



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



**INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE PAVIMENTO RECICLADO
EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA MEZCLA
ASFÁLTICA Y BASE GRANULAR EN LA AV. LA TORRE DE LA
CIUDAD DE PUNO, 2021**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. LIPE LUQUE FIDEL FORTUNATO

Bach. VALERIANO MOLLO ANDY HENRY

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO – PERÚ

2023



Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE PAVIMENTO RECICLADO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA Y BASE GRANULAR EN LA AV. LA TORRE DE LA CIUDAD DE PUNO, 2021

AUTOR

**FIDEL FORTUNATO - ANDY HENRY LIPE
LUQUE - VALERIANO MOLLO**

RECuento de palabras

76251 Words

RECuento de caracteres

364377 Characters

RECuento de páginas

362 Pages

Tamaño del archivo

7.2MB

Fecha de entrega

Jun 7, 2023 3:06 PM GMT-5

Fecha del informe

Jun 7, 2023 3:09 PM GMT-5

● 13% de similitud general

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

- 11% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 7% Base de datos de trabajos entregados
- 3% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

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



UNA
PUNO

Firmado digitalmente por
HUAQUISTO CACERES Samuel
FAU 20145496170 soft
Motivo: Doy V° B°
Fecha: 07.06.2023 15:36:16 -05:00

V°B°

Firmado digitalmente por CASTILLO
ARONI Emilio FAU 20145496170
soft
Motivo: Doy V° B°
Fecha: 06.06.2023 10:31:37 -05:00

Resumen



DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi madre Leticia Laura Luque Luque, a mi abuela Faustina Luque Arapa, a mi hermana Kelly Lipe Luque por haber estado presentes y brindarme apoyo en el transcurso de mi vivir cotidiano, y a mis amigos Andy, Esther, Adan, Yareta, Yulius y Pedro.

Fidel Fortunato Lipe Luque.



DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mi madre Blanca, a mi abuela Margarita, a mi padre Edgar y a mis hermanos: Oliver y Henry, quienes son los pilares de mi vida también a mis amigos Fidel, Adan, Yareta, Yulius y Pedro.

Andy Henry Valeriano Mollo.



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil por ser el Alma Mater de nuestra formación y una fuente de conocimientos para poder realizar este proyecto de investigación.

Al Dr. Samuel Huaquisto Cáceres por su orientación, asesoramiento y su continuo apoyo en la elaboración de este trabajo de investigación.

A los miembros del jurado: D.Sc. Félix Rojas Chahuares, Ing. César Edwin Guerra Ramos y M.Sc. Mariano Roberto García Loayza por su rigurosidad, correcciones y comprensión en la evaluación durante la elaboración del presente estudio.

A la plana de docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, por guiarnos y enseñarnos durante los años de estudio.

Fidel Fortunato Lipe Luque

Andy Henry Valeriano Mollo.



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 33

ABSTRACT..... 34

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 35

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA..... 36

1.2.1 Problema general 36

1.2.2 Problemas específicos 36

1.3 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN 37

1.3.1 Hipótesis general..... 37

1.3.2 Hipótesis específicas..... 37

1.4 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO 37

1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN 38

1.5.1 Objetivo General..... 38

1.5.2 Objetivos Específicos 38

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES 39

2.1.1 Antecedentes internacionales..... 39

2.1.2 Antecedentes nacionales 43

2.1.3 Antecedentes locales o regionales 47

2.2 MARCO TEÓRICO..... 49

2.2.1 Pavimentos..... 49

2.2.2 Pavimento flexible 61



2.2.3	Mezclas asfálticas	62
2.2.4	Diseño de mezclas asfálticas.....	76
2.2.5	Pavimento asfáltico reciclado	86
2.2.6	Mejoramiento de base con pavimento asfáltico reciclado	98

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	ÁMBITO DE ESTUDIO.....	100
3.2	PERIODO DE ESTUDIO.....	101
3.3	PROCEDENCIA DEL MATERIAL UTILIZADO	101
3.3.1	Pavimento asfáltico reciclado	101
3.3.2	Material base granular	103
3.3.3	Agregados	104
3.3.4	Asfalto PEN 120-150.....	105
3.3.5	Filler (cemento portland tipo IP)	107
3.4	JUSTIFICACIÓN DEL PORCENTAJE DE RAP	108
3.5	DISEÑO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.....	108
3.5.1	Tipo de investigación.....	108
3.5.2	Nivel de investigación	108
3.5.3	Población y muestra.....	108
3.6	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	111
3.6.1	Propiedades de los materiales	111
3.7	DISEÑO ESTADÍSTICO Y PRUEBA DE HIPÓTESIS.....	232
3.7.1	Análisis estadístico	232
3.7.2	Prueba de hipótesis	234

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE PARA CARPETA ASFÁLTICA (MUESTRA PATRÓN)	237
4.1.1	Resultados de ensayo de Flujo Marshall de la muestra patrón (Mezcla asfáltica en caliente tipo MAC-1)	238
4.1.2	Resultados de ensayo de estabilidad Marshall de la muestra patrón (Mezcla asfáltica en caliente tipo MAC-1)	239



