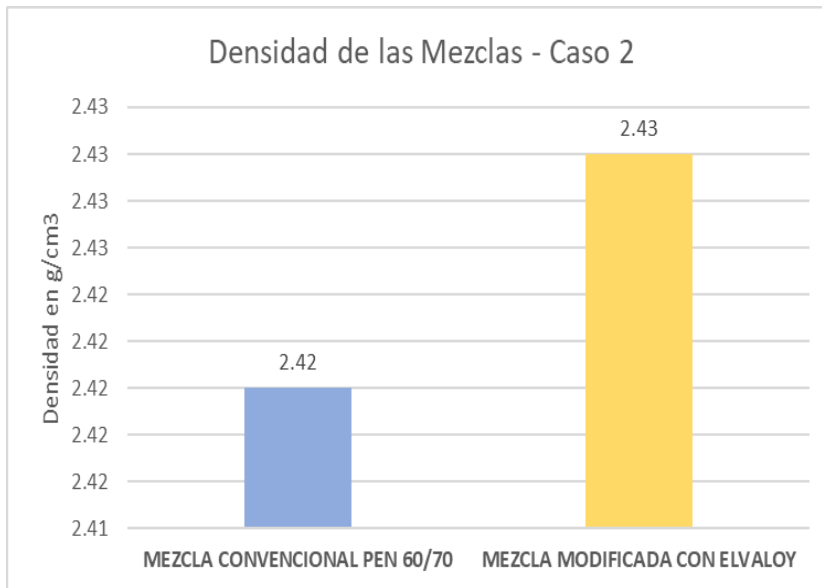


Nota. Elaboración propia.

La densidad de la mezcla también aumentó ligeramente. Ver Figura 76.

Figura 76

Variación de la densidad de las MAC. Caso 2



Nota. Elaboración propia.

Caso 3. López y Puma (2017): Caracterización de MAC elaboradas con AMP con polímeros RET. Quito-Ecuador.

En este caso los investigadores no incluyeron los datos de los parámetros volumétricos, sólo consignaron valores de estabilidad y fluencia, tal como ha sido expuesto en el ítem 5.3.2, Caso 3, Tabla 34.

Cabe mencionar que López y Puma (2017) no hicieron el diseño Marshall de las mezclas modificadas, sino que asumieron el mismo contenido óptimo de asfalto de la MAC convencional y obtuvieron directamente los valores de estabilidad y flujo, por lo cual no tomaron valores de los parámetros volumétricos. Este caso, por tener información incompleta de los parámetros no se toma en cuenta.

Resultado final de los parámetros volumétricos:

Consideramos un valor medio de los casos 1 y 2, ya que el caso 3 no incluyó dicha información, como se indicó anteriormente. Se muestran los resultados finales de los parámetros volumétricos en la Tabla 46.

Tabla 46*Resultado Final de los Parámetros Volumétricos de las MAC*

Parámetro	Mezcla	Mezcla	Variación
Volumétrico	Convencional	Modificada	
	PEN 60/70	con RET	%
Vacíos de aire	4.05 %	4.05%	No varió
Contenido de asfalto	5.25 %	5.15%	- 1.9%
Vacíos en el agregado (VMA)	16.09%	15.61%	- 3.0%
Vacíos llenos de asfalto (VFA)	75.15%	73.15%	- 2.7%
Densidad (Peso Unitario), g/cm ³	2.42	2.43	+ 0.4%

Nota. Elaboración propia.

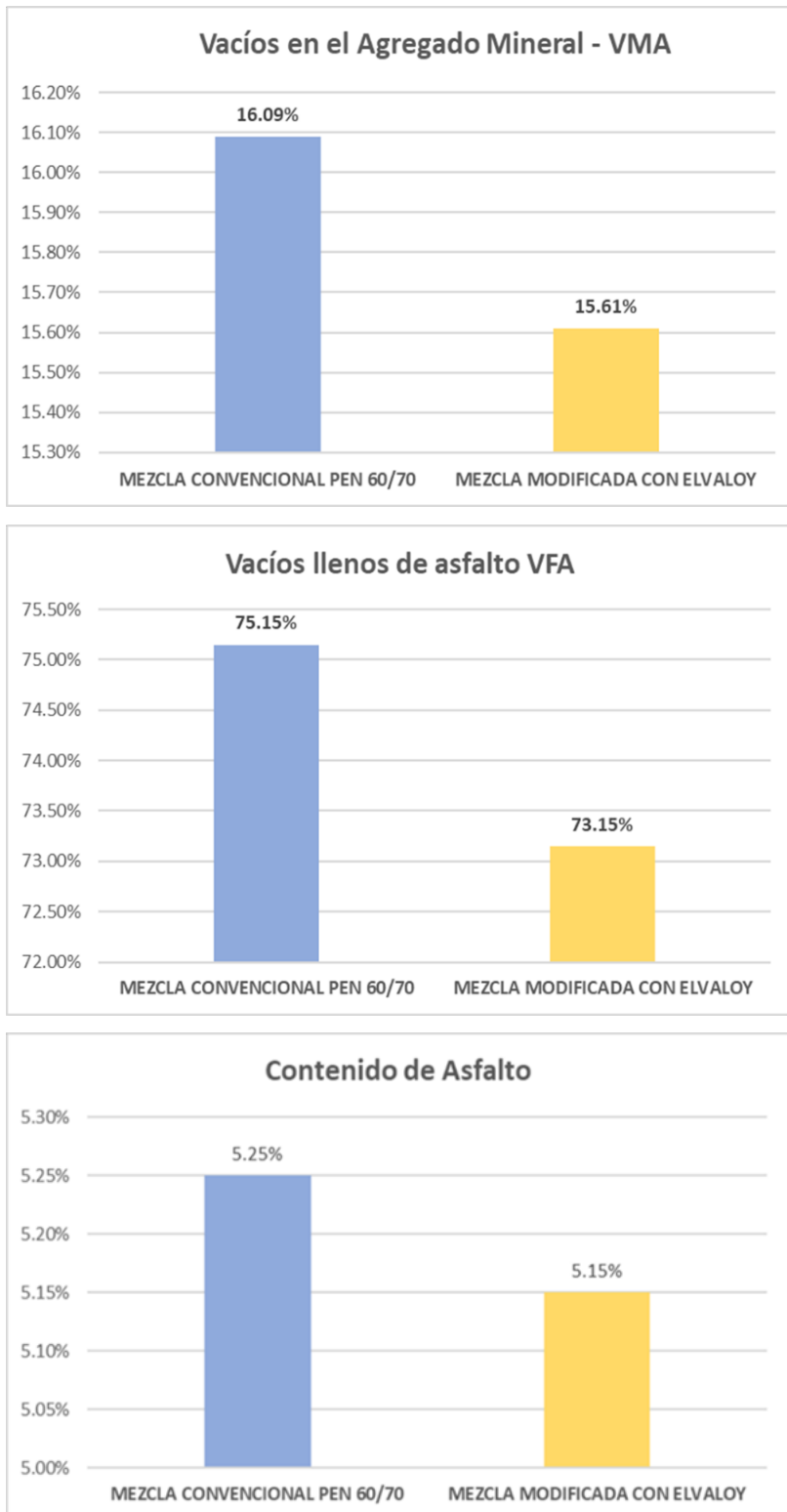
Los vacíos en el agregado (VMA) variaron de 16.09% a 15.61%, es decir disminuyeron 3%. Los vacíos con asfalto (VFA) disminuyeron un 2.7%. El contenido de asfalto varió de 5.25% a 5.15%, es decir disminuyó un 1.9%.

La densidad de la mezcla varió de 2.42 a 2.43 g/cm³, es decir un 0.4%., lo cual no es significativo.

Ver variación de los vacíos y contenido de asfalto en la Figura 77.

Figura 77

Variación de VMA, VFA y % asfalto de las MAC. Final.

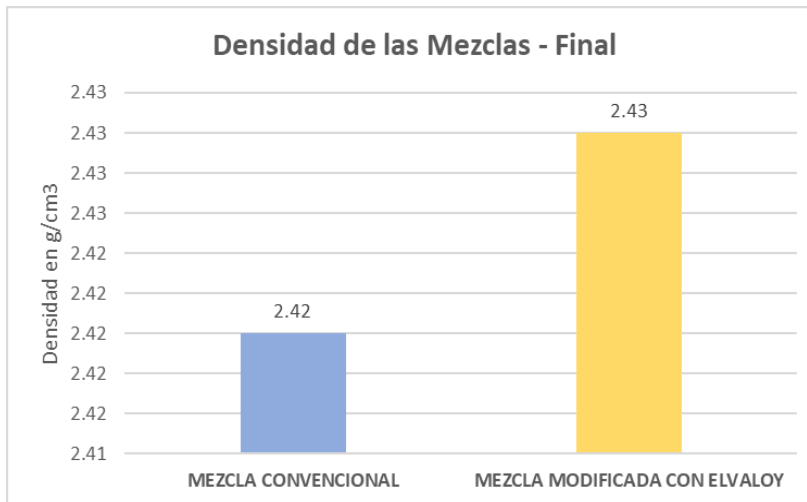


Nota. Elaboración propia.

La variación de la densidad se muestra en la Figura 78.

Figura 78

Variación de densidad de las MAC Convencional y Modificada. Final.



Nota. Elaboración propia.

Discusión de los resultados:

Franco et al. (2015) ensayó una mezcla convencional con PEN 60/70 y otra modificada con Elvaloy. Obtuvieron los parámetros de la Tabla 47.

Tabla 47

Resultados de Parámetros Marshall de Franco et al. (2015)

	Convencional	Modificada	Variación
Vacíos de aire	4.87%	5.0%	+2.7%
VMA	15.35%	15.31%	-0.3%
VFA	68.27%	66.25%	-3%
% Asfalto	4.47%	4.38%	-2%
Peso unitario	2,384	2,382	-0.08%
Estabilidad (Kg)	1,228	1,455	+18.5%
Flujo (mm)	3.0	3.0	no varió

Nota. Franco et al. (2015)

Valdivia (2017) trabajando con mezclas convencional con PEN 60/70 y modificada con SBS obtuvo los parámetros presentados en la Tabla 48.

Tabla 48*Resultados de Parámetros Marshall de Valdivia (2017)*

Parámetro	Convencional	Modificada	Variación
Vacíos de aire	3.9%	3.9%	0%
VMA	17.2%	15.7%	-8.7%
VFA	77.4%	76.1%	-1.7%
% Asfalto	5.6%	5.0%	-10.7%
Peso unitario (g/cm ³)	2,446	2,473	+1.1%
Estabilidad (Kg)	1,389	1,921	+38.3%
Flujo (mm)	3.7	3.6	-2.7%

Nota. Valdivia (2017)

Rosales (2022) estudió mezclas modificadas con polímeros termoplásticos y una convencional con PEN 60/70 en Lima. Obtuvo los parámetros de la Tabla 49.

Tabla 49*Resultados de Parámetros Marshall de Rosales (2022)*

	Convencional 60/70	Modificada 8.5% SBS	Variación
Vacíos de aire	4.0%	3.87%	-3.3%
VMA	17.2%	15.1%	-12.2%
VFA	76.5%	75.5%	-1.3%
% Asfalto	5.5%	5.5%	0%
Peso unitario (g/cm ³)	2,399	2,427	+1.2%
Estabilidad (Kg)	1,242	1,814	+46%
Flujo (mm)	3.6	3.75	+4.2%

Nota. Rosales (2022)

Galindo (2020) evaluó mezclas con asfaltos modificados en México. Utilizó asfalto AC-20 y modificado con Elvaloy 4170 de DuPont. Encontró que las mezclas con terpolímeros Elvaloy RET presentaron contenido de vacíos ligeramente menores que los del asfalto convencional, menos VMA y mayor VFA. Menciona que las mezclas con RET reducen el porcentaje de asfalto con respecto a las convencionales. Encontró que, con el criterio

del 4% de vacíos, el contenido de asfalto de la mezcla con RET fue de 5.8% contra el contenido de 6.3% de la mezcla convencional, es decir disminuyó en un 7.9%. (pp.54-58)

Discusión respecto a la Durabilidad de las mezclas:

En esta investigación, encontramos que los vacíos en el agregado (VMA) de la mezcla modificada disminuyeron 3% (con respecto a la convencional), que es un valor que está de acuerdo a lo obtenido por otros investigadores y que, a la vez, es favorable para la durabilidad de la mezcla, pues el aire no tiene mucho espacio para ingresar y oxidar al asfalto, evitando el rápido endurecimiento del asfalto, la desintegración de la mezcla y el posterior agrietamiento. Esto indica que la durabilidad de la mezcla modificada mejora un 3%, según el criterio de los vacíos en el agregado mineral (VMA).

Además, el Instituto del Asfalto en el MS-22 señala que los factores que inciden en la durabilidad de las mezclas, son el contenido de asfalto, el porcentaje de vacíos (sea por diseño o por compactación) y la calidad de los agregados. Con bajo contenido de asfalto, la película de asfalto envejece rápidamente y se endurece, la mezcla se desintegra perdiendo el agregado. Con altos contenidos de vacíos, el aire oxida al asfalto, envejeciéndolo en forma temprana generando desintegración y luego agrietamiento por fatiga (MS-22, 1992, pp.62-63).

Por otro lado, se obtuvo que, en la mezcla modificada con RET el contenido de asfalto disminuyó 1.9% con respecto a la convencional, valor que comparado con los resultados de los investigadores citados está en el promedio. Pero en la mezcla modificada se usa un asfalto modificado y se está comparando con una mezcla convencional con asfalto puro, por lo que la comparación no sería muy adecuada pues no se trata del mismo asfalto. Incluso, el contenido de asfalto se puede haber reducido, pero se trata de un asfalto mejorado pues ha sido modificado con polímero RET y ha mejorado todas sus características como recuperación elástica, punto de ablandamiento, penetración, viscosidad, etc., lo cual lo hace más rígido y fuerte ante los factores de oxidación y envejecimiento.

Siendo que el diseño Marshall se basa en el criterio del VMA con el propósito de controlar la durabilidad de la mezcla en función del contenido de asfalto, ya que se han cumplido todos los criterios establecidos, inferimos que las mezclas modificadas poseen la propiedad de durabilidad.