4.1.3	Resultados de peso específico a diferentes % de cemento asfáltico de la muestra patrón (Mezcla asfáltica en caliente tipo MAC-1)	241
4.1.4	Resultados del % de vacíos de la Mezcla asfáltica en caliente tipo MAC-1	242
4.1.5	Resultados del ensayo de efecto de la humedad en mezclas asfálticas (Lottman Modificado) de la muestra patrón (Mezcla asfáltica en caliente tipo MAC-1).....	244
4.2	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (RAP)	246
4.2.1	Resultados de ensayo extracción cuantitativa de cemento asfáltico del pavimento asfáltico reciclado (RAP)	246
4.2.2	Resultados de ensayo de granulometría de los agregados del pavimento asfáltico reciclado (RAP)	247
4.2.3	Resultados de ensayo de Flujo Marshall del pavimento asfáltico reciclado (RAP)	249
4.2.4	Resultados de ensayo de estabilidad Marshall del pavimento asfáltico reciclado (RAP).....	251
4.2.5	Resultados de peso específico a diferentes % de cemento asfáltico añadido al pavimento asfáltico reciclado (RAP).....	253
4.2.6	Resultado de vacíos a diferentes % de cemento asfáltico añadido al pavimento asfáltico reciclado (RAP)	254
4.3	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE PATRÓN ADICIONADO CON PAVIMENTOS ASFÁLTICO RECICLADO (RAP)	256
4.3.1	Resultados de ensayo de Flujo Marshall de mezcla asfáltica en caliente adicionado con pavimentos asfáltico reciclado (RAP).....	256
4.3.2	Resultados de ensayo de estabilidad Marshall de mezcla asfáltica en caliente adicionado con pavimentos asfáltico reciclado (RAP)	258
4.3.3	Resultados de peso específico de mezcla asfáltica en caliente adicionado con pavimentos asfáltico reciclado (RAP)	260
4.3.4	Resultados del % de vacío de mezcla asfáltica en caliente adicionado con pavimentos asfáltico reciclado (RAP).....	261



4.3.5	Resultados del ensayo de efecto de la humedad en mezclas asfálticas (Lottman Modificado) de mezcla asfáltica en caliente adicionado con pavimentos asfáltico reciclado (RAP)	263
4.4	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CBR PARA LA BASE GRANULAR PATRÓN Y PARA LA BASE GRANULAR ADICIONADO CON PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (RAP)	266
4.5	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	269
4.5.1	Análisis estadístico de los resultados del ensayo de flujo Marshall de la mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1	269
4.5.2	Análisis estadístico de los resultados del ensayo de flujo Marshall de la mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 15%.....	270
4.5.3	Análisis estadístico de los resultados del ensayo de flujo Marshall de la mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 25%... ..	272
4.5.4	Análisis estadístico de los resultados del ensayo de flujo Marshall de la mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 35%... ..	273
4.5.5	Análisis estadístico de los resultados del ensayo de flujo Marshall de la mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 45%... ..	275
4.5.6	Análisis estadístico de los resultados del ensayo de estabilidad Marshall de la mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1	276
4.5.7	Análisis estadístico de los resultados del ensayo de estabilidad Marshall de la mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 15%.....	277
4.5.8	Análisis estadístico de los resultados del ensayo de estabilidad Marshall de la mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 25%.....	279
4.5.9	Análisis estadístico de los resultados del ensayo de estabilidad Marshall de la mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 35%.....	280



4.5.10	Análisis estadístico de los resultados del ensayo de estabilidad Marshall de la mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 45%.....	282
4.5.11	Análisis estadístico de los resultados del peso específico de las probetas de mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1	283
4.5.12	Análisis estadístico de los resultados del peso específico de las probetas de mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 15%.....	285
4.5.13	Análisis estadístico de los resultados del peso específico de las probetas de mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 25%.....	286
4.5.14	Análisis estadístico de los resultados del peso específico de las probetas de mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 35%.....	288
4.5.15	Análisis estadístico de los resultados del peso específico de las probetas de mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 45%.....	289
4.5.16	Análisis estadístico de los resultados del % de vacíos de mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1.....	291
4.5.17	Análisis estadístico de los resultados del % de vacíos de mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 15%.....	292
4.5.18	Análisis estadístico de los resultados del % de vacíos de mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 25%.....	294
4.5.19	Análisis estadístico de los resultados del % de vacíos de mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 35%	295
4.5.20	Análisis estadístico de los resultados del % de vacíos de mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 45%	297
4.5.21	Análisis estadístico del ensayo de efecto de humedad (Lottman modificado) en mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1	298



4.5.22	Análisis estadístico de los resultados del ensayo de efecto de humedad (Lottman modificado) en mezclas asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 39%	302
4.5.23	Análisis estadístico de los resultados del ensayo de CBR (0.1 plg) de la base granular patrón	305
4.5.24	Análisis estadístico de los resultados del ensayo de CBR (0.1 plg) de la base granular patrón y de la base granular añadida con pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 15.0%	306
4.5.25	Análisis estadístico de los resultados del ensayo de CBR de la base granular patrón y de la base granular añadida con pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 30.0%	308
4.5.26	Análisis estadístico de los resultados del ensayo de CBR de la base granular patrón y de la base granular añadida con pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 45.0%	309
4.5.27	Análisis estadístico de los resultados del ensayo de CBR de la base granular patrón y de la base granular añadida con pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 60.0%	311
4.6	PRUEBA DE HIPÓTESIS – CONTRASTACIÓN	312
4.6.1	Flujo	313
4.6.2	Estabilidad	320
4.6.3	Efecto de la humedad en mezclas asfálticas – Lottman modificado (resistencia a la tracción)	328
4.6.4	Ensayo de relación de soporte de California (CBR)	332
4.7	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	339
4.7.1	Del flujo Marshall de la mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 y la adición de pavimento asfáltico reciclado (RAP) al MAC-1	339
4.7.2	De la Estabilidad Marshall de la mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 y la adición de pavimento asfáltico reciclado (RAP) al MAC-1	340
4.7.3	Del daño inducido por humedad en mezclas asfálticas (Lottman modificado) mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 y la adición de pavimento asfáltico reciclado (RAP) al MAC-1	342
4.7.4	Del % de CBR (0.1”) de la base granular patrón adicionada con pavimento asfáltico reciclado (RAP)	343



V. CONCLUSIONES.....	345
VI. RECOMENDACIONES	347
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	348
ANEXOS.....	354

ÁREA: Transportes

TEMA: Reciclado de pavimento

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Transportes y gestión vial

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 16 de junio del 2023



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Estructura de un pavimento flexible.	53
Figura 2	Cálculo del índice de condición aplicado en del pavimento flexible en la av. Las palmeras de piura, 2009	60
Figura 3	Evaluación superficial del pavimento flexible del Jr. José Gálvez del distrito de Lince aplicando el método del PCI (2015).	61
Figura 4	Comportamiento de una mezcla asfáltica.	63
Figura 5	Curva de viscosidad vs temperatura de los cementos asfálticos.....	84
Figura 6	Ubicación de extracción de pavimento asfáltico reciclado (Av. la Torre - Puno).	102
Figura 7	Muestreo y extracción de pavimento asfáltico reciclado de Av. la Torre - Puno.	102
Figura 8	Ubicación del lugar de obtención de material para base granular (Cantera Taparachi – Juliaca).	103
Figura 9	Muestreo de material para base granular patrón.	103
Figura 10	Ubicación del lugar de obtención de agregado para mezclas asfálticas en caliente (Planta de Asfalto Municipal - Juliaca).	104
Figura 11	Extracción de agregados para diseño de mezcla asfáltica en caliente patrón.	105
Figura 12	Extracción de cemento asfáltico PEN 120-150.	105
Figura 13	Ensayo de contenido de humedad para material de base granular patrón.	113
Figura 14	Ensayo de granulometría para la base granular.	114
Figura 15	Curva granulométrica de la base granular - gradación A.	117
Figura 16	Ensayo para determinar el índice plástico.	119
Figura 17	Determinación de límite líquido a 25 golpes.	121



Figura 18	Clasificación del material pasante de No 40.....	122
Figura 19	Curva para hallar el contenido de humedad óptimo para una densidad seca máxima.....	125
Figura 20	Ensayo de CBR para muestra patrón y base granular añadida con RAP (etapa sumergida).....	128
Figura 21	Comportamiento del CBR de la base granular patrón.	130
Figura 22	Curva granulométrica de la piedra chancada TMN 3/4".	133
Figura 23	Curva granulométrica de la arena zarandeada.	134
Figura 24	Curva granulométrica de la arena chancada.	136
Figura 25	Sistema de ecuaciones lineales.	136
Figura 26	Curva granulométrica de la combinación teórica de los agregados incluyendo filler (huso MAC-1).	140
Figura 27	Ensayo de desgaste por abrasión.....	143
Figura 28	Ensayo de equivalente arena.....	146
Figura 29	Ensayo de partículas chatas y alargadas.	148
Figura 30	Ensayos para determinar el índice plástico.....	152
Figura 31	Ensayo de partículas con 01 y 02 caras fracturadas.....	154
Figura 32	Ensayo de azul de metileno.....	158
Figura 33	Ensayo para determinar peso específico del agregado grueso.....	160
Figura 34	Ensayo para determinar peso específico del agregado fino.	162
Figura 35	Elaboración de briquetas de 4 plg de diámetro por el método Marshall. ..	166
Figura 36	Determinación de gravedad Bulk de los especímenes de mezcla asfáltica en caliente compactados.	167
Figura 38	Ensayo para determinación de peso específico máximo teórico (RICE)...	169
Figura 38	Ensayo de estabilidad y flujo Marshall.....	172



Figura 39 Comportamiento del peso unitario en relación al aumento de PEN en MAC-1.....	181
Figura 40 Comportamiento del % de vacíos a la adición de PEN en MAC-1.	181
Figura 41 Evolución del % de VAM a la adición de PEN en MAC-1.....	181
Figura 42 Evolución del % V.LL.C.A en relación a la adición de PEN en MAC-1..	182
Figura 43 Evolución del flujo en relación a la adición de PEN en MAC-1.....	182
Figura 44 Evolución de la estabilidad en relación a la adición de PEN en MAC-1. .	182
Figura 45 Factor de rigidez del diseño de MAC-1 patrón.....	183
Figura 46 Ensayo para determinar el efecto de la humedad en MAC (Lottman modificado).....	187
Figura 47 Ensayo de extracción cuantitativa para extraer % de contenido de PEN del RAP.....	190
Figura 48 Granulometría del material de RAP.....	193
Figura 49 Rotura de briquetas (RAP + PEN 120-150) en prensa Marshall.	195
Figura 50 Evolución del peso específico de la combinación de RAP + PEN 120-150.	203
Figura 51 Evolución del % de vacíos de la combinación RAP + PEN 120-150.....	204
Figura 52 Evolución de flujo de la combinación RAP +PEN 120-150.....	205
Figura 53 Evolución de la estabilidad de la combinación de RAP + PEN 120-150..	205
Figura 54 Evolución del peso específico de la combinación MAC-1 + RAP.....	215
Figura 55 Evolución del % de vacíos de la combinación MAC-1 + RAP.....	216
Figura 56 Evolución de % de VAM de la combinación MAC-1 + RAP.	216
Figura 57 Evolución del % V.LL.C.A. de la combinación MAC-1 + RAP.....	217
Figura 58 Evolución del flujo de la combinación de MAC-1 + RAP.....	217
Figura 59 Evolución de la estabilidad de la combinación MAC-1 + RAP.	218



Figura 60	Evolución del factor de rigidez de la combinación MAC-1 + RAP.	218
Figura 61	Ensayo de CBR base granular adicionado con RAP.	220
Figura 62	Curva de esfuerzo vs penetración para base granular + RAP al 15%.	222
Figura 63	Curva esfuerzo vs penetración para base granular + RAP al 30%.	224
Figura 64	Curva de esfuerzo vs penetración para base granular + RAP al 45%.	226
Figura 66	Curva de esfuerzo vs penetración para base granular + RAP al 60%.	229
Figura 66	Evolución de % de CBR (0.1") para base granular + RAP.	230
Figura 67	Evolución de % de CBR (0.2") para base granular + RAP.	231
Figura 68	Evolución de la máxima densidad seca para la base granular + RAP.	231
Figura 69	Distribución campana de Gauss.	234
Figura 70	Rango de aceptación de hipótesis nula.	236
Figura 71	Resultados para el flujo de la combinación MAC-1 + PEN 120-150.	239
Figura 72	Resultados de estabilidad para MAC-1 + PEN 120-150.	240
Figura 73	Resultados del peso unitario para MAC-1 + PEN 120-150.	242
Figura 74	Resultados de % de vacíos para MAC-1 + PEN 120-150.	243
Figura 75	Resultado de resistencia a la tracción para MAC-1 + 5.9% de PEN.	245
Figura 76	Curva granulométrica para el RAP.	249
Figura 77	Resultados de flujo para RAP + PEN 120-150.	251
Figura 78	Resultados de estabilidad para RAP + PEN 120-150.	252
Figura 79	Resultados de peso unitario para RAP + PEN 120-150.	254
Figura 80	Resultados del % de vacíos para RAP + PEN 120-150.	255
Figura 81	Resultados del flujo para MAC-1 + RAP.	257
Figura 82	Resultados de estabilidad para MAC-1 + RAP.	259
Figura 83	Resultados del factor de rigidez para MAC-1 + RAP.	259
Figura 84	Resultados de peso unitario para MAC-1 + RAP.	261