Además, como indica el Instituto del Asfalto, en la durabilidad también interviene la calidad de los agregados y del cemento asfáltico, pero éstos han sido evaluados mediante ensayos de caracterización y se ha verificado que cumplen con todos los requisitos de calidad del EG 2013, garantizando la durabilidad de las mezclas. Y como el asfalto modificado es un asfalto mejorado, inferimos que las mezclas modificadas poseen mejores características de durabilidad.

Por lo tanto, las mezclas con polímeros RET mejoran la durabilidad, de acuerdo a lo obtenido en los parámetros volumétricos del diseño Marshall.

5.4.3 Análisis y discusión de resultados del ensayo de la Rueda de Hamburgo para evaluar la susceptibilidad a la deformación permanente (O. Específico 3)

Como ensayo de desempeño se consideró medir la deformación permanente de las mezclas mediante la Rueda de Hamburgo, ya que es una de las fallas que se presenta mayormente en zonas de climas calurosos, zona donde se pretende aplicar esta tecnología. De la misma manera, consideramos un valor promedio de ahuellamiento de los casos de estudio, ya que se han trabajado con el mismo asfalto base y el mismo asfalto modificado, con similar contenido de polímero RET.

Caso 1. Broncano y Campos (2021). Influencia del AMP con Elvaloy sobre las propiedades de la MAC. Arequipa.

En este caso, el ahuellamiento de la mezcla convencional (CAP 60/70) fue 17.2 mm en 10000 ciclos, valor que excede el límite de 12.5 mm reglamentado en el ensayo, pero, con la mezcla modificada con Elvaloy RET no realizaron el ensayo. Sin embargo, los investigadores ensayaron mezclas con SBS y Elvaloy para compararlas con la MAC convencional. Realizaron el ensayo de la rueda cargada con las mezclas modificadas con SBS, obteniendo un ahuellamiento de 7.72 mm para una mezcla con 4.5% de asfalto modificado (contenido óptimo) y 3.74 mm para una mezcla con 5% de asfalto modificado. Ambas con asfalto Betutec IC que es un CAP modificado con SBS, sin indicar el contenido de polímero. De acuerdo a esos valores, se infiere que con más cantidad de asfalto modificado (con SBS) el ahuellamiento es menor (pp. 217-219).

Por otro lado, comparando ambas mezclas modificadas con el contenido óptimo de asfalto, se tiene que la mezcla con Elvaloy alcanzó el 95.6% de la estabilidad de la mezcla

con SBS. Entonces, podríamos decir que la mezcla con Elvaloy tiene una resistencia igual al 95% de la mezcla con SBS y, por lo tanto, podríamos inferir que tendrá un ahuellamiento 5% mayor que el que experimentó la mezcla con SBS. Por este motivo, estimamos que podemos considerar el valor del ahuellamiento como $(7.72 + 5\%)$, es decir 8.11, como el ahuellamiento (en milímetros) que podría haber tenido la mezcla modificada con Elvaloy RET. Se tiene entonces para el Caso 1 que el ahuellamiento varió de 17.23 a 8.11 mm, disminuyendo un 52.9%.

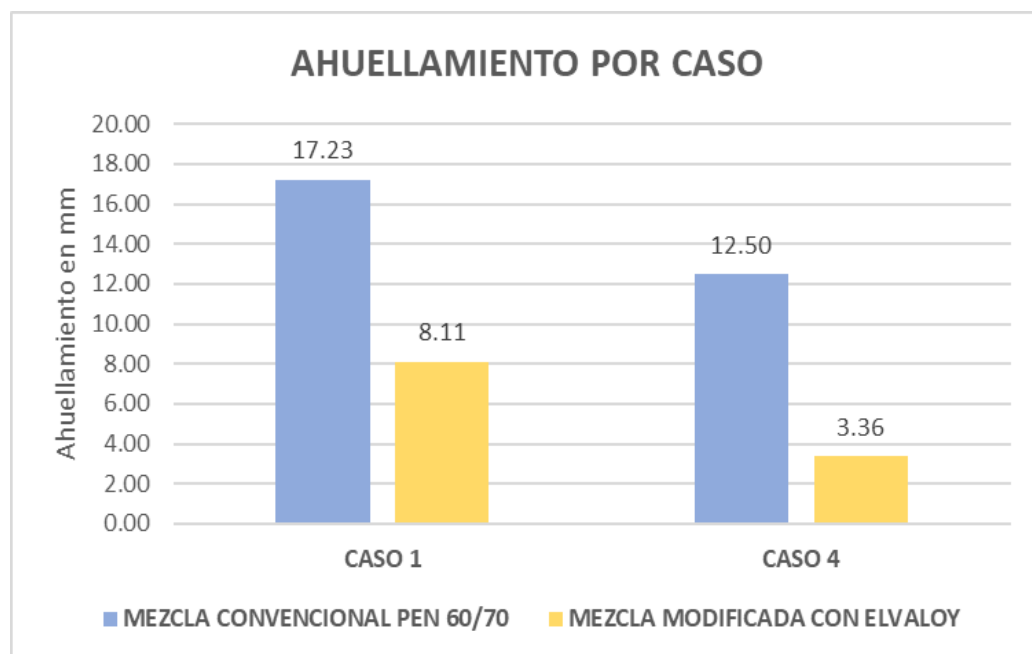
Caso 4. Flores, Delgado y Gómez (2018): Evaluación del desempeño de MAC con la rueda cargada de Hamburgo. México.

De la Tabla 36, tomamos el valor del ahuellamiento de la mezcla modificada con Elvaloy, y para la mezcla convencional tomamos el valor máximo de 12.5 mm, que es el ahuellamiento que sufren normalmente las mezclas convencionales.

Presentamos los casos del ahuellamiento de las mezclas convencionales y modificadas con Elvaloy RET en la Figura 79.

Figura 79

Resultado de la Deformación Permanente (Ahuellamiento) por Caso



Nota. Elaboración propia

Resultado final de los valores de ahuellamiento:

Consideramos un valor medio de los casos 1 y 4. Presentamos la comparación de los resultados del ensayo en la Tabla 50.

Tabla 50

Cuadro Comparativo de la Deformación Permanente de las MAC

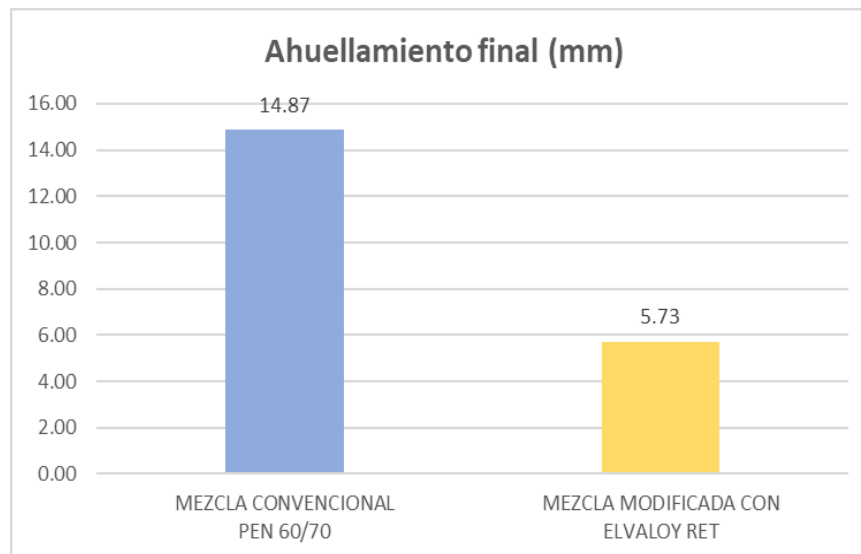
Deformación Permanente	Mezcla Convencional	Mezcla Modificada
Ahuellamiento (mm)	14.87	5.73

Nota. Elaboración propia.

Los resultados finales del ahuellamiento medio los presentamos en la Figura 80.

Figura 80

Resultado Final de la Deformación Permanente (Ahuellamiento)



Nota. Elaboración propia.

Con el ensayo de la Rueda de Hamburgo se evidencia que el valor de la deformación permanente (ahuellamiento) de la mezcla se redujo considerablemente, de 14.87 mm a 5.73 mm, es decir disminuyó en 61.5%, lo cual indica que la mezcla modificada con polímero RET es mucho más resistente al ahuellamiento que la convencional, con una mejora del orden de 62% de resistencia a la deformación permanente.

Discusión de los resultados:

Rosales (2022) en su investigación sobre mezclas modificadas con polímeros termoplásticos evaluó la resistencia al ahuellamiento de estas mezclas y la de una mezcla convencional con PEN 60/70 en Lima. Obtuvo una profundidad de huella de 12.5 mm con 14,010 pasadas de la rueda cargada a 50°C. (p.100)

Villafana y Ramírez (2019) trabajaron con una mezcla convencional con PEN 60/70 y una modificada con Betutec IC (SBS). Obtuvieron un ahuellamiento de 7.77 mm y de 1.8 mm respectivamente, ambas mezclas a las 20,000 pasadas. (p.98)

Contreras y Mamani (2019) trabajaron con una MAC convencional con asfalto 120/150 y obtuvo una profundidad de huella de 12.5 mm para 20,00 pasadas (p.76)

Corbacho (2019) en su investigación analizó la deformación permanente en mezclas en el Cusco. Experimentó con una mezcla asfáltica convencional con PEN 120/150, la cual obtuvo una profundidad de huella de 12.5 mm a 6,166 pasadas. (p.98)

Estrada (2017) en su tesis en el Cusco, experimentó con una mezcla convencional con PEN 120/150 obteniendo una profundidad de huella de 12.5 mm a las 15,631 pasadas. Para la mezcla modificada con polímero tipo SBS (Asfalto PG 70-28) obtuvo un ahuellamiento de 3.79 mm a las 20,000 pasadas. (p.150)

De estos resultados se deduce que las mezclas convencionales, sean con asfalto 60/70 o 120/150, generalmente alcanzan un ahuellamiento de 12.5 mm incluso antes de las 20,000 pasadas de la rueda cargada. Y las mezclas modificadas a las 20,000 pasadas de la rueda tienen un ahuellamiento menor a los 12.5 mm. Por lo tanto, los resultados obtenidos en este estudio están de acuerdo con otras investigaciones.

Considerando que el ahuellamiento es una medida de la susceptibilidad a la deformación permanente, podremos decir que las mezclas con polímero RET son 61.5% menos susceptibles a la deformación permanente.

5.5 Contrastación de Hipótesis

5.5.1 Hipótesis Especifica 1

Las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos mejorarán la estabilidad, en zonas de climas cálidos. Evaluamos la estabilidad, que es una medida de la resistencia de las mezclas, mediante los parámetros mecánicos de estabilidad y flujo Marshall, obtenidos en el ensayo respectivo.

Hipótesis Alterna 1 (Hi1): Las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos mejorarán la estabilidad.

Hipótesis Nula (H01): Las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos no mejorarán la estabilidad.

De acuerdo a los resultados finales promedio de los parámetros mecánicos de las mezclas modificadas en comparación con las mezclas convencionales, se obtuvo un incremento medio de 12.7% en la estabilidad y 26.5% en el flujo. Incluso, la estabilidad incrementó desde 8.5%, en el caso 1, luego 10.2% en el caso 2 y hasta 18.8% en el caso 3.

Por otro lado, es necesario mencionar que en el caso 1 se utilizó un asfalto modificado Betutec IC con Elvaloy (Broncano et al., 2021, p.257) sin indicar el porcentaje de polímero utilizado, por lo que podemos desestimar el incremento de 8.5% de este caso, ya que no contiene únicamente polímero RET, sino que contiene también otro polímero bajo la denominación de Betutec, como se ha especificado en los anexos de la investigación.

Entonces, considerando los resultados del caso 2 (que utilizó 1.4% de Elvaloy RET) y del caso 3 (que utilizó 1.3% de RET), la estabilidad incrementó entre 10.2% y 18.8%, es decir un 14.5% en promedio.

Según la discusión de los resultados, Franco et al. (2015) que experimentó con una mezcla modificada con 1.3% de Elvaloy 4170 RET, obtuvo también un incremento de 18.5% en la estabilidad en comparación con una mezcla convencional con asfalto PEN 60/70 en Colombia (p.83). Otros investigadores han obtenido valores superiores de incremento de la estabilidad con otros polímeros.

Por lo que, se concluye que la estabilidad de las mezclas modificadas con polímero elastomérico reactivo (RET) aumenta en 14.5% como una medida de la resistencia de las mismas. Se demuestra entonces, que las mezclas con polímeros elastoméricos reactivos mejoran su estabilidad, por lo que se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula.

5.5.2 *Hipótesis Específica 2*

Las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos mejorarán la durabilidad, en zonas de climas cálidos, año 2023. Relacionamos la durabilidad con los parámetros volumétricos de las mezclas, medidos mediante la metodología Marshall.

Hipótesis Alterna 2 (Hi2): Las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos mejorarán la durabilidad.

Hipótesis Nula (H02): Las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos no mejorarán la durabilidad.

De acuerdo a los ensayos Marshall, se hizo la comparación de los parámetros volumétricos de ambas mezclas para inferir propiedades de durabilidad de las mismas. El contenido de vacíos de aire es un parámetro estable, ya que el diseño Marshall se inicia fijando un porcentaje de vacíos de 4%. El resto de parámetros volumétricos han cumplido con todos los criterios propuestos por el Instituto del Asfalto y han mejorado de 2 a 3%. El porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA) ha mejorado un 3%, haciéndole frente a la oxidación, endurecimiento y envejecimiento del asfalto, lo cual ayuda a que no se desprenda el agregado y no se produzca desintegración de la mezcla. Por esto, se infiere que la propiedad de durabilidad de las mezclas modificadas mejora por lo menos un 3%.

Adicionalmente, el asfalto empleado para las mezclas modificadas es un asfalto modificado con polímero RET con características mejoradas con incremento en su rigidez debido a una disminución de la penetración, incremento de la viscosidad, mejora en la recuperación elástica, incremento del punto de ablandamiento, etc., lo que lo hace más rígido y fuerte brindándole mejores propiedades de durabilidad a la mezcla. Por lo tanto, se puede inferir que la durabilidad de las mezclas modificadas mejora de 3% a más.