Figura 85 Resultados del % de vacíos para MAC-1 + RAP.	262
Figura 86 Resultados de resistencia a la tracción para MAC-1 + RAP al 39%.	265
Figura 87 Comparación de resultados de resistencia ala tracción de MAC-1 patrón con MAC-1 + RAP al 39%.....	265
Figura 88 Resultados del % de CBR para base granular + RAP.....	267



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Requerimiento granulométrico para base granular.	54
Tabla 2	Requerimiento para subbase granular.	55
Tabla 3	Representación de la composición química elemental de un asfalto.	65
Tabla 4	Especificaciones técnicas del cemento asfáltico clasificado por penetración.	65
Tabla 5	Especificaciones técnicas del cemento asfáltico clasificado por viscosidad.	67
Tabla 6	Requerimientos para los agregados gruesos.	69
Tabla 7	Requerimientos para los agregados finos.	70
Tabla 8	Husos granulométricos para tipos de mezclas asfálticas en caliente.	72
Tabla 9	Porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral.	78
Tabla 10	Causas y efectos de inestabilidad de pavimentos.	79
Tabla 11	Rangos estandarizados para el diseño Marshall.	80
Tabla 12	Cantidad a secar de acuerdo al tamaño máximo nominal.	82
Tabla 13	Evolución de la densidad en el diseño Marshall.	85
Tabla 14	Valores típicos en mezclas bituminosas.	90
Tabla 15	Requerimientos de agregados gruesos de adición en mezclas recicladas en caliente.	91
Tabla 16	Requerimientos de agregados finos de adición en mezclas recicladas en caliente.	92
Tabla 17	Factores ambientales - causa y obtención de asfaltos modificados.	95
Tabla 18	Uso de cemento asfáltico graduados por penetración en función del clima.	106
Tabla 19	Tipos de asfalto y su uso según la altitud.	107



Tabla 20	Cantidad de ensayos Proctor realizados.....	109
Tabla 21	Cantidad de ensayos de CBR realizados.....	109
Tabla 22	Cantidad de briquetas realizadas para el diseño de mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1.....	110
Tabla 23	Cantidad de briquetas realizadas para el diseño de mezcla asfáltica en caliente del RAP.....	110
Tabla 24	Cantidad de ensayos de compactabilidad para MAC-1 y RAP.	111
Tabla 25	Cantidad de ensayos Lottman modificado.	111
Tabla 26	Resultados de contenido de humedad para la base granular patrón.....	113
Tabla 27	Datos iniciales para el ensayo de granulometría.....	115
Tabla 28	Resultado de ensayo de granulometría por tamizado.	115
Tabla 29	Análisis de resultados.	116
Tabla 30	Resultado del ensayo de límite líquido.	120
Tabla 31	Resultados del ensayo de límite plástico.	120
Tabla 32	Resumen de resultados de índice de plasticidad.	121
Tabla 33	Resultados del ensayo de Proctor Modificado para la base granular patrón.	124
Tabla 34	Resultados del ensayo de CBR para la base granular patrón.....	128
Tabla 35	Resumen de resultados de CBR para la base granular patrón.	130
Tabla 36	Datos iniciales de a granulometría de la piedra chancada.	132
Tabla 37	Resultados de la granulometría para piedra chancada de TMN 3/4".....	132
Tabla 38	Datos iniciales para granulométria de la arena zarandeada.	133
Tabla 39	Resultados de granulometría de arena zarandeada.	133
Tabla 40	Datos iniciales para la granulometría de la arena zarandeada.	135
Tabla 41	Resultados de granulometría de arena chancada.	135



Tabla 42	Combinación teórica de agregados para el huso granulométrico MAC-1.	138
Tabla 43	Huso granulométrico MAC-1.	140
Tabla 44	Resultados del ensayo de desgaste por abrasión e impacto.	143
Tabla 45	Resultados del ensayo de equivalente de arena.	146
Tabla 46	Resultados del ensayo de partículas chatas y alargadas por peso.	148
Tabla 47	Resultados del ensayo de partículas chatas y alargadas por conteo.	149
Tabla 48	Resultado del ensayo de límite líquido para pasante de la malla No 40 y No 200.	153
Tabla 49	Resultados del ensayo de caras fracturadas - una cara fracturada.	155
Tabla 50	Resultados del ensayo de caras fracturadas - dos caras fracturadas.	155
Tabla 51	Resultados del ensayo de desprendimiento de cemento asfáltico.	157
Tabla 52	Resultados del ensayo de azul de metileno.	159
Tabla 53	Resultados del ensayo de gravedad específica y absorción de piedra chancada TMN 3/4".	161
Tabla 54	Resultados del peso específico y absorción de la arena chancada.	163
Tabla 55	Resultados del peso específico y absorción de la arena zarandeada.	163
Tabla 56	Resultados del peso específico máximo (RICE) para los diferentes porcentajes de cemento asfáltico.	169
Tabla 57	Resultado de peso específico máximo teórico para contenido óptimo de asfalto 5.9%.	170
Tabla 58	Resultado del diseño Marshall para 5.5% de cemento asfáltico en el MAC-1 patrón.	172
Tabla 59	Resultado del diseño Marshall para 6.0% de cemento asfáltico en el MAC-1 patrón.	174