Además, otros investigadores evaluaron otras propiedades, como la adherencia y resistencia a la fatiga. Chen Tan (2018) de Costa Rica, experimentó con tres polímeros (SBS, SBR y RET) y varios tipos de agregados. Concluyó que la mejor adherencia con cualquier tipo de agregado la obtuvo el polímero RET. Este resultado indica que las mezclas modificadas con RET tienen mayor adhesividad, lo cual es muy favorable para la durabilidad de una mezcla.

Hernández (2019) evaluó el daño por fatiga en tres tipos de mezclas modificadas (una con PPA, otra con SBS y otra con RET) y concluyó que la mezcla con RET tuvo la mejor resistencia al daño por fatiga y las simulaciones del comportamiento de una sección de

pavimento le indicaron que la fisuración de la mezcla con RET comenzaría a los 10 años (p.144). Esto indica que las mezclas con RET tienen mejoras en la durabilidad de los pavimentos.

Geçkil (2019) estudió las propiedades reológicas del ligante con Elvaloy (RET). Concluyó que los asfaltos modificados con Elvaloy RET se comportan como una fase homogénea y que son más rígidos que los convencionales, con mejor capacidad ante el envejecimiento y menor sensibilidad térmica. Además, resultaron más resistentes al ahuellamiento y a la fisuración por fatiga. Esto indicaría que las mezclas con RET tienen mejoras en la durabilidad.

Ya que la durabilidad en las mezclas modificadas con RET ha obtenido mejoras de 3% a más, se rechaza la hipótesis nula. Entonces, se acepta la hipótesis alterna que señala que las mezclas con polímeros elastoméricos reactivos (RET) mejorarán la durabilidad.

5.5.3 Hipótesis Específica 3

Las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos mejorarán la susceptibilidad a la deformación permanente, en zonas de climas cálidos. Esta susceptibilidad ha sido evaluada con la medida de la deformación permanente por ahuellamiento, mediante el ensayo de la rueda de Hamburgo.

Hipótesis Alterna 3 (Hi3): Las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos mejorarán la susceptibilidad a la deformación permanente.

Hipótesis Nula (H03): Las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos no mejorarán la susceptibilidad a la deformación permanente.

De acuerdo a los resultados de los casos de estudio, se obtuvo que las mezclas modificadas con RET tuvieron una deformación permanente 61.5% menor.

Por otro lado, en la discusión de resultados se mencionó que generalmente las mezclas convencionales llegan al ahuellamiento máximo de 12.5 mm incluso antes de los 20000 ciclos de carga, mientras que las mezclas modificadas con cualquier tipo de polímero experimentan ahuellamientos mucho menores, desde 3 mm hasta 6 mm, es decir que tienen un ahuellamiento entre 52% y 76% menor.

El valor de ahuellamiento obtenido para las mezclas con polímero RET está dentro de lo esperado para cualquier mezcla modificada, es decir que estas mezclas con polímeros RET son 61.5% menos susceptibles a la deformación permanente.

Adicionalmente a esto, en una investigación realizada por el Instituto Mexicano del Transporte, se encontró que los resultados del ensayo de la rueda cargada de Hamburgo en mezclas asfálticas son sensibles a la calidad de los agregados, filler, rigidez del asfalto, envejecimiento, aditivos promotores de adherencia y temperaturas de compactación (Flores et al., 2018, p.1). Siendo el RET un polímero que aumenta la rigidez del asfalto, esto agrega resistencia ante el ahuellamiento. Además, se ha encontrado que los vacíos en el agregado mineral en este tipo de mezcla modificada con RET disminuyeron, lo cual es una ayuda contra el envejecimiento y la disgregación, pues evita la oxidación prematura del asfalto. Por lo tanto, controlando la calidad de los agregados y los procesos de compactación, podemos decir que una mezcla modificada con polímero RET va a tener buena resistencia ante el ahuellamiento.

Huamán (2016) en su artículo sobre la deformación permanente en mezclas asfálticas y deterioro de pavimentos en Perú, sostiene que el comportamiento de las mezclas respecto a la deformación permanente depende del tipo de asfalto que se utilice, del diseño de mezcla (composición), forma y tamaño de las partículas de los áridos, calidad de los agregados y utilización de aditivos (p.26). Esto coincide con lo que encontró la investigación del Instituto Mexicano del Transporte citada anteriormente. Entonces, por lo expuesto en el párrafo anterior se infiere que una mezcla modificada va a tener un mejor comportamiento ante el ahuellamiento que una convencional.

Como se obtuvo una mejora del orden del 61.5% en la resistencia al ahuellamiento, esto indica que, las mezclas con polímeros elastoméricos reactivos mejoran la susceptibilidad a la deformación permanente. Entonces, se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula.

CONCLUSIONES

1. De acuerdo a lo obtenido en cada objetivo específico con mejoras en la estabilidad (medida de la resistencia), mejora de la durabilidad y mejoras en la susceptibilidad a la deformación permanente (referida al ahuellamiento), se concluye que las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos (RET) mejoran sus propiedades mecánicas, para ser aplicadas en zonas de climas cálidos.

2. De acuerdo a los resultados de los parámetros mecánicos, las mezclas con polímeros elastoméricos reactivos tuvieron un incremento de 14.5% en la estabilidad y 26% en el flujo; por lo que, se concluye que las mezclas modificadas con polímero elastomérico reactivo (RET) mejoran sus propiedades mecánicas relativas a la estabilidad.

3. Según el análisis de los parámetros volumétricos de la metodología Marshall se obtuvo que las mezclas modificadas con polímero RET mejoran su durabilidad pues tuvieron un incremento de 3% en esta propiedad, además de que los parámetros Marshall cumplen con todos los criterios de diseño del Instituto del Asfalto y los materiales cumplen con todos los requisitos de calidad normados por las EG 2013.

El asfalto empleado en las mezclas es un asfalto modificado con polímero RET, el cual tiene un incremento en su rigidez expresado en una disminución de la penetración y una mejora en todas sus características como recuperación elástica, viscosidad, punto de ablandamiento, estabilidad al almacenamiento, lo cual se traduce en una mejora de la durabilidad de la mezcla.

4. El ahuellamiento en la mezcla modificada disminuyó en 61% con respecto al de la mezcla convencional, por lo tanto, la mezcla modificada tiene menos susceptibilidad a la deformación permanente; es decir que, las mezclas asfálticas en caliente con RET tienen mejor comportamiento ante la deformación permanente. Por lo tanto, se concluye que, las mezclas asfálticas con polímeros RET tienen una mejora de 61% en sus propiedades mecánicas referidas a la resistencia ante la deformación permanente.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda incorporar polímeros reactivos como Elvaloy RET para obtener una mejora en las propiedades mecánicas de cualquier tipo de mezcla modificada o que contenga alguna adición, sobre todo en el caso de mezclas con materiales plásticos reciclados u otro material reciclado como aceite reusado de cocina, etc. Esta afirmación nace de la revisión de documentos científicos donde se encontró que, generalmente se usa el RET en mezclas con materiales reciclados.
2. Recomendamos usar polímeros reactivos para mejorar el comportamiento de otros modificadores ante situaciones especiales que deben ser primero evaluadas mediante ensayos de desempeño. Se recomienda usarlo, sobre todo, para mejorar la estabilidad al almacenamiento de las mezclas modificadas. Se ha encontrado que generalmente, se usa el RET para mejorar asfaltos ya modificados con SBS u otro polímero, pues con poco porcentaje de RET se ahorra contenido del polímero principal y a la vez mejora sus condiciones de almacenamiento.
3. Recomendamos, en general, seguir realizando investigaciones sobre polímeros para conocer todos los tipos disponibles en la actualidad, sus ventajas y desventajas, casos específicos de aplicación, etc. Se sugiere que tanto las universidades como los organismos estatales puedan apoyar a los investigadores, ya que se necesita realizar ensayos especializados que tienen costos elevados en las empresas privadas.
4. Los polímeros RET tienen riesgo de formación de gel, por lo que se recomienda no usar contenidos mayores a 1.6%, que dependerá también del asfalto base utilizado y del proceso de modificación.
5. Se recomienda, antes de considerar un polímero para modificar un asfalto, hacer un estudio de todas las propiedades que se van a modificar, incluso hacer una revisión de la literatura científica. En este caso particular, el polímero elastomérico reactivo (RET), tiene muchas veces un comportamiento similar al de un plastómero, por esto, en muchos documentos científicos se les denomina actualmente “terpolímero reactivo de etileno”, para seguir usando la sigla RET, y en otros, simplemente “terpolímero reactivo”, evitando la denominación elastomérico otorgada por los fabricantes.

REFERENCIAS

- Alarcón, D. y Cárdenas, M. (2021). *Mezcla asfáltica modificada con polímeros SBS para la optimización de las propiedades de la mezcla asfáltica* [Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma, Lima-Perú].
- Alfaro, D. y Jáuregui, D. (2022). *Uso de mejoradores de adherencia en mezclas asfálticas modificadas para mitigar la deformación permanente inducida por la humedad* [Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma, Lima-Perú].
- Arellano, L. y Cáceres, C. (2018). *Importancia de la evaluación a las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente a más de 3000 msnm para el proyecto carretera desvío Imperial – Pampas* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima-Perú].
- Artemisa. Universidad del Cauca (s.f.). *Terpolímero elastomérico reactivo de etileno (TERE). Modificador de asfalto reactivo*. Popayán, Colombia. http://artemisa.unicauca.edu.co/~sicolpav/PonenciasPDF/G_Terpolimero_Felipe.PDF
- Asphalt Institute (1991). *Thickness Design. Asphalt Pavements for Highways & Streets. Manual Series No. 1 (MS-1)*. Lexington, Kentucky-USA.
- Balbín, M. y Enríquez, R. (2020). *Influencia de la mezcla asfáltica modificada con polímeros en zonas cálidas de Perú* [Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma, Lima-Perú].
- Bariani, L., Goretti, L., Pereira, J. y Barbosa, J. (2010). *Pavimentação asfáltica. Formação básica para engenheiros*. PETROBRAS: ABEDA.
- Broncano, J. y Campos, D. (2021). *Influencia del cemento asfáltico modificado con polímeros SBS y ELVALOY sobre las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, Arequipa-Perú].
- Bustos, H., Sosa, P., Rodríguez, N. y Calderón, J. (2018). Fundamentos Micro y Macroscópicos de la Modificación del Asfalto Convencional con Polímeros: Una Revisión. *Inventum*, 13(24), 58-77.
<https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.13.24.2018.58-77>
- Castro, W., Rondón, H., y Barrero, J. (2016). Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con un desecho de PEBD. *Ingeniería*, 21(1), 7-18.

<https://www.redalyc.org/pdf/4988/498853952002.pdf>

- Ccora, T. (2020). *Diseño de asfalto modificado con polímeros SBS para mejoramiento vial en la ciudad de Huancayo* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana Los Andes, Huancayo-Perú].
- Chávez, L. (2019). *Mejoramiento del comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica convencional adicionando polímeros Elvaloy 4170 RET para la Av. José Granda, distrito de San Martín de Porres, Lima 2019* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo, Lima-Perú].
- Chen Tan, M. (2018). *Determinación de la propiedad de adhesión de asfaltos modificados con distintos tipos de polímeros en diferentes agregados y acondicionamiento, utilizando las técnicas de ensayo de Adherencia de Bitumen y Goniometría* [Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica, San José-Costa Rica].
- Contreras, C. y Mamani, D. (2019). *Reducción de la deformación permanente en pavimentos diseñados con mezclas asfálticas en caliente a través de la incorporación de polvo de caucho proveniente de neumáticos usados* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima-Perú].
- Corbacho, J. (2019). *Análisis de la estabilidad Marshall y la deformación permanente mediante el ensayo de Rueda cargada de Hamburgo de una mezcla asfáltica modificada en caliente con fibras de tereftalato de polietileno reciclado en la ciudad del Cusco* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional San Antonio Abad, Cusco-Perú].
- Da Silva, G. y Morales, A. (2017). Modification of thermal and rheological behavior of asphalt binder by the addition of an ethylene-methyl acrylate-glycidyl methacrylate terpolymer and polyphosphoric acid. *Polímeros*, 27(4), 298-308. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.2460>
- Dow (2020). *Hoja de Datos Técnicos para Asfalto de ELVALOY™ 4170 Copolímero*. <https://www.dow.com/documents/es-es/productdatasheet/914/914-134-05-elvaloy-4170-copolymer.pdf>
- Estrada, V. (2017). *Estudio y Análisis de desempeño de mezcla asfáltica convencional PEN 85/100 Plus y mezcla asfáltica modificada con polímero tipo SBS PG 70-28* [Tesis de pregrado, Universidad Andina del Cusco, Cusco-Perú].
- Franco, M., León H. y Ruiz J. E. (2015). *Estudio de la incidencia del Elvaloy en las propiedades reológicas del concreto asfáltico y del asfalto de la Planta de*

- Barrancabermeja* [Tesis de especialización, Universidad Católica de Colombia, Bogotá-Colombia].
- Frangie, M. (2018). Control de producción de mezclas asfálticas calientes. [Práctica Supervisada, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba-Argentina].
- Flores, M., Delgado, H. y Gómez, J. (2018). Evaluación del desempeño de mezclas asfálticas con la rueda cargada de Hamburgo. Publicación Técnica No. 568 Sanfandila, Querétaro, *Instituto Mexicano del Transporte*. ISSN 0188-7297
- Galindo, A. (2020). *Evaluación de mezclas asfálticas mediante tensión indirecta y resistencia al desgaste empleando asfaltos modificados* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua-México].
- Garnica, P., Delgado, H. y Sandoval, C. (2005). Análisis Comparativo de los Métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas. *Publicación Técnica No 271, Instituto Mexicano del Transporte*. ISSN 0188-7297
- Geçkil, T. (2019). Physical, Chemical, Microstructural and Rheological Properties of Reactive Terpolymer-Modified Bitumen. *Materials*, 12 (921), 1-21. doi:10.3390/ma12060921-
- Geçkil, T. & Seloglu, M. (2018). Performance properties of asphalt modified with reactive terpolymer. *Construction and Building Materials*, 173, 262-271. ISSN 0950-0618.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.036>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818308262>
- Guerrero, E. (2019). *Influencia de la temperatura y el tiempo de mezclado en la modificación de un cemento asfáltico* [Tesis de maestría, Universidad Santo Tomás, Bogotá-Colombia].
- Hernández, N. (2019). *Modelo simplificado de daño viscoelástico continuo aplicado al análisis de mezclas asfálticas* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, México].
- Hernández, M., Fernández C. y Baptista P. (2014). *Metodología de la Investigación*. McGraw Hill Education.
- Herrera, J. y Valencia, A. (2021). *Mezcla asfáltica modificada con PET. Características que aporta el PET (Polietileno Tereftalato) en la mezcla de asfalto* [Tesis de grado, Universidad Católica de Colombia, Bogotá-Colombia].

- Huamán, N. y Chang, C. (2016). La deformación permanente en las mezclas asfálticas y el consecuente deterioro de los pavimentos asfálticos en el Perú. *Perfiles De Ingeniería*, 11(11).
https://doi.org/10.31381/perfiles_ingenieria.v2i11.402
- Huamán, N. (2022). *Pavimentos. Apuntes de clase del Curso de Pavimentos*. Universidad Ricardo Palma, Lima-Perú.
- Huari, R. (2020). *Análisis y Evaluación del desempeño de una mezcla asfáltica en caliente con RAP y una mezcla asfáltica modificada con polímero SBS PG 70-28* [Tesis de grado, Universidad Ricardo Palma, Lima-Perú].
- Huillcapoma, L. y Figueroa, J. (2022). *Propiedades de la mezcla asfáltica y su incidencia en el ahuellamiento* [Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma, Lima-Perú].
- Ibáñez, W. (2015). *Uso de polímeros en un nuevo diseño para mejorar las propiedades físico-mecánicas del asfalto: Contribución para el tramo de la Carretera Chilete-Cajamarca* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca-Perú].
- Instituto del Asfalto (1992). *Serie de Manuales No. 22 (MS-22) Principios de construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente*. FHWA.
- Jara, J. y Machado, S. (2020). *Análisis comparativo entre mezclas asfálticas en caliente modificadas con poli aluminio y mezcla convencional* [Tesis de pregrado, Universidad Central del Ecuador, Quito-Ecuador].
- Joohari, I., Maniam, S. y Giustozzi, F. (2022). Enhancing the Storage Stability of SBS-Plastic Waste Modified Bitumen using Reactive Elastomeric Terpolymer. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 16, 304–318.
<https://doi.org/10.1007/s42947-021-00132-z>
- Kaa, B., Mogoruzza, R. y Anguizola, I. (2016). Análisis de propiedades de mezclas asfálticas modificadas en Panamá. *Revista de Iniciación Científica*, 2(1), 1-6.
<https://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/download/600/html?inline=1>
- Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. Universidad de Costa Rica. Lanamme UCR. (2019). *Catálogo de Ensayo de Materiales para Pavimentos*. Centro de Transferencia Tecnológica.
- López, D. y Puma, C. (2017). *Caracterización de mezclas asfálticas en caliente elaboradas con cemento asfáltico modificado con polímeros SBS y RET, mediante la determinación del módulo de rigidez* [Tesis de pregrado, Universidad Central del Ecuador, Quito- Ecuador].

- Martínez, C. (2021). *Revisión Teórica de las mezclas asfálticas modificadas con polímeros en Colombia* [Tesis de grado, Universidad Santo Tomás, Villavicencio-Colombia].
- Maza, G. y Vivas, R. (2022). *Comportamiento de un Slurry Seal con la inclusión de fibra de vidrio* [Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma, Lima-Perú].
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013). *Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales Para Construcción (EG-2013)*.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2016). *Manual de Ensayo de Materiales. (EM 2016)*.
- Montejo, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*. Universidad Católica de Colombia Ediciones y Publicaciones.
- Morea, F. (2011). *Deformaciones Permanentes en Mezclas Asfálticas. Efecto de la reología de los asfaltos, la temperatura y las condiciones de carga* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de la Plata, La Plata-Argentina].
- Múnera, J. (2012). *Modificación Polimérica de Asfaltos* [Tesis de grado, Universidad EAFIT, Medellín-Colombia].
- Münkel, M., Baldi, A., Aguiar, J., Villegas, E. y Hernández, N. (2021). Efecto de polímeros y aceite de cocina en el rango de desempeño del asfalto. *Infraestructura Vial*, 23(42), 71-81.
<https://dx.doi.org/10.15517/iv.v23i42.47587>
- Palma, C., Ortiz, J., Avalos, F. y Castañeda, A. (2015). Modificación de asfalto con elastómeros para su uso en pavimentos. *Revistes Catalanes. AFINIDAD LXXIII*, 574, 119-124.
<https://core.ac.uk/download/pdf/45665856.pdf>
- Pay, P. (2017). *Effect of polymer modified bitumen on deformation characteristics of low-traffic asphalt pavements* [Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim-Norway].
https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2451318/17411_FULLTEXT.pdf?sequence=1
- Petróleos del Perú S.A. Petroperú Asfaltos. (2023). *Descripción y principales constituyentes*. Lima, Perú.
<https://asfaltos.petroperu.com.pe/descripcion-asfaltos.php>

- Pfeiff, C., Kroger, I. y Ferrín, L. (2019). *Análisis Comparativo del Desempeño de Cementos Asfálticos altamente modificados*. XX Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto (CILA). Guadalajara, México.
<https://www.researchgate.net/publication/346650525>
- Polacco, G., Filippi, S., Merusi, F. & Stastna, G. (2015). A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/ polymer interactions and principles of compatibility. *Advances in Colloid and Interface Science*, 224, 72-112.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2015.07.010>
- Quispe, G. (2022) *Desempeño óptimo de una mezcla asfáltica en caliente modificada con Polímero Styrene Butadiene Styrene*. [Tesis de maestría, Universidad Ricardo Palma, Lima-Perú].
- Rondón, H. y Reyes, F. (2015). *Pavimentos. Materiales, construcción y diseño*. ECOE Ediciones.
- Rosales, T. (2022). *Mezcla asfáltica altamente modificada con polímeros elastómero termoplástico sintético para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas* [Tesis de maestría, Universidad Ricardo Palma, Lima-Perú].
- Rubio, J. y Moreno, H. (2017). *Evaluación del Módulo Resiliente de una mezcla asfáltica (MDC-19) con adición de concreto hidráulico reciclado* [Tesis de pregrado, Universidad La Gran Colombia, Bogotá-Colombia].
- Salazar, J., Aguiar, J., Rodríguez, E. y Loría, L. (2017). *Cuantificación del modificante en un asfalto modificado con polímero tipo SBS, EVA y Elvaloy RET*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR).
<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/968>
- Universidad Nacional de Colombia - Instituto Nacional de Vías INVIAS (2006). *Manual para la Inspección Visual de Pavimentos Flexibles*. Bogotá, Colombia.
- Valdivia, V. (2017). *Análisis del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente incorporando polímeros SBS en la Av. Universitaria, cuadra 53 al 57-Comas, Lima 2017* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo, Lima-Perú].
- Vila, R. y Jaramillo, J. (2018). Incidencia del empleo de polímeros como modificadores del asfalto. *Revista Lasallista de Investigación*, 15(2), 315-326
<https://doi.org/10.22507/rli.v15n2a24>
- Vílchez, L. y Yerén, S. (2022). *Condiciones meteorológicas que afectan a las propiedades de las mezclas asfálticas* [Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma, Lima-Perú].

Villafana, G. y Ramírez, R. (2019). *Análisis del comportamiento de una mezcla asfáltica modificada con polímeros SBS BETUTEC IC y una mezcla asfáltica convencional 60/70* [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte, Lima-Perú].

ANEXOS

Anexo A: Matriz de Consistencia

Anexo B: Matriz de Operacionalización de variables

Anexo C: Ensayos

Anexo A: Matriz de Consistencia

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLE	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
¿En qué medida las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos mejoran sus propiedades mecánicas en zonas de climas cálidos, año 2023?	Determinar las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas, en zonas de climas cálidos, año 2023.	Las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos mejorarán sus propiedades mecánicas, en zonas de climas cálidos, año 2023.	VI: Polímeros elastoméricos reactivos	Contenido de polímero RET	Relación entre el peso de polímero vs el peso del cemento asfáltico	Método: Deductivo Orientación: Aplicada Enfoque: Cuantitativo Recolección de datos: Retrolectivo Tipo: Descriptivo <u>NIVEL:</u> Descriptivo-Explicativo.
PROBLEMA ESPECIFICO	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPOTESIS ESPECIFICAS	VARIABLE	DIMENSIONES	INDICADORES	
a. ¿En qué medida las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos mejoran su estabilidad en zonas de climas cálidos, año 2023?	a. Determinar la estabilidad de la mezcla asfáltica en caliente convencional y de la mezcla asfáltica en caliente con polímeros elastoméricos reactivos, en zonas de climas cálidos, mediante la metodología Marshall, año 2023.	a) Las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos mejorarán la estabilidad, en zonas de climas cálidos, año 2023.		Estabilidad	Parámetros Mecánicos	<u>DISEÑO DE LA INVESTIGACION:</u> No experimental Transversal Retrospectivo
b. ¿En qué medida las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos mejoran su durabilidad en zonas de climas cálidos, año 2023?	b. Determinar la durabilidad de la mezcla asfáltica en caliente convencional y de la mezcla asfáltica con polímeros elastoméricos reactivos, en zonas de climas cálidos, mediante la metodología Marshall, año 2023.	b) Las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos mejorarán la durabilidad, en zonas de climas cálidos, año 2023.	VD: Propiedades mecánicas	Durabilidad	Parámetros Volumétricos	<u>POBLACIÓN:</u> Mezclas asfálticas en caliente convencionales y mezclas modificadas con polímero elastomérico reactivo
c. ¿En qué medida las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos mejoran su susceptibilidad a la deformación permanente en zonas de climas cálidos, año 2023?	c. Determinar la susceptibilidad a la deformación permanente de la mezcla asfáltica en caliente convencional y de la mezcla asfáltica en caliente con polímeros elastoméricos reactivos, en zonas de climas cálidos, mediante el Ensayo de la Rueda de Hamburgo, año 2023.	c) Las mezclas asfálticas en caliente con polímeros elastoméricos reactivos mejorarán la susceptibilidad a la deformación permanente, en zonas de climas cálidos, año 2023.		Susceptibilidad a la deformación permanente	Deformación permanente por ahuellamiento	<u>MUESTRA:</u> Resultados de los ensayos de laboratorio <u>TÉCNICA:</u> Observación <u>INSTRUMENTOS:</u> Formatos de Ensayos Marshall y Rueda de Hamburgo

Anexo B: Matriz de Operacionalización de Variables

VARIABLES	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Índices	Unidad de medida	Escala	Instrumento	Herramienta
Variable Independiente: Polímeros Elastoméricos Reactivos (RET)	El polímero elastomérico reactivo (RET) es un polímero formado por tres monómeros: n Butil, Etileno y Glicidil Metacrilato, por lo que también se le denomina terpolímero y es reactivo debido a su distribución química, que le permite reaccionar con los asfaltenos del asfalto para formar un compuesto inseparable. Tiene excelente desempeño en alto tránsito y alta resistencia a la deformación por ahuellamiento	El polímero elastomérico reactivo (RET) modifica al cemento asfáltico para convertirlo en un asfalto modificado más viscoso y que presenta una caracterización física diferente, dependiendo de la cantidad de polímero utilizada, cambiando las propiedades de la mezcla asfáltica. Generalmente, se mide como porcentaje en peso del cemento asfáltico y se usa en porcentajes bajos, de 1 a 1.5%	Contenido de polímero RET	Relación entre el peso del polímero vs el peso del cemento asfáltico	Dosificación Densidad Punto de Fusión	Porcentaje g/cm ³ °C	Cuantitativa	Formatos de laboratorio de ensayos de caracterización	Fichas técnicas
Variable Dependiente: Propiedades mecánicas	Son cualidades que poseen las mezclas asfálticas, las cuales se diseñan mediante parámetros (mecánicos y volumétricos) necesarios para que resistan condiciones de cargas de tránsito y de clima durante su vida útil. Cuando son compactadas, tienen propiedades mecánicas de estabilidad (resistencia a la deformación bajo cargas), durabilidad y susceptibilidad a la deformación permanente.	Las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas están determinadas por características de estabilidad, durabilidad y susceptibilidad a la deformación permanente.	Estabilidad Durabilidad Susceptibilidad a la deformación permanente	Parámetros mecánicos Parámetros volumétricos Deformación permanente por ahuellamiento	Estabilidad Marshall Fluencia Marshall Vacíos de aire Vacíos en el agregado Vacíos llenos de asfalto Contenido de asfalto Densidad de la mezcla Ahuellamiento N° de pasadas	Kg mm Porcentaje Porcentaje Porcentaje Porcentaje Kg/m ³ Milímetros Adimensional	Cuantitativa Continua Cuantitativa Continua Cuantitativa Continua Cuantitativa Continua Cuantitativa Continua Cuantitativa Continua	Formato de laboratorio técnico Formato de laboratorio técnico	Norma MTC E 504 Norma MTC E 504 Norma AASHTO T324

Anexo C: Ensayos de laboratorio

Caso 2: Ensayo Marshall de la Mezcla Convencional

Ensayo Marshall Mezcla Convencional con 4.0% de asfalto. **Caso 2**

Ensayo marshall (ASTM D 1559 – MTC E 504)					
N°	Denominación	1	2	3	Promedio
1	CEMENTO ASFÁLTICO EN PESO DE LA MEZCLA TOTAL (%)	4.0			
2	AGREGADO GRUESO (> N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	38.40			
3	AGREGADO FINO (< N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	57.60			
4	FILLER (MÍNIMO 65% PASA N° 200) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	0.00			
5	PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO - APARENTE	1.010			
6	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO-BULK (< 1")	2.734			
7	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO FINO - BULK	2.725			
8	PESO ESPECÍFICO DEL FILLER - APARENTE	-			
9	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.24	6.28	6.28	
10	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (1) (g)	1,198.2	1,196.2	1,196.2	
11	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AIRE (g)	1,201.2	1,198.2	1,198.2	
12	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AGUA (g)	695.0	689.2	689.2	
13	PESO DEL AGUA ABSORBIDA (g)	3.0	2.0	2.0	
14	VOLUMEN DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (cm ³)	506.2	509.0	509.0	
15	PORCENTAJE DE ABSORCION (%)	0.59	0.39	0.39	
16	PESO ESPECÍFICO BULK DE LA BRIQUETA (g/cm ³)	2.367	2.350	2.350	2.356
17	PESO ESPECÍFICO TEORICO MÁXIMO (RICE)-ASTM2041	2.582			
18	PORCENTAJE DE VACÍOS (%)	8.3	9.0	9.0	8.8
19	PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO TOTAL (g/cm ³)	2.729			
20	VACÍOS DE AGREGADO MINERAL (V.M.A.) (%)	16.7	17.3	17.3	17.1
21	VACÍOS LLENADOS CON CEMENTO ASFÁLTICO (%)	50.2	48.1	48.1	48.8
22	PESO ESPECÍFICO EFECTIVO DEL AGREGADO TOTAL	2.761			
23	ASFALTO ABSORVIDO POR EL AGREGADO TOTAL (%)	0.43			
24	PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO (%)	3.57			
25	FLUJO (mm)	2.8	2.8	3.0	2.9
26	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (kg)	1,168.0	1,168.0	1,168.0	
27	FACTOR DE ESTABILIDAD	1.04	1.00	1.00	
28	ESTABILIDAD CORREGIDA (kg)	1,215.0	1,168.0	1,168.0	1,184
29	RELACIÓN ESTAB./FLUJO (kg/mm)	4348.6	4180.4	3832.0	4120

Nota. Tomada de Mejoramiento del comportamiento mecánico de una MAC con polímero Elvaloy 4170 RET (p.73), por Chávez, 2019.