Tabla 60	Resultado del diseño Marshall para 6.5% de cemento asfáltico en el MAC-1 patrón.	175
Tabla 61	Resultado del diseño Marshall para 7.0% de cemento asfáltico en el MAC-1 patrón.	177
Tabla 62	Resumen de los resultados y características del diseño Marshall.....	179
Tabla 63	Requisitos para diseño de mezclas asfálticas en caliente.....	179
Tabla 64	Resultados teóricos de características para 5.9% óptimo de asfalto.....	180
Tabla 65	Resultados de comprobación de diseño Marshall para 5.9% de cemento asfáltico.	183
Tabla 66	Comparación de resultados de diseño Marshall (teórico - comprobación el laboratorio - parámetros m3nimos requeridos).....	185
Tabla 67	Resultados de ensayo Lottman modificado para 5.9% de cemento asfáltico en Mac-1.	188
Tabla 68	Resultados del ensayo de extracci3n cuantitativa de cemento asfáltico del RAP.....	190
Tabla 69	Datos iniciales para granulometr3a de RAP.	192
Tabla 70	Resultados de granulometr3a de los agregados del RAP.	192
Tabla 71	Resultados del peso espec3fico m3ximo te3rico de RAP adicionado con cemento asfáltico.	194
Tabla 72	Resultados de dise1o Marshall del RAP con 0.0% de cemento asfáltico..	196
Tabla 73	Resultados de dise1o Marshall del RAP con 0.5% de cemento asfáltico..	197
Tabla 74	Resultados de dise1o Marshall del RAP con 1.0% de cemento asfáltico..	199
Tabla 75	Resultados de dise1o Marshall del RAP con 1.5% de cemento asfáltico..	200
Tabla 76	Resumen de dise1o Marshall de RAP adicionado con PEN 120-150.	202



Tabla 77	Resultados del 1.25% de cemento asfáltico añadido al RAP y comparación con parámetros de diseño Marshall.....	203
Tabla 78	Resultados del peso específico máximo teórico de MAC-1 adicionado con RAP.....	206
Tabla 79	Diseño Marshall para MAC-1 adicionado con 15% de RAP.	207
Tabla 80	Resultado del diseño Marshall de MAC-1 adicionado con 25.0% RAP. ...	209
Tabla 81	Resultados del diseño Marshall de MAC-1 adicionado con 35.0% de RAP.	210
Tabla 82	Resultados del diseño Marshall de MAC-1 adicionado con 45.0% de RAP.	212
Tabla 83	Resumen del diseño Marshall para MAC-1 adicionado con diferentes porcentajes de RAP.....	214
Tabla 84	Resultados del 39.0% óptimo de RAP adicionado al MAC-1 - comparación de parámetro mínimos.....	214
Tabla 85	Resultados de las propiedades de la adición de RAP a MAC-1.	219
Tabla 86	Resultados del ensayo de CBR de base granular adicionado con 15.0% de RAP.....	220
Tabla 87	Resumen de CBR de base granular + RAP al 15%.	222
Tabla 88	Resultado del ensayo de CBR de la base granular adicionado con RAP al 30%.	222
Tabla 89	Resumen del CBR de base granular +RAP 30%.	224
Tabla 90	Resultado del CBR de base granular adicionado con RAP al 45%.	225
Tabla 91	Resumen del CBR de granular + RAP al 45%.	227
Tabla 92	Resultados del CBR de base granular adicionado con RAP al 60%.....	227
Tabla 93	Resumen del CBR de base granular + RAP al 60%.	229



Tabla 94	Resumen de características de base granular añadida con RAP a diferentes porcentajes.	229
Tabla 95	Valores de flujo del diseño Marshall para MAC-1.....	238
Tabla 96	Valores de estabilidad del diseño Marshall para MAC-1.....	240
Tabla 97	Valores de peso específico para MAC-1 a diferentes porcentajes de PEN 120-150.....	241
Tabla 98	Valores de % de vacíos para MAC-1 a diferentes porcentajes de PEN 120-150.....	243
Tabla 99	Valores de resistencia a la tracción de MAC-1 a 5.9% de PEN.....	244
Tabla 100	Valores de contenido de asfalto en el RAP.....	247
Tabla 101	Clasificación de los resultados de granulometría de los agregados contenidos en el RAP.	248
Tabla 102	Valores de flujo para RAP añadido con PEN 120-150.....	250
Tabla 103	Valores de estabilidad para RAP adicionado con PEN 120-150.	252
Tabla 104	Valores de peso específico para RAP + PEN 120-150.....	253
Tabla 105	Valores de % de vacíos de RAP adicionado con PEN 120-150.	255
Tabla 106	Valores de flujo para MAC-1 adicionado con RAP.	257
Tabla 107	Valores de estabilidad para MAC-1 adicionado con RAP.....	258
Tabla 108	Valores de peso específico para MAC-1 adicionado con RAP.	260
Tabla 109	Valores de % de vacíos para MAC-1 adicionado con RAP.....	262
Tabla 110	Valores de resistencia a la tracción para MAC-1 añadido con RAP óptimo al 39.0%.	263
Tabla 111	Valores de % de CBR para base granular añadida con RAP.....	267
Tabla 112	Datos de flujo para MAC-1 +RAP al 0%.	269
Tabla 113	Distribución de frecuencia para datos de flujo de MAC-1 + RAP al 0%..	270



Tabla 114 Resultado del análisis estadístico de los datos de flujo MAC-1 + RAP al 0%.	270
Tabla 115 Datos de flujo para MAC-1 +RAP al 15%.	271
Tabla 116 Distribución de frecuencia para datos de flujo de MAC-1 + RAP al 15%.271	
Tabla 117 Resultados del análisis estadístico de flujo para MAC-1 + RAP al 15%.. 271	
Tabla 118 Datos de flujo para MAC-1 + RAP al 25%.	272
Tabla 119 Distribución de frecuencias para datos de flujo de MAC-1 + RAP al 25%.	272
Tabla 120 Resultados del análisis estadístico para datos de flujo de MAC-1 + RAP al 25%.	273
Tabla 121 Datos de flujo para MAC-1 + RAP al 35%.	273
Tabla 122 Distribución de frecuencias para datos de flujo de MAC-1 + RAP al 35%.	274
Tabla 123 Resultados del análisis estadístico para datos de flujo de MAC-1 + RAP al 35%.	274
Tabla 124 Datos de flujo para MAC-1 + RAP al 45%.	275
Tabla 125 Distribución de frecuencias para datos de flujo de MAC-1 + RAP al 45%.	275
Tabla 126 Resultados del análisis estadístico para los datos de flujo de MAC-1 + RAP al 45%.	276
Tabla 127 Datos de estabilidad para MAC-1 + RAP al 0%.	276
Tabla 128 Distribución de frecuencia para datos de estabilidad de MAC-1 + RAP al 0%.	277
Tabla 129 Resultados del análisis estadístico para datos de estabilidad de MAC-1 + RAP al 0%.	277