Ensayo Marshall Mezcla Convencional con 4.5% de asfalto. **Caso 2**

Ensayo marshall (ASTM D 1559 – MTC E 504)					
N°	Denominación	1	2	3	Promedio
1	CEMENTO ASFÁLTICO EN PESO DE LA MEZCLA TOTAL (%)	4.5			
2	AGREGADO GRUESO (> N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	38.20			
3	AGREGADO FINO (< N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	57.30			
4	FILLER (MÍNIMO 65% PASA N° 200) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	0.00			
5	PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO - APARENTE	1.010			
6	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO-BULK (< 1")	2.734			
7	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO FINO - BULK	2.725			
8	PESO ESPECÍFICO DEL FILLER - APARENTE	-			
9	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.22	6.22	6.22	
10	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (1) (g)	1,203.6	1,202.8	1,204.0	
11	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AIRE (g)	1,205.2	1,207.4	1,206.0	
12	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AGUA (g)	701.0	703.0	702.0	
13	PESO DEL AGUA ABSORBIDA (g)	1.6	4.6	2.0	
14	VOLUMEN DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (cm³)	504.2	504.4	504.0	
15	PORCENTAJE DE ABSORCION (%)	0.32	0.91	0.40	
16	PESO ESPECÍFICO BULK DE LA BRIQUETA (g/cm³)	2.387	2.385	2.389	2.387
17	PESO ESPECÍFICO TEÓRICO MÁXIMO (RICE)-ASTM2041	2.561			
18	PORCENTAJE DE VACÍOS (%)	6.8	6.9	6.7	6.80
19	PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO TOTAL (g/cm³)	2.729			
20	VACÍOS DE AGREGADO MINERAL (V.M.A.) (%)	16.5	16.6	16.4	16.5
21	VACÍOS LLENADOS CON CEMENTO ASFÁLTICO (%)	58.8	58.5	59.0	58.8
22	PESO ESPECÍFICO EFECTIVO DEL AGREGADO TOTAL	2.761			
23	ASFALTO ABSORVIDO POR EL AGREGADO TOTAL (%)	0.43			
24	PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO (%)	4.07			
25	FLUJO (mm)	3.0	3.0	3.0	3.00
26	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (kg)	1,252.3	1,257.0	1,270.9	
27	FACTOR DE ESTABILIDAD	1.04	1.04	1.04	
28	ESTABILIDAD CORREGIDA (kg)	1,302.0	1,307.0	1,322.0	1,310.0
29	RELACIÓN ESTAB/FLUJO (kg/mm)	4,271.7	4,288.1	4,337.3	4,299.0

Nota. Tomada de Mejoramiento del comportamiento mecánico de una MAC con polímero Elvaloy 4170 RET (p.74), por Chávez, 2019.

Ensayo Marshall Mezcla Convencional con 5% de asfalto. **Caso 2**

Ensayo Marshall (ASTM D 1559 – MTC E 504)					
Nº	Denominación	1A	3B	3C	Promedio
1	CEMENTO ASFÁLTICO EN PESO DE LA MEZCLA TOTAL (%)	5.0			
2	AGREGADO GRUESO (> N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	38.00			
3	AGREGADO FINO (< N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	57.00			
4	FILLER (MÍNIMO 65% PASA N° 200) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	0.00			
5	PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO - APARENTE	1.010			
6	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO-BULK (< 1")	2.734			
7	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO FINO - BULK	2.725			
8	PESO ESPECÍFICO DEL FILLER - APARENTE	-			-
9	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.09	6.23	6.26	
10	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (1) (g)	1,193.8	1,212.0	1,214.2	
11	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AIRE (g)	1,195.8	1,214.4	1,216.2	
12	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AGUA (g)	702.0	709.0	709.0	
13	PESO DEL AGUA ABSORBIDA (g)	2.0	2.4	2.0	
14	VOLUMEN DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (cm ³)	493.8	505.4	507.2	
15	PORCENTAJE DE ABSORCION (%)	0.41	0.47	0.39	
16	PESO ESPECÍFICO BULK DE LA BRIQUETA (g/cm ³)	2.418	2.398	2.394	2.403
17	PESO ESPECÍFICO TEÓRICO MÁXIMO (RICE)-ASTM2041	2.541			
18	PORCENTAJE DE VACÍOS (%)	4.9	5.6	5.8	5.40
19	PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO TOTAL (g/cm ³)	2.729			
20	VACÍOS DE AGREGADO MINERAL (V.M.A.) (%)	15.8	16.5	16.7	16.3
21	VACÍOS LLENADOS CON CEMENTO ASFÁLTICO (%)	69.2	65.9	65.3	66.8
22	PESO ESPECÍFICO EFECTIVO DEL AGREGADO TOTAL	2.761			
23	ASFALTO ABSORVIDO POR EL AGREGADO TOTAL (%)	0.43			
24	PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO (%)	4.57			
25	FLUJO (mm)	3.3	3.0	3.3	3.2
26	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (kg)	1,332.8	1,332.8	1,323.3	
27	FACTOR DE ESTABILIDAD	1.09	1.04	1.04	
28	ESTABILIDAD CORREGIDA (kg)	1,453.0	1,386.0	1,376.0	1405.0
29	RELACIÓN ESTAB./FLUJO (kg/mm)	4,400.4	4,547.2	4,167.2	4372.0

Nota. Tomada de Mejoramiento del comportamiento mecánico de una MAC con polímero Elvaloy 4170 RET (p.75), por Chávez, 2019.

Ensayo Marshall Mezcla Convencional con 5.5% de asfalto. **Caso 2**

Ensayo Marshall (ASTM D 1559 – MTC E 504)					
Nº	Denominación	1	2	3	Promedio
1	CEMENTO ASFÁLTICO EN PESO DE LA MEZCLA TOTAL (%)	5.5			
2	AGREGADO GRUESO (> N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	37.80			
3	AGREGADO FINO (< N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	56.70			
4	FILLER (MÍNIMO 65% PASA N° 200) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	0.00			
5	PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO - APARENTE	1.010			
6	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO-BULK (< 1")	2.734			
7	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO FINO - BULK	2.725			
8	PESO ESPECÍFICO DEL FILLER - APARENTE	-			-
9	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.19	6.19	6.19	
10	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (1) (g)	1,211.2	1,212.9	1,213.6	
11	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AIRE (g)	1,212.0	1,214.2	1,214.2	
12	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AGUA (g)	710.0	712.0	712.0	
13	PESO DEL AGUA ABSORBIDA (g)	0.8	1.3	0.6	
14	VOLUMEN DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (cm ³)	502.0	502.2	502.2	
15	PORCENTAJE DE ABSORCIÓN (%)	0.16	0.26	0.12	
16	PESO ESPECÍFICO BULK DE LA BRIQUETA (g/cm ³)	2.413	2.415	2.417	2.415
17	PESO ESPECÍFICO TEÓRICO MÁXIMO (RICE)-ASTM2041	2.521			
18	PORCENTAJE DE VACÍOS (%)	4.3	4.2	4.1	4.2
19	PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO TOTAL (g/cm ³)	2.729			
20	VACÍOS DE AGREGADO MINERAL (V.M.A.) (%)	16.5	16.4	16.3	16.4
21	VACÍOS LLENADOS CON CEMENTO ASFÁLTICO (%)	74.0	74.4	74.6	74.3
22	PESO ESPECÍFICO EFECTIVO DEL AGREGADO TOTAL	2.761			
23	ASFALTO ABSORVIDO POR EL AGREGADO TOTAL (%)	0.43			
24	PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO (%)	5.07			
25	FLUJO (mm)	3.6	3.6	3.3	3.5
26	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (kg)	1,365.7	1,370.4	1,361.0	
27	FACTOR DE ESTABILIDAD	1.04	1.04	1.04	
28	ESTABILIDAD CORREGIDA (kg)	1,420.0	1,425.0	1,415.0	1420.0
29	RELACIÓN ESTAB./FLUJO (kg/mm)	3,993.3	4,007.3	4,285.3	4095

Nota. Tomada de Mejoramiento del comportamiento mecánico de una MAC con polímero Elvaloy 4170 RET (p.76), por Chávez, 2019.

Ensayo Marshall Mezcla Convencional con **6.0%** de asfalto. **Caso 2**

Ensayo marshall (ASTM D 1559 – MTC E 504)					
Nº	Denominación	1	2	3	Promedio
1	CEMENTO ASFÁLTICO EN PESO DE LA MEZCLA TOTAL (%)	6.0			
2	AGREGADO GRUESO (> N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	37.60			
3	AGREGADO FINO (< N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	56.40			
4	FILLER (MÍNIMO 65% PASA N° 200) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	0.00			
5	PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO - APARENTE	1.010			
6	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO-BULK (< 1")	2.734			
7	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO FINO - BULK	2.725			
8	PESO ESPECÍFICO DEL FILLER - APARENTE	7.000			7.000
9	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.25	6.20	6.17	
10	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (1) (g)	1,224.4	1,221.2	1,214.8	
11	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AIRE (g)	1,224.8	1,221.8	1,215.6	
12	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AGUA (g)	718.0	719.0	715.0	
13	PESO DEL AGUA ABSORBIDA (g)	0.4	0.6	0.8	
14	VOLUMEN DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (cm ³)	506.8	502.8	500.6	
15	PORCENTAJE DE ABSORCION (%)	0.08	0.12	0.16	
16	PESO ESPECÍFICO BULK DE LA BRIQUETA (g/cm ³)	2.416	2.429	2.427	2.424
17	PESO ESPECÍFICO TEÓRICO MÁXIMO (RICE)-ASTM2041	2.501			
18	PORCENTAJE DE VACÍOS (%)	3.4	2.9	3.0	3.1
19	PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO TOTAL (g/cm ³)	2.729			
20	VACÍOS DE AGREGADO MINERAL (V.M.A.) (%)	16.8	16.3	16.4	16.5
21	VACÍOS LLENADOS CON CEMENTO ASFÁLTICO (%)	79.8	82.3	81.9	81.3
22	PESO ESPECÍFICO EFECTIVO DEL AGREGADO TOTAL	2.761			
23	ASFALTO ABSORVIDO POR EL AGREGADO TOTAL (%)	0.43			
24	PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO (%)	5.57			
25	FLUJO (mm)	3.6	3.6	3.6	3.6
26	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (kg)	1,262.1	1,266.8	1,266.8	
27	FACTOR DE ESTABILIDAD	1.04	1.04	1.04	
28	ESTABILIDAD CORREGIDA (kg)	1,313.0	1,317.0	1,317.0	1316
29	RELACIÓN ESTAB./FLUJO (kg/mm)	3,692.4	3,703.6	3,703.6	3700

Nota. Tomada de Mejoramiento del comportamiento mecánico de una MAC con polímero Elvaloy 4170 RET (p.77), por Chávez, 2019.

Caso 2: Ensayo Marshall de la Mezcla Modificada con 1.1% Elvaloy

Ensayo Marshall Mezcla Modificada (1.1% RET) con 4.0% asfalto. Caso 2

Ensayo marshall (ASTM D 1559 – MTC E 504)					
Nº	Denominación	1	2	3	Promedio
1	CEMENTO ASFÁLTICO EN PESO DE LA MEZCLA TOTAL (%)	4.0			
2	AGREGADO GRUESO (> N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	38.40			
3	AGREGADO FINO (< N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	57.60			
4	FILLER (MÍNIMO 65% PASA N° 200) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	0.00			
5	PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO - APARENTE	1.010			
6	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO-BULK (< 1")	2.734			
7	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO FINO - BULK	2.725			
8	PESO ESPECÍFICO DEL FILLER - APARENTE	-			
9	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.20	6.20	6.21	
10	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (1) (g)	1,195.6	1,193.6	1,193.6	
11	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AIRE (g)	1,198.8	1,198.8	1,198.8	
12	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AGUA (g)	695.8	696.0	695.0	
13	PESO DEL AGUA ABSORBIDA (g)	2.2	5.2	5.2	
14	VOLUMEN DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (cm ³)	503.0	502.8	503.8	
15	PORCENTAJE DE ABSORCIÓN (%)	0.44	1.03	1.03	
16	PESO ESPECÍFICO BULK DE LA BRIQUETA (g/cm ³)	2.379	2.374	2.369	2.374
17	PESO ESPECÍFICO TEÓRICO MÁXIMO (RICE)-ASTM2041	2.559			
18	PORCENTAJE DE VACÍOS (%)	7.0	7.2	7.4	7.2
19	PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO TOTAL (g/cm ³)	18.500			
20	VACÍOS DE AGREGADO MINERAL (V.M.A.) (%)	16.3	16.5	16.7	16.5
21	VACÍOS LLENADOS CON CEMENTO ASFÁLTICO (%)	56.8	56.2	55.6	56.2
22	PESO ESPECÍFICO EFECTIVO DEL AGREGADO TOTAL	2.734			
23	ASFALTO ABSORVIDO POR EL AGREGADO TOTAL (%)	0.06			
24	PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO (%)	3.94			
25	FLUJO (mm)	2.8	2.8	2.8	2.8
26	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (kg)	1,191.5	1,168.0	1,177.4	
27	FACTOR DE ESTABILIDAD	1.04	1.04	1.04	
28	ESTABILIDAD CORREGIDA (kg)	1,239.0	1,215.0	1,224.0	1,226.0
29	RELACIÓN ESTAB./FLUJO (kg/mm)	4434.5	4348.6	4380.8	4388.0

Nota. Tomada de Mejoramiento del comportamiento mecánico de una MAC con polímero Elvaloy 4170 RET (pp.81) por Chávez, 2019.

Ensayo Marshall de la Mezcla Modificada (**1.1% RET**) con **4.5%** de asfalto. **Caso 2**

Ensayo marshall (ASTM D 1559 – MTC E 504)					
N°	Denominación	1	2	3	Promedio
1	CEMENTO ASFÁLTICO EN PESO DE LA MEZCLA TOTAL (%)	4.5			
2	AGREGADO GRUESO (> N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	38.20			
3	AGREGADO FINO (< N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	57.30			
4	FILLER (MÍNIMO 65% PASA N° 200) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	0.00			
5	PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO - APARENTE	1.010			
6	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO-BULK (< 1")	2.734			
7	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO FINO - BULK	2.725			
8	PESO ESPECÍFICO DEL FILLER - APARENTE	-			
9	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.22	6.21	6.20	
10	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (1) (g)	1,203.8	1,199.2	1,199.5	
11	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AIRE (g)	1,209.2	1,202.4	1,202.6	
12	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AGUA (g)	705.0	699.0	700.2	
13	PESO DEL AGUA ABSORBIDA (g)	5.4	3.2	3.1	
14	VOLUMEN DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (cm ³)	504.2	503.4	502.4	
15	PORCENTAJE DE ABSORCION (%)	1.07	0.64	0.62	
16	PESO ESPECÍFICO BULK DE LA BRIQUETA (g/cm ³)	2.388	2.382	2.388	2.386
17	PESO ESPECÍFICO TEÓRICO MÁXIMO (RICE)-ASTM2041	2.540			
18	PORCENTAJE DE VACÍOS (%)	6.0	6.2	6.0	6.1
19	PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO TOTAL (g/cm ³)	2.729			
20	VACÍOS DE AGREGADO MINERAL (V.M.A.) (%)	16.4	16.6	16.4	16.5
21	VACÍOS LLENADOS CON CEMENTO ASFÁLTICO (%)	63.4	62.6	63.4	63.1
22	PESO ESPECÍFICO EFECTIVO DEL AGREGADO TOTAL	2.735			
23	ASFALTO ABSORVIDO POR EL AGREGADO TOTAL (%)	0.08			
24	PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO (%)	4.42			
25	FLUJO (mm)	3.3	3.3	3.3	3.3
26	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (kg)	1,252.3	1,275.5	1,294.0	
27	FACTOR DE ESTABILIDAD	1.04	1.04	1.04	
28	ESTABILIDAD CORREGIDA (kg)	1,302.0	1,327.0	1,346.0	1,325.0
29	RELACIÓN ESTAB./FLUJO (kg/mm)	3,943.1	4,018.8	4,076.3	4,013.0

Nota. Tomada de Mejoramiento del comportamiento mecánico de una MAC con polímero Elvaloy 4170 RET (p.82) por Chávez, 2019.

Ensayo Marshall de la Mezcla Modificada (**1.1% RET**) con **5.0%** de asfalto. **Caso 2**

Ensayo marshall (ASTM D 1559 – MTC E 504)					
N°	Denominación	1	2	3	Promedio
1	CEMENTO ASFÁLTICO EN PESO DE LA MEZCLA TOTAL (%)	5.0			
2	AGREGADO GRUESO (> N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	38.00			
3	AGREGADO FINO (< N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	57.00			
4	FILLER (MÍNIMO 65% PASA N° 200) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	0.00			
5	PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO - APARENTE	1.010			
6	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO-BULK (< 1")	2.734			
7	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO FINO - BULK	2.725			
8	PESO ESPECÍFICO DEL FILLER - APARENTE	-			
9	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.18	6.22	6.20	
10	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (1) (g)	1,207.8	1,213.2	1,213.5	
11	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AIRE (g)	1,214.8	1,215.8	1,214.9	
12	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AGUA (g)	714.0	711.6	712.0	
13	PESO DEL AGUA ABSORBIDA (g)	7.0	2.6	1.4	
14	VOLUMEN DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (cm ³)	500.8	504.2	502.9	
15	PORCENTAJE DE ABSORCION (%)	1.40	0.52	0.28	
16	PESO ESPECÍFICO BULK DE LA BRIQUETA (g/cm ³)	2.412	2.406	2.413	2.410
17	PESO ESPECÍFICO TEÓRICO MÁXIMO (RICE)-ASTM2041	2.533			
18	PORCENTAJE DE VACÍOS (%)	4.8	5.0	4.7	4.80
19	PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO TOTAL (g/cm ³)	2.729			
20	VACÍOS DE AGREGADO MINERAL (V.M.A.) (%)	16.0	16.2	16.0	16.1
21	VACÍOS LLENADOS CON CEMENTO ASFÁLTICO (%)	70.2	69.2	70.5	70.0
22	PESO ESPECÍFICO EFECTIVO DEL AGREGADO TOTAL	2.751			
23	ASFALTO ABSORVIDO POR EL AGREGADO TOTAL (%)	0.29			
24	PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO (%)	4.71			
25	FLUJO (mm)	3.3	3.6	3.6	3.5
26	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (kg)	1,412.8	1,412.8	1,427.0	
27	FACTOR DE ESTABILIDAD	1.04	1.04	1.04	
28	ESTABILIDAD CORREGIDA (kg)	1,469.0	1,469.0	1,484.0	1474.0
29	RELACIÓN ESTAB./FLUJO (kg/mm)	4,448.8	4,131.0	4,173.2	4251.0

Nota. Tomada de Mejoramiento del comportamiento mecánico de una MAC con polímero Elvaloy 4170 RET (p.83) por Chávez, 2019.

Ensayo Marshall de Mezcla Modificada (**1.1% RET**) con **5.5%** de asfalto. **Caso 2**

Ensayo marshall (ASTM D 1559 – MTC E 504)					
N°	Denominación	1	2	3	Promedio
1	CEMENTO ASFÁLTICO EN PESO DE LA MEZCLA TOTAL (%)	5.5			
2	AGREGADO GRUESO (> N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	37.80			
3	AGREGADO FINO (< N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	56.70			
4	FILLER (MÍNIMO 65% PASA N° 200) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	0.00			
5	PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO - APARENTE	1.010			
6	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO-BULK (< 1")	2.734			
7	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO FINO - BULK	2.725			
8	PESO ESPECÍFICO DEL FILLER - APARENTE	-			
9	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.23	6.17	6.18	
10	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (1) (g)	1,216.8	1,210.6	1,210.9	
11	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AIRE (g)	1,219.8	1,214.6	1,215.0	
12	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AGUA (g)	715.0	714.0	714.2	
13	PESO DEL AGUA ABSORBIDA (g)	3.0	4.0	4.1	
14	VOLUMEN DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (cm ³)	504.8	500.6	500.8	
15	PORCENTAJE DE ABSORCIÓN (%)	0.59	0.80	0.82	
16	PESO ESPECÍFICO BULK DE LA BRIQUETA (g/cm ³)	2.410	2.418	2.418	2.416
17	PESO ESPECÍFICO TEÓRICO MÁXIMO (RICE)-ASTM2041	2.515			
18	PORCENTAJE DE VACÍOS (%)	4.2	3.9	3.9	4.0
19	PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO TOTAL (g/cm ³)	2.729			
20	VACÍOS DE AGREGADO MINERAL (V.M.A.) (%)	16.5	16.3	16.3	16.4
21	VACÍOS LLENADOS CON CEMENTO ASFÁLTICO (%)	74.8	76.4	76.3	75.8
22	PESO ESPECÍFICO EFECTIVO DEL AGREGADO TOTAL	2.754			
23	ASFALTO ABSORVIDO POR EL AGREGADO TOTAL (%)	0.33			
24	PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO (%)	5.17			
25	FLUJO (mm)	3.8	3.8	3.8	3.8
26	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (kg)	1,299.8	1,262.1	1,285.7	
27	FACTOR DE ESTABILIDAD	1.04	1.04	1.04	
28	ESTABILIDAD CORREGIDA (kg)	1,352.0	1,313.0	1,337.0	1334.0
29	RELACIÓN ESTAB./FLUJO (kg/mm)	3,548.6	3,446.2	3,509.2	3501.0

Nota. Tomada de Mejoramiento del comportamiento mecánico de una MAC con polímero Elvaloy 4170 RET (p.84) por Chávez, 2019.

Ensayo Marshall Mezcla Modificada (**1.1% RET**) con **6%** de asfalto. **Caso 2**

Ensayo marshall (ASTM D 1559 – MTC E 504)					
N°	Denominación	1	2	3	Promedio
1	CEMENTO ASFÁLTICO EN PESO DE LA MEZCLA TOTAL (%)	6.0			
2	AGREGADO GRUESO (> N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	37.60			
3	AGREGADO FINO (< N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	56.40			
4	FILLER (MÍNIMO 65% PASA N° 200) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	0.00			
5	PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO - APARENTE	1.010			
6	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO-BULK (< 1")	2.734			
7	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO FINO - BULK	2.725			
8	PESO ESPECÍFICO DEL FILLER - APARENTE	-			
9	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.19	6.20	6.23	
10	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (1) (g)	1,220.0	1,219.0	1,219.5	
11	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AIRE (g)	1,220.4	1,228.0	1,234.2	
12	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AGUA (g)	718.5	725.0	729.0	
13	PESO DEL AGUA ABSORBIDA (g)	0.4	9.0	14.7	
14	VOLUMEN DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (cm ³)	501.9	503.0	505.2	
15	PORCENTAJE DE ABSORCIÓN (%)	0.08	1.79	2.91	
16	PESO ESPECÍFICO BULK DE LA BRIQUETA (g/cm ³)	2.431	2.423	2.414	2.423
17	PESO ESPECÍFICO TEÓRICO MÁXIMO (RICE)-ASTM2041	2.495			
18	PORCENTAJE DE VACÍOS (%)	2.6	2.9	3.3	2.9
19	PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO TOTAL (g/cm ³)	2.729			
20	VACÍOS DE AGREGADO MINERAL (V.M.A.) (%)	16.3	16.5	16.9	16.6
21	VACÍOS LLENADOS CON CEMENTO ASFÁLTICO (%)	84.2	82.6	80.8	82.5
22	PESO ESPECÍFICO EFECTIVO DEL AGREGADO TOTAL	2.753			
23	ASFALTO ABSORVIDO POR EL AGREGADO TOTAL (%)	0.33			
24	PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO (%)	5.67			
25	FLUJO (mm)	4.1	4.1	4.1	4.1
26	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (kg)	1,177.4	1,191.5	1,177.4	
27	FACTOR DE ESTABILIDAD	1.04	1.04	1.04	
28	ESTABILIDAD CORREGIDA (kg)	1,224.0	1,239.0	1,224.0	1229.0
29	RELACIÓN ESTAB./FLUJO (kg/mm)	3,011.8	3,048.7	3,011.8	3024.0

Nota. Tomada de *Mejoramiento del comportamiento mecánico de una MAC con polímero Elvaloy 4170 RET* (p.85) por Chávez, 2019.

Caso 2: Ensayo Marshall de la Mezcla Modificada con 1.4% Elvaloy

Ensayo Marshall Mezcla Modificada (1.4% RET) con 4.5% de asfalto. Caso 2

Ensayo marshall (ASTM D 1559 – MTC E 504)					
Nº	Denominación	1A	2B	3C	Promedio
1	CEMENTO ASFÁLTICO EN PESO DE LA MEZCLA TOTAL (%)	4.5			
2	AGREGADO GRUESO (> N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	38.20			
3	AGREGADO FINO (< N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	57.30			
4	FILLER (MÍNIMO 65% PASA N° 200) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	0.00			
5	PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO - APARENTE	1.010			
6	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO-BULK (< 1")	2.734			
7	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO FINO - BULK	2.725			
8	PESO ESPECÍFICO DEL FILLER - APARENTE	-			
9	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.32	6.37	6.37	
10	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (1) (g)	1,205.6	1,205.6	1,203.4	
11	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AIRE (g)	1,209.2	1,212.6	1,205.8	
12	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AGUA (g)	696.6	696.4	689.2	
13	PESO DEL AGUA ABSORBIDA (g)	3.6	7.0	2.4	
14	VOLUMEN DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (cm ³)	512.6	516.2	516.6	
15	PORCENTAJE DE ABSORCION (%)	0.70	1.36	0.46	
16	PESO ESPECÍFICO BULK DE LA BRIQUETA (g/cm ³)	2.352	2.336	2.329	2.339
17	PESO ESPECÍFICO TEÓRICO MÁXIMO (RICE)-ASTM2041	2.574			
18	PORCENTAJE DE VACÍOS (%)	8.6	9.3	9.5	9.1
19	PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO TOTAL (g/cm ³)	18.500			
20	VACÍOS DE AGREGADO MINERAL (V.M.A.) (%)	17.7	18.3	18.5	18.2
21	VACÍOS LLENADOS CON CEMENTO ASFÁLTICO (%)	51.2	49.4	48.6	49.7
22	PESO ESPECIFICO EFECTIVO DEL AGREGADO TOTAL	2.777			
23	ASFALTO ABSORVIDO POR EL AGREGADO TOTAL (%)	0.63			
24	PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO (%)	3.87			
25	FLUJO (mm)	3.3	3.8	3.8	3.6
26	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (kg)	1,488.3	1,346.9	1,356.3	
27	FACTOR DE ESTABILIDAD	1.00	1.00	1.00	
28	ESTABILIDAD CORREGIDA (kg)	1,488.0	1,347.0	1,356.0	1,397.0
29	RELACIÓN ESTAB./FLUJO (kg/mm)	4506.4	3535.4	3559.1	3867.0

Nota. Tomada de *Mejoramiento del comportamiento mecánico de una MAC con polímero Elvaloy 4170 RET* (p.89) por Chávez, 2019.