Tabla 130 Datos de estabilidad para MAC-1 + RAP al 15%.	278
Tabla 131 Distribución de frecuencia para datos de estabilidad de MAC-1 + RAP al 15%.	278
Tabla 132 Resultados del análisis estadístico para datos de estabilidad de MAC-1 + RAP al 15%.	278
Tabla 133 Datos de estabilidad para MAC-1 + RAP al 25%.	279
Tabla 134 Distribución de frecuencias para datos de estabilidad de MAC-1 + RAP al 25%.	279
Tabla 135 Resultados del análisis estadístico para datos de estabilidad de MAC-1 + RAP al 25%.	280
Tabla 136 Datos de estabilidad para MAC-1 + RAP al 35%.	280
Tabla 137 Distribución de frecuencia para datos de estabilidad de MAC-1 + RAP al 35%.	281
Tabla 138 Resultados de análisis estadístico para datos de estabilidad de MAC-1 + RAP al 35%.	281
Tabla 139 Datos de estabilidad para MAC-1 +RAP al 45%.	282
Tabla 140 Distribución de frecuencia para datos de estabilidad de MAC-1 + RAP al 45%.	282
Tabla 141 Resultados del análisis estadístico para datos de estabilidad de MAC-1 + RAP al 45%.	283
Tabla 142 Datos de peso específico para MAC- + RAP al 0%.	283
Tabla 143 Distribución de frecuencias para datos de peso específico de MAC-1 + RAP al 0%.	284
Tabla 144 Resultado del análisis estadístico para datos de peso específico de MAC-1 + RAP al 0%.	284



Tabla 145	Datos de peso específico para MAC-1 + RAP al 15%.	285
Tabla 146	Distribución de frecuencia para datos de peso específico de MAC-1 + RAP al 15%.	285
Tabla 147	Resultados del análisis estadístico para datos de peso específico de MAC-1 + RAP al 15%.	286
Tabla 148	Datos de peso específico para MAC-1 + RAP al 25%.	286
Tabla 149	Distribución de frecuencia para datos de peso específico de MAC-1 + RAP al 25%.	287
Tabla 150	Resultados del análisis estadístico para datos de peso específico de MAC-1 + RAP al 25%.	287
Tabla 151	Datos de peso específico para MAC-1 + RAP al 35%.	288
Tabla 152	Distribución de frecuencia para datos de peso específico de MAC-1 + RAP al 35%.	288
Tabla 153	Resultados de análisis estadístico para datos de peso específico de MAC-1 + RAP al 35%.	289
Tabla 154	Datos de peso específico para MAC-1 + RAP al 45%.	289
Tabla 155	Distribución de frecuencia para datos de peso específico de MAC-1 + RAP al 45%.	290
Tabla 156	Resultado de análisis estadístico para datos de peso específico de MAC-1 + RAP al 45%.	290
Tabla 157	Datos de % de vacíos para MAC-1 + RAP al 0%.	291
Tabla 158	Distribución de frecuencia para datos de % de vacíos de MAC-1 + RAP al 0%.	291
Tabla 159	Resultados de análisis estadístico para datos de % de vacíos de MAC-1 + RAP al 0%.	292



Tabla 160	Datos de % de vacíos para MAC-1 + RAP al 15%.....	292
Tabla 161	Distribución de frecuencias para datos de % de vacíos de MAC-1 + RAP al 15%.....	293
Tabla 162	Resultados del análisis estadístico para los datos de % de vacíos de MAC-1 + RAP al 15%.....	293
Tabla 163	Datos de % de vacíos para MAC-1 + RAP al 25%.....	294
Tabla 164	Distribución de frecuencias para datos de % de vacíos de MAC-1 + RAP al 25%.....	294
Tabla 165	Resultado del análisis estadístico para datos de % de vacíos de MAC-1 + RAP al 25%.....	295
Tabla 166	Datos de % de vacíos para MAC-1 + RAP al 35%.....	295
Tabla 167	Distribución de frecuencias para datos de % de vacíos de MAC-1 + RAP al 35%.....	296
Tabla 168	Resultados de análisis estadístico para datos de % de vacíos de MAC-1 + RAP al 35%.....	296
Tabla 169	Datos de % de vacíos para MAC-1 + RAP al 45%.....	297
Tabla 170	Distribución de frecuencias para datos de % de vacíos de MAC-1+ RAP al 45%.....	297
Tabla 171	Resultado del análisis estadístico para datos de % de vacíos de MAC-1 + RAP al 45%.....	298
Tabla 172	Datos de resistencia a la tracción para MAC-1 + RAP al 0% (en condiciones normales).....	299
Tabla 173	Distribución de frecuencias para datos de resistencia a la tracción de MAC-1 + RAP al 0% (condiciones normales).....	299



Tabla 174	Resultados del análisis estadístico para datos de resistencia a la tracción de a MAC-1 + RAP al 0% (condiciones normales).	299
Tabla 175	Datos de resistencia a la tracción para MAC-1 + RAP al 0% (condiciones críticas).....	300
Tabla 176	Distribución de frecuencias para datos de resistencia a la tracción de MAC-1 + RAP al 0% (condiciones críticas).	301
Tabla 177	Resultado del análisis estadístico para datos de resistencia a la tracción de MAC-1 + RAP al 0% (condiciones críticas).	301
Tabla 178	Datos de resistencia a la tracción para MAC-1 + RAP al 39% (condiciones normales).....	302
Tabla 179	Distribución de frecuencias para datos de resistencia a la tracción de MAC-1 + RAP al 39% (condiciones normales).....	302
Tabla 180	Resultado del análisis estadístico para datos de resistencia a la tracción de MAC-1+ RAP al 39% (condiciones normales).	303
Tabla 181	Datos de resistencia a la tracción para MAC-1 + RAP al 39% (condiciones críticas).....	303
Tabla 182	Distribución de frecuencias para datos de resistencia a la tracción de MAC-1 + RAP al 39% (condiciones críticas).....	304
Tabla 183	Resultado del análisis estadístico para datos de resistencia a la tracción de MAC-1 + RAP al 39% (condiciones críticas).	304
Tabla 184	Datos de CBR para base granular + RAP al 0%.....	305
Tabla 185	Distribución de frecuencias para datos de CBR de base granular + RAP al 0%.	305
Tabla 186	Resultado del análisis estadístico para datos de CBR de base granular + RAP al 0%.	306