Ensayo Marshall Mezcla Modificada (1.4% RET) con 5.0% de asfalto. Caso 2

Ensayo marshall (ASTM D 1559 – MTC E 504)					
Nº	Denominación	1	2	3	Promedio
1	CEMENTO ASFÁLTICO EN PESO DE LA MEZCLA TOTAL (%)	5.0			
2	AGREGADO GRUESO (> N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	38.00			
3	AGREGADO FINO (< N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	57.00			
4	FILLER (MÍNIMO 65% PASA N° 200) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	0.00			
5	PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO - APARENTE	1.010			
6	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO-BULK (< 1")	2.734			
7	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO FINO - BULK	2.725			
8	PESO ESPECÍFICO DEL FILLER - APARENTE	-			
9	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.28	6.27	6.30	
10	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (1) (g)	1,211.2	1,213.4	1,211.6	
11	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AIRE (g)	1,215.2	1,215.2	1,215.4	
12	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AGUA (g)	706.0	706.8	705.0	
13	PESO DEL AGUA ABSORBIDA (g)	4.0	1.8	3.8	
14	VOLUMEN DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (cm ³)	509.2	508.4	510.4	
15	PORCENTAJE DE ABSORCION (%)	0.79	0.35	0.74	
16	PESO ESPECÍFICO BULK DE LA BRIQUETA (g/cm ³)	2.379	2.387	2.374	2.380
17	PESO ESPECÍFICO TEÓRICO MÁXIMO (RICE)-ASTM2041	2.553			
18	PORCENTAJE DE VACÍOS (%)	6.8	6.5	7.0	6.8
19	PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO TOTAL (g/cm ³)	2.729			
20	VACÍOS DE AGREGADO MINERAL (V.M.A.) (%)	17.2	16.9	17.4	17.2
21	VACÍOS LLENADOS CON CEMENTO ASFÁLTICO (%)	60.3	61.5	59.7	60.5
22	PESO ESPECÍFICO EFECTIVO DEL AGREGADO TOTAL	2.776			
23	ASFALTO ABSORVIDO POR EL AGREGADO TOTAL (%)	0.63			
24	PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO (%)	4.37			
25	FLUJO (mm)	4.3	4.1	4.1	4.1
26	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (kg)	1,446.9	1,451.5	1,451.5	
27	FACTOR DE ESTABILIDAD	1.00	1.04	1	
28	ESTABILIDAD CORREGIDA (kg)	1,447.0	1,510.0	1,452.0	1,470
29	RELACIÓN ESTAB/FLUJO (kg/mm)	3,351.1	3,715.6	3,572.8	3,546.0

Nota. Tomada de *Mejoramiento del comportamiento mecánico de una MAC con polímero Elvaloy 4170 RET* (p.90) por Chávez, 2019.

Ensayo Marshall Mezcla Modificada (1.4% RET) con 5.5% de asfalto. Caso 2

Ensayo marshall (ASTM D 1559 – MTC E 504)						
N°	Denominación		1a	3b	3c	Promedio
1	CEMENTO ASFÁLTICO EN PESO DE LA MEZCLA TOTAL (%)		5.5			
2	AGREGADO GRUESO (> N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)		37.80			
3	AGREGADO FINO (< N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)		56.70			
4	FILLER (MÍNIMO 65% PASA N° 200) EN PESO DE LA MEZCLA (%)		0.00			
5	PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO - APARENTE		1.010			
6	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO-BULK (< 1")		2.734			
7	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO FINO - BULK		2.725			
8	PESO ESPECÍFICO DEL FILLER - APARENTE		-			-
9	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)		6.20	6.20	6.17	
10	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (1) (g)		1,217. 2	1,217. 0	1,211. 2	
11	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AIRE (g)		1,218. 4	1,217. 6	1,212. 2	
12	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AGUA (g)		716.0	715.0	712.0	
13	PESO DEL AGUA ABSORBIDA (g)		1.2	0.6	1.0	
14	VOLUMEN DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (cm ³)		502.4	502.6	500.2	
15	PORCENTAJE DE ABSORCION (%)		0.24	0.12	0.20	
16	PESO ESPECÍFICO BULK DE LA BRIQUETA (g/cm ³)		2.423	2.421	2.421	2.422
17	PESO ESPECÍFICO TEÓRICO MÁXIMO (RICE)-ASTM2041		2.533			
18	PORCENTAJE DE VACÍOS (%)		4.3	4.4	4.4	4.40
19	PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO TOTAL (g/cm ³)		2.729			
20	VACÍOS DE AGREGADO MINERAL (V.M.A.) (%)		16.1	16.2	16.2	16.2
21	VACÍOS LLENADOS CON CEMENTO ASFÁLTICO (%)		73.1	72.9	72.9	73.0
22	PESO ESPECÍFICO EFECTIVO DEL AGREGADO TOTAL		2.776			
23	ASFALTO ABSORVIDO POR EL AGREGADO TOTAL (%)		0.63			
24	PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO (%)		4.87			
25	FLUJO (mm)		4.6	4.1	4.6	4.4
26	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (kg)		1,469. 4	1,469. 4	1,469. 4	
27	FACTOR DE ESTABILIDAD		1.04	1.04	1.04	
28	ESTABILIDAD CORREGIDA (kg)		1,528. 0	1,528. 0	1,528. 0	1528.0
29	RELACIÓN ESTAB./FLUJO (kg/mm)		3,342. 1	3,759. 8	3,342. 1	3481.0

Nota. Tomada de *Mejoramiento del comportamiento mecánico de una MAC con polímero Elvaloy 4170 RET* (p.91) por Chávez, 2019.

Ensayo Marshall Mezcla Modificada (1.4% RET) con 6.0% de asfalto. Caso 2

ENSAYO MARSHALL (ASTM D 1559 – MTC E 504)					
Nº	Denominación	1	2	3	Promedio
1	CEMENTO ASFÁLTICO EN PESO DE LA MEZCLA TOTAL (%)	6.0			
2	AGREGADO GRUESO (> N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	37.60			
3	AGREGADO FINO (< N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	56.40			
4	FILLER (MÍNIMO 65% PASA N° 200) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	0.00			
5	PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO - APARENTE	1.010			
6	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO-BULK (< 1")	2.734			
7	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO FINO - BULK	2.725			
8	PESO ESPECÍFICO DEL FILLER - APARENTE	-			-
9	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.23	6.24	6.19	
10	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (1) (g)	1,218.2	1,223.0	1,213.6	
11	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AIRE (g)	1,219.0	1,224.8	1,214.2	
12	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AGUA (g)	713.8	719.0	712.0	
13	PESO DEL AGUA ABSORBIDA (g)	0.8	1.8	0.6	
14	VOLUMEN DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (cm ³)	505.2	505.8	502.2	
15	PORCENTAJE DE ABSORCION (%)	0.16	0.36	0.12	
16	PESO ESPECÍFICO BULK DE LA BRIQUETA (g/cm ³)	2.411	2.418	2.417	2.414
17	PESO ESPECÍFICO TEÓRICO MÁXIMO (RICE)-ASTM2041	2.513			
18	PORCENTAJE DE VACÍOS (%)	4.0	3.8	4.1	3.9
19	PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO TOTAL (g/cm ³)	2.729			
20	VACÍOS DE AGREGADO MINERAL (V.M.A.) (%)	16.9	16.7	16.3	16.8
21	VACÍOS LLENADOS CON CEMENTO ASFÁLTICO (%)	76.2	77.5	74.6	76.7
22	PESO ESPECÍFICO EFECTIVO DEL AGREGADO TOTAL	2.776			
23	ASFALTO ABSORVIDO POR EL AGREGADO TOTAL (%)	0.63			
24	PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO (%)	5.37			
25	FLUJO (mm)	4.6	4.6	4.8	4.7
26	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (kg)	1,497.7	1,493.0	1,592.0	
27	FACTOR DE ESTABILIDAD	1.04	1.04	1.04	
28	ESTABILIDAD CORREGIDA (kg)	1,558.0	1,553.0	1,656.0	1589.0
29	RELACIÓN ESTAB./FLUJO (kg/mm)	3,407.7	3,396.8	3,431.4	3412.0

Nota. Tomada de *Mejoramiento del comportamiento mecánico de una MAC con polímero Elvaloy 4170 RET* (p.92) por Chávez, 2019.

Ensayo Marshall Mezcla Modificada (1.4% RET) con 6.5% de asfalto. Caso 2

Ensayo marshall (astm d 1559 – mtc e 504)					
N°	Denominación	1	2	3	Promedio
1	CEMENTO ASFÁLTICO EN PESO DE LA MEZCLA TOTAL (%)	6.5			
2	AGREGADO GRUESO (> N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	37.40			
3	AGREGADO FINO (< N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	56.10			
4	FILLER (MÍNIMO 65% PASA N° 200) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	0.00			
5	PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO - APARENTE	1.010			
6	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO-BULK (< 1")	2.734			
7	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO FINO - BULK	2.725			
8	PESO ESPECÍFICO DEL FILLER - APARENTE	-			-
9	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.29	6.30	6.30	
10	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (1) (g)	1,229.4	1,233.0	1,233.0	
11	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AIRE (g)	1,230.2	1,243.2	1,234.2	
12	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AGUA (g)	720.2	723.8	723.8	
13	PESO DEL AGUA ABSORBIDA (g)	0.8	1.2	1.2	
14	VOLUMEN DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (cm ³)	510.0	510.4	510.4	
15	PORCENTAJE DE ABSORCION (%)	0.16	0.24	0.24	
16	PESO ESPECÍFICO BULK DE LA BRIQUETA (g/cm ³)	2.411	2.416	2.416	2.414
17	PESO ESPECÍFICO TEÓRICO MÁXIMO (RICE)-ASTM2041	2.493			
18	PORCENTAJE DE VACÍOS (%)	3.3	3.1	3.1	3.2
19	PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO TOTAL (g/cm ³)	2.729			
20	VACÍOS DE AGREGADO MINERAL (V.M.A.) (%)	17.4	17.2	17.2	17.3
21	VACÍOS LLENADOS CON CEMENTO ASFÁLTICO (%)	81.0	82.0	82.0	81.7
22	PESO ESPECÍFICO EFECTIVO DEL AGREGADO TOTAL	2.776			
23	ASFALTO ABSORVIDO POR EL AGREGADO TOTAL (%)	0.63			
24	PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO (%)	5.87			
25	FLUJO (mm)	5.1	5.1	5.1	5.1
26	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (kg)	1,502.4	1,691.1	1,502.4	
27	FACTOR DE ESTABILIDAD	1.00	1.00	1.00	
28	ESTABILIDAD CORREGIDA (kg)	1,502.0	1,691.0	1,502.0	1565.0
29	RELACIÓN ESTAB/FLUJO (kg/mm)	2,956.7	3,328.7	2,956.7	3081.0

Nota. Tomada de *Mejoramiento del comportamiento mecánico de una MAC con polímero Elvaloy 4170 RET* (p.93) por Chávez, 2019.

Caso 2: Ensayo Marshall de la Mezcla Modificada con 1.7% Elvaloy

Ensayo Marshall Mezcla Modificada (1.7% RET) con 4.0% de asfalto. Caso 2

Ensayo marshall (ASTM D 1559 – MTC E 504)					
N°	Denominación	1	2	3	Promedio
1	CEMENTO ASFÁLTICO EN PESO DE LA MEZCLA TOTAL (%)	4.0			
2	AGREGADO GRUESO (> N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	38.4			
3	AGREGADO FINO (< N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	57.6			
4	FILLER (MÍNIMO 65% PASA N° 200) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	0.00			
5	PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO - APARENTE	1.010			
6	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO-BULK (< 1")	2.734			
7	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO FINO - BULK	2.725			
8	PESO ESPECÍFICO DEL FILLER - APARENTE	-			-
9	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.17	6.16	6.16	
10	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (1) (g)	1200.2	1196.8	1200.5	
11	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AIRE (g)	1202.4	1203.3	1205.2	
12	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AGUA (g)	702.5	704.1	705.6	
13	PESO DEL AGUA ABSORBIDA (g)	2.2	6.5	4.7	
14	VOLUMEN DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (cm ³)	499.9	499.2	499.6	
15	PORCENTAJE DE ABSORCIÓN (%)	0.44	1.30	0.94	
16	PESO ESPECÍFICO BULK DE LA BRIQUETA (g/cm ³)	2.401	2.397	2.403	2.400
17	PESO ESPECÍFICO TEÓRICO MÁXIMO (RICE)-ASTM2041	2.592			
18	PORCENTAJE DE VACÍOS (%)	7.4	7.5	7.3	7.4
19	PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO TOTAL (g/cm ³)	2.729			
20	VACÍOS DE AGREGADO MINERAL (V.M.A.) (%)	15.5	15.7	15.5	15.6
21	VACÍOS LLENADOS CON CEMENTO ASFÁLTICO (%)	52.5	52.2	53	52.6
22	PESO ESPECÍFICO EFECTIVO DEL AGREGADO TOTAL	2.773			
23	ASFALTO ABSORVIDO POR EL AGREGADO TOTAL (%)	0.59			
24	PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO (%)	3.41			
25	FLUJO (mm)	2.8	2.8	3.0	2.9
26	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (kg)	1332.8	1295.1	1309.2	
27	FACTOR DE ESTABILIDAD	1.04	1.04	1.04	
28	ESTABILIDAD CORREGIDA (kg)	1386.0	1347.0	1362.0	1565.0
29	RELACIÓN ESTAB./FLUJO (kg/mm)	4960.6	4821.0	4468.5	4750.0

Nota. Tomada de Mejoramiento del comportamiento mecánico de una MAC con polímero Elvaloy 4170 RET (p.97) por Chávez, 2019.

Ensayo Marshall Mezcla Modificada (1.7% RET) con 4.5% de asfalto. Caso 2

Ensayo marshall (ASTM D 1559 – MTC E 504)					
N°	Denominación	1	2	3	Promedio
1	CEMENTO ASFÁLTICO EN PESO DE LA MEZCLA TOTAL (%)	4.5			
2	AGREGADO GRUESO (> N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	38.2			
3	AGREGADO FINO (< N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	57.3			
4	FILLER (MÍNIMO 65% PASA N° 200) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	0.00			
5	PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO - APARENTE	1.010			
6	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO-BULK (< 1")	2.734			
7	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO FINO - BULK	2.725			
8	PESO ESPECÍFICO DEL FILLER - APARENTE	-			-
9	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.15	6.16	6.15	
10	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (1) (g)	1198.8	1202.2	1199.2	
11	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AIRE (g)	1202.6	1205.8	1200.5	
12	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AGUA (g)	704.2	706.5	702.0	
13	PESO DEL AGUA ABSORBIDA (g)	3.8	3.6	1.3	
14	VOLUMEN DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (cm ³)	498.4	499.3	498.5	
15	PORCENTAJE DE ABSORCIÓN (%)	0.76	0.72	0.26	
16	PESO ESPECÍFICO BULK DE LA BRIQUETA (g/cm ³)	2.405	2.408	2.406	2.406
17	PESO ESPECÍFICO TEÓRICO MÁXIMO (RICE)-ASTM2041	2.555			
18	PORCENTAJE DE VACÍOS (%)	5.9	5.8	5.9	5.8
19	PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO TOTAL (g/cm ³)	2.729			
20	VACÍOS DE AGREGADO MINERAL (V.M.A.) (%)	15.8	15.7	15.8	15.8
21	VACÍOS LLENADOS CON CEMENTO ASFÁLTICO (%)	62.9	63.3	63.0	63.1
22	PESO ESPECÍFICO EFECTIVO DEL AGREGADO TOTAL	2.753			
23	ASFALTO ABSORVIDO POR EL AGREGADO TOTAL (%)	0.33			
24	PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO (%)	4.17			
25	FLUJO (mm)	3.0	3.0	3.3	3.1
26	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (kg)	1409.9	1409.9	1414.5	
27	FACTOR DE ESTABILIDAD	1.04	1.04	1.04	
28	ESTABILIDAD CORREGIDA (kg)	1466.0	1466.0	1471.0	1468.0
29	RELACIÓN ESTAB/FLUJO (kg/mm)	4809.7	4809.7	4454.9	4691.0

Nota. Tomada de *Mejoramiento del comportamiento mecánico de una MAC con polímero Elvaloy 4170 RET* (p.98) por Chávez, 2019.

Ensayo Marshall Mezcla Modificada (1.7% RET) con 5.0% de asfalto. Caso 2

Ensayo marshall (ASTM D 1559 – MTC E 504)					
Nº	Denominación	1a	2	3	Promedio
1	CEMENTO ASFÁLTICO EN PESO DE LA MEZCLA TOTAL (%)		5.0		
2	AGREGADO GRUESO (> N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)		38.0		
3	AGREGADO FINO (< N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)		57.0		
4	FILLER (MÍNIMO 65% PASA N° 200) EN PESO DE LA MEZCLA (%)		0.00		
5	PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO - APARENTE		1.010		
6	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO-BULK (< 1")		2.734		
7	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO FINO - BULK		2.725		
8	PESO ESPECÍFICO DEL FILLER - APARENTE		-		-
9	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.15	6.17	6.17	
10	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (1) (g)	1207.0	1209.8	1209.8	
11	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AIRE (g)	1210.6	1213.2	1213.2	
12	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AGUA (g)	712.2	713.2	713.2	
13	PESO DEL AGUA ABSORBIDA (g)	3.6	3.4	3.4	
14	VOLUMEN DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (cm ³)	498.4	500.0	500.0	
15	PORCENTAJE DE ABSORCIÓN (%)	0.72	0.68	0.68	
16	PESO ESPECÍFICO BULK DE LA BRIQUETA (g/cm ³)	2.422	2.420	2.420	2.420
17	PESO ESPECÍFICO TEÓRICO MÁXIMO (RICE)-ASTM2041		2.539		
18	PORCENTAJE DE VACÍOS (%)	4.6	4.7	4.7	4.7
19	PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO TOTAL (g/cm ³)		2.729		
20	VACÍOS DE AGREGADO MINERAL (V.M.A.) (%)	15.7	15.8	15.8	15.8
21	VACÍOS LLENADOS CON CEMENTO ASFÁLTICO (%)	70.6	70.3	70.3	70.4
22	PESO ESPECÍFICO EFECTIVO DEL AGREGADO TOTAL		2.759		
23	ASFALTO ABSORVIDO POR EL AGREGADO TOTAL (%)		0.40		
24	PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO (%)		4.60		
25	FLUJO (mm)	3.6	3.6	3.6	3.6
26	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (kg)	1474.1	1474.1	1474.1	
27	FACTOR DE ESTABILIDAD	1.04	1.04	1.04	
28	ESTABILIDAD CORREGIDA (kg)	1533.0	1533.0	1533.0	1533.0
29	RELACIÓN ESTAB./FLUJO (kg/mm)	4311.0	4311.0	4311.0	4311.0

Nota. Tomada de *Mejoramiento del comportamiento mecánico de una MAC con polímero Elvaloy 4170 RET* (p.99) por Chávez, 2019.

Ensayo Marshall Mezcla Modificada (1.7% RET) con 5.5% de asfalto. Caso 2

Ensayo marshall (ASTM D 1559 – MTC E 504)					
N°	Denominación	1	2	3	Promedio
1	CEMENTO ASFÁLTICO EN PESO DE LA MEZCLA TOTAL (%)	5.5			
2	AGREGADO GRUESO (> N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	37.8			
3	AGREGADO FINO (< N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	56.7			
4	FILLER (MÍNIMO 65% PASA N° 200) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	0.00			
5	PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO - APARENTE	1.010			
6	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO-BULK (< 1")	2.734			
7	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO FINO - BULK	2.725			
8	PESO ESPECÍFICO DEL FILLER - APARENTE	-			-
9	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.21	6.22	6.23	
10	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (1) (g)	1216.8	1216.9	1217.2	
11	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AIRE (g)	1218.0	1224.8	1220.0	
12	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AGUA (g)	714.5	720.2	715.0	
13	PESO DEL AGUA ABSORBIDA (g)	1.2	7.9	2.8	
14	VOLUMEN DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (cm ³)	503.5	504.6	505.0	
15	PORCENTAJE DE ABSORCION (%)	0.24	1.57	0.55	
16	PESO ESPECÍFICO BULK DE LA BRIQUETA (g/cm ³)	2.417	2.412	2.410	2.413
17	PESO ESPECÍFICO TEÓRICO MÁXIMO (RICE)-ASTM2041	2.506			
18	PORCENTAJE DE VACÍOS (%)	3.6	3.8	3.8	3.7
19	PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO TOTAL (g/cm ³)	2.729			
20	VACÍOS DE AGREGADO MINERAL (V.M.A.) (%)	16.3	16.5	16.5	16.4
21	VACÍOS LLENADOS CON CEMENTO ASFÁLTICO (%)	78.2	77.2	76.8	77.4
22	PESO ESPECÍFICO EFECTIVO DEL AGREGADO TOTAL	2.742			
23	ASFALTO ABSORVIDO POR EL AGREGADO TOTAL (%)	0.18			
24	PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO (%)	5.32			
25	FLUJO (mm)	3.8	3.8	3.8	3.8
26	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (kg)	1309.2	1356.3	1332.8	
27	FACTOR DE ESTABILIDAD	1.04	1.04	1.04	
28	ESTABILIDAD CORREGIDA (kg)	1362.0	1411.0	1386.0	1386.0
29	RELACIÓN ESTAB./FLUJO (kg/mm)	3574.8	3703.4	3637.8	3639.0

Nota. Tomada de *Mejoramiento del comportamiento mecánico de una MAC con polímero Elvaloy 4170 RET* (p.100) por Chávez, 2019.

Ensayo Marshall Mezcla Modificada (1.7% RET) con 6.0% de asfalto. Caso 2

Ensayo marshall (ASTM D 1559 – MTC E 504)					
N°	Denominación	1	2	3	Promedio
1	CEMENTO ASFÁLTICO EN PESO DE LA MEZCLA TOTAL (%)	6.0			
2	AGREGADO GRUESO (> N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	37.6			
3	AGREGADO FINO (< N° 4) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	56.4			
4	FILLER (MÍNIMO 65% PASA N° 200) EN PESO DE LA MEZCLA (%)	0.0			
5	PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO - APARENTE	1.010			
6	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO-BULK (< 1")	2.734			
7	PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO FINO - BULK	2.725			
8	PESO ESPECÍFICO DEL FILLER - APARENTE	-			
9	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.20	6.21	6.24	
10	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (1) (g)	1218.4	1224.0	1225.0	
11	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AIRE (g)	1223.4	1224.2	1225.9	
12	PESO DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA EN AGUA (g)	721.0	720.5	720.2	
13	PESO DEL AGUA ABSORBIDA (g)	5.0	0.2	0.9	
14	VOLUMEN DE LA BRIQUETA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (cm ³)	502.4	503.7	505.7	
15	PORCENTAJE DE ABSORCION (%)	1.00	0.04	0.18	
16	PESO ESPECÍFICO BULK DE LA BRIQUETA (g/cm ³)	2.425	2.430	2.422	2.426
17	PESO ESPECÍFICO TEÓRICO MÁXIMO (RICE)-ASTM2041	2.492			
18	PORCENTAJE DE VACÍOS (%)	2.7	2.5	2.8	2.7
19	PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO TOTAL (g/cm ³)	2.729			
20	VACÍOS DE AGREGADO MINERAL (V.M.A.) (%)	16.5	16.3	16.6	16.5
21	VACÍOS LLENADOS CON CEMENTO ASFÁLTICO (%)	83.8	84.7	83.2	83.9
22	PESO ESPECÍFICO EFECTIVO DEL AGREGADO TOTAL	2.750			
23	ASFALTO ABSORVIDO POR EL AGREGADO TOTAL (%)	0.28			
24	PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO (%)	5.72			
25	FLUJO (mm)	4.1	4.1	4.1	4.1
26	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (kg)	1168.0	1191.5	1177.4	
27	FACTOR DE ESTABILIDAD	1.04	1.04	1.04	
28	ESTABILIDAD CORREGIDA (kg)	1215.0	1239.0	1224.0	1226.0
29	RELACIÓN ESTAB./FLUJO (kg/mm)	2989.7	3048.7	3011.8	3017.0

Nota. Tomada de Mejoramiento del comportamiento mecánico de una MAC con polímero Elvaloy 4170 RET (p.101) por Chávez, 2019.

Ensayo Marshall a la Mezcla Convencional con asfalto AC-20. Caso 3.

PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE																							
AGREGADO: Tipo A. RÍO PITA (Naranjo-López) 5% Grueso(3/4"), 40% Medio (1/2"), 55% Fino (Arena) Gsb = 2,489 ASFALTO: AC-20 (Clasificado por viscosidad) Ga = 1,012																							
TIPO MEZCLA ASFÁLTICA: Densa gruesa de TMN de 12,5 mm (1/2") PARÁMETRO DE DISEÑO: Compactación : 75 golpes Estabilidad: 1800 lb (816 kg) Flujo: 8-14 (0.25 mm) % de vacíos de aire: 3-5%																							
%	No. Briqueta	PESO (gramos)			Volumen	GRAVEDAD ESPECÍFICA			VOLUMEN % DEL TOTAL			V.A.M	V.F.A	Relación Filler/Asfalt (f/a)	ESTABILIDAD (kg)			FLUJO (1/100")					
		Seco aire	SSS aire	En agua		BULK (Gmb)	Max. teórico (Gmm)	Mix. medido RICE (Gmm)	% asfalto absorbido (Paa)	Agregado (VA)	Vacíos aire (Vv)				Asf. Efic. (Vae)	Vacíos Llenos de Asfalto	% asfalto efectivo (Pae)		Lectura	Medida	Factor de corrección		
a		b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	
					e-d			$\frac{(b-c)100}{Gsb}$	$\frac{(b-c)100}{G^*g(100-a)}$	$\frac{100 \cdot a \cdot f}{Gsb}$	$\frac{(b-c) \cdot 100}{h}$	100-j-k	100-l	$\frac{(m-k) \cdot 100}{m}$	$\frac{a \cdot (100-a)}{100}$								
5,5	1	1099	1103	600	503	2,185												481	1612	1,04	1676	9	
	2	1107	1111	603	508	2,179												464	1556	1,04	1618	8	
	3	1047	1051	576	475	2,204												500	1676	1,14	1911	8	
		Promedio				2,189	2,304	2,364	0,12	83,13	7,39	9,49	16,87	56,22	5,39	1,13	2189				1735	8,0	
6,0	4	1020	1023	560	463	2,203												486	1629	1,19	1939	10	
	5	1114	1117	613	504	2,210												563	1886	1,04	1961	9	
	6	1066	1069	586	483	2,207												545	1826	1,09	1990	10	
		Promedio				2,207	2,288	2,355	0,13	83,34	6,28	10,37	16,66	62,27	5,88	1,03	2207				1963	10,0	
6,5	7	1026	1027	568	459	2,235												540	1809	1,19	2153	12	
	8	1067	1069	590	479	2,228												468	1569	1,14	1789	11	
	9	1044	1045	577	468	2,231												476	1596	1,19	1899	12	
		Promedio				2,231	2,273	2,340	0,13	83,82	4,65	11,53	16,18	71,25	6,37	0,95	2231				1947	12,0	
7,0	10	1047	1049	580	469	2,232												506	1696	1,19	2018	12	
	11	1108	1109	614	495	2,238												504	1689	1,09	1841	16	
	12	1028	1029	570	459	2,240												458	1536	1,19	1828	14	
		Promedio				2,237	2,258	2,327	0,14	83,58	3,89	12,53	16,42	76,30	6,87	0,89	2237				1896	14,0	
											3-5		>13	65-75	0,8-1,2							>816	8-14

Tomado de López y Puma (2017) p. 162.