Tabla 187	Datos de CBR para base granular + RAP al 15%.....	306
Tabla 188	Distribución de frecuencias para datos de CBR de base granular +RAP al 15%.....	307
Tabla 189	Resultado del análisis estadístico para datos de CBR de base granular + RAP al 15%.....	307
Tabla 190	Datos de CBR para base granular + RAP al 30%.....	308
Tabla 191	Distribución de frecuencias para datos de CBR de base granular + RAP al 30%.....	308
Tabla 192	Resultados del análisis estadístico para datos de CBR de base granular + RAP al 30%.....	309
Tabla 193	Datos de CBR para base granular + RAP al 45%.....	309
Tabla 194	Distribución de frecuencias para datos de CBR de base granular +RAP al 45%.....	310
Tabla 195	Resultados del análisis estadístico para datos de CBR de bse granular + RAP al 45%.....	310
Tabla 196	Datos de CBR para base granular + RAP al 60%.....	311
Tabla 197	Distribución de frecuencias para datos de CBR de base granular + RAP al 60%.....	311
Tabla 198	Resultados del análisis estadístico para datos de CBR de base granular + RAP al 60%.....	312
Tabla 199	Parámetros de flujo para MAC-1 y MAC-1+RAP al 15%.....	313
Tabla 200	Parámetros de interés de flujo para MAC-1 y MAC-1+RAP al 25%.....	315
Tabla 201	Parámetros de interés de flujo para MAC-1 y MAC-1+RAP al 35%.....	316
Tabla 202	Parámetros de interés de flujo para MAC-1 y MAC-1+RAP al 45%.....	318



Tabla 203 Parámetros de interés de estabilidad para MAC-1 y MAC-1+RAP al 15%.	320
Tabla 204 Parámetros de interés de estabilidad para MAC-1 y MAC-1+RAP al 25%.	322
Tabla 205 Parámetros de interés de estabilidad para MAC-1 y MAC-1+RAP al 35%.	324
Tabla 206 Parámetros de interés de estabilidad para MAC-1 y MAC-1+RAP al 45%.	326
Tabla 207 Parámetros de interés de resistencia a la tracción para MAC-1 y MAC-1+RAP al 39% (condiciones normales).....	328
Tabla 208 Parámetros de interés de resistencia a la tracción para MAC-1 y MAC-1+RAP al 39% (condiciones críticas).....	330
Tabla 209 Parámetros de interés de CBR para base granular patrón y base granular + RAP al 15%.....	332
Tabla 210 Parámetros de interés de CBR para base granular patrón y base granular +RAP al 30%.	334
Tabla 211 Parámetros de interés de CBR para base granular patrón y base granular + RAP al 45%.....	335
Tabla 212 Parámetros de interés de CBR para base granular patrón y base granular + RAP al 60%.....	337
Tabla 213 Comparación de resultados de flujo con Huari, 2020.....	340
Tabla 214 Comparación de resultados de flujo con Fustamante,2018.	340
Tabla 215 Comparación de resultados de estabilidad con Huari, 2020.....	341
Tabla 216 Comparación de resultados de estabilidad con Fustamante, 2018.....	341



Tabla 217 Comparación de resultados a la resistencia retenida (resistencia al daño inducido por humedad) con Huari, 2020.	342
Tabla 218 Comparación de resultados de CBR con Camacho, 2016.	344



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RAP: Pavimento asfáltico reciclado

MAC-1: Mezcla asfáltica en caliente con huso granulométrico tipo 1.

MAC-2: Mezcla asfáltica en caliente con huso granulométrico tipo 2.

PEN 120-150: Cemento asfáltico de penetración 120-150.

C.A.: Cemento asfáltico.

TMN: Tamaño máximo nominal

S.S.S.: Saturado superficialmente seco.

CBR: Índice de soporte de california.

ASTM: American society of testing materials

ASSTHO: American association of state highway and transportation officials.

EG-2013: Especificaciones técnicas generales para la construcción, 2013.

Kgf: Kilógramo fuerza.

Mpa: Mega pascales.

\bar{X} : Media aritmética muestral.

σ^2 : Varianza.

H_0 : Hipótesis nula.

H_a : Hipótesis alternativa.

u: Mediana.



RESUMEN

La presente investigación se llevó a cabo con el fin de determinar la influencia de la adición del pavimento reciclado en las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica y base granular en la Av. la Torre de la ciudad de Puno. Se realizó evaluando la estabilidad y flujo (ensayo Marshal), además de la resistencia al daño inducido por humedad (ensayo de Lottman modificado) de probetas de mezcla asfáltica, así mismo se evaluó el CBR de una base granular, para la mezcla asfáltica se adicionó pavimento asfáltico reciclado en porcentajes de 15%, 25%, 35% y 45% del peso total de la mezcla comparándolas con la muestra patrón MAC-1, para la base granular se adicionó pavimento asfáltico reciclado en porcentajes de 15%, 30%, 45% y 60% del peso total de la mezcla comparándola con la muestra patrón de base granular, se empleó 51 probetas de mezcla asfáltica para los ensayos de Marshall y Lottman modificado, 15 pruebas de CBR para la base granular. De acuerdo a los resultados la adición óptima de pavimento asfáltico reciclado a la mezcla asfáltica fue de 39% mejorando la estabilidad en 8.01 %, disminuyendo el flujo en 14.89 % e incrementando la resistencia al daño inducido por humedad en 4.59% a condiciones normales. Para la base granular se tiene una adición máxima del 21% del peso total manteniendo el CBR en 104 %. Se concluye que la adición de pavimento asfáltico reciclado en una mezcla asfáltica y base granular mantiene sus propiedades mecánicas.

Palabra Clave: *Lottman modificado, estabilidad, fluencia, base granular con RAP, MAC-1.*



ABSTRACT

The present research was conducted to determine the influence of the addition of recycled pavement on the mechanical properties of an asphalt mixture and granular base on Av. la Torre in the city of Puno. This was done by evaluating the stability and flow (Marshal test), as well as the moisture-induced damage resistance (modified Lottman test) of asphalt mixture specimens. Additionally, the California Bearing Ratio (CBR) of a granular base was evaluated. Recycled asphalt pavement was added to the asphalt mixture at percentages of 15%, 25%, 35%, and 45% of the total weight of the mixture, comparing them to the standard MAC-1 sample. For the granular base, recycled asphalt pavement was added at percentages of 15%, 30%, 45%, and 60% of the total weight of the mixture, comparing them to the standard granular base sample. A total of 51 asphalt mixture specimens were used for the Marshal and modified Lottman tests, and 15 CBR tests were performed on the granular base. According to the results, the optimal addition of recycled asphalt pavement to the asphalt mixture was 39%, improving stability by 8.01%, reducing flow by 14.89%, and increasing moisture-induced damage resistance by 4.59% under normal conditions. For the granular base, the maximum addition was found to be 21% of the total weight while maintaining a CBR of 104%. It can be concluded that the addition of recycled asphalt pavement to an asphalt mixture and granular base preserves their mechanical properties.

Key Word: *Modified Lottman, stability, flow, granular base with RAP, MAC-1.*



CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años se ha registrado a nivel mundial un elevado impacto ambiental debido a la contaminación de suelos y agua, uno de los principales contaminantes son los residuos de fresado de pavimentos asfálticos flexibles, debido a su contenido de cemento asfáltico. Otro de los problemas que se da a nivel mundial es el deterioro paisajístico a causa de la explotación de canteras, con el fin de extraer materiales para la construcción de infraestructura vial. Países como Estados Unidos, Colombia y España vienen implementando la adición de pavimento asfáltico reciclado (pavimento envejecido, que cumplió su ciclo de vida útil) en mezclas asfálticas nuevas, implementando de esta manera nuevas tecnologías para la recuperación del pavimento asfáltico envejecido.

En el Perú, difícilmente se considera la reutilización de material asfáltico reciclado en la producción de nuevos pavimentos debido a las limitaciones para poder recuperar el pavimento asfáltico envejecido, el desaprovechamiento de pavimento asfáltico reciclado se da debido a que no se tiene conocimiento profundo a cerca de la tecnología y técnicas de implementación en el diseño de mezclas asfálticas, por lo tanto, se seguirá incrementando el impacto ambiental debido al desecho de material fresado de pavimento envejecido y la degradación de las canteras y ríos por la extracción de agregados.

En nuestra región de Puno, se puede apreciar que cuando se realiza un proyecto de mejoramiento, mantenimiento o reconstrucción del pavimento, se tiene como práctica habitual la eliminación los residuos del pavimento envejecido fresado en un botadero.



Si la situación actual prevalece, se seguirán contaminando los suelos y aguas subterráneas donde se encuentran los botaderos de pavimento asfáltico envejecido y alrededores. Así como también, deterioro acelerado de canteras y ríos donde se obtienen agregados vírgenes para la construcción de infraestructura vial, incrementando su costo propio y la de su transporte hasta la obra, de igual manera, es creciente la dificultad para encontrar botaderos para el pavimento envejecido.

Para afrontar los efectos negativos mencionados, se propone la reutilización de pavimento asfáltico envejecido adicionando a una mezcla asfáltica nueva y a la base granular. Evitando de esta manera la contaminación ambiental y colapso de botaderos, de igual forma reduciendo la explotación de canteras y ríos de donde se obtienen los agregados.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 Problema general

- ¿De qué manera influye la adición de pavimento reciclado en las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica y base granular en la Av. la Torre de la ciudad de Puno, 2021?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿De qué manera influye la adición de pavimento reciclado en las propiedades de estabilidad y flujo de una mezcla asfáltica?
- ¿De qué manera influye la adición de pavimento reciclado en la propiedad de resistencia retenida al daño inducido por humedad de una mezcla asfáltica?
- ¿De qué manera influye la adición de pavimento reciclado en el porcentaje de CBR de la base granular para un pavimento?



1.3 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 Hipótesis general

- La adición de pavimento reciclado incrementa las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica y base granular.

1.3.2 Hipótesis específicas

- La adición de pavimento reciclado incrementa la estabilidad y flujo de una mezcla asfáltica.
- La adición de pavimento reciclado incrementa la propiedad de resistencia retenida al daño inducido por humedad de una mezcla asfáltica.
- La adición de pavimento reciclado incrementa el porcentaje de CBR en la base granular del pavimento.

1.4 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Uno de los aspectos principales del presente estudio, es que, el pavimento reciclado, no está siendo aprovechado en nuestra región Puno, esto es debido a que se desconoce la tecnología y técnicas de adición de RAP en mezclas asfálticas y en la base granular de un pavimento, además que al desechar inadecuadamente el RAP representa una amenaza para el medio ambiente (contaminación de suelos y agua); es por esto que, se analiza la influencia del pavimento reciclado en las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica los cuales son la estabilidad, flujo y la resistencia al daño inducido por humedad, también se centra en analizar el porcentaje de CBR para la base granular adicionando pavimento reciclado. De esa manera mostrar una forma de diseño al añadir RAP a una mezcla asfáltica y una base granular, y así poder reutilizar y aprovechar el



pavimento reciclado de las carpetas asfálticas deterioradas, que ya cumplieron con su tiempo de vida útil.

1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 Objetivo General

- Analizar la influencia de la adición de pavimento reciclado en las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica y base granular.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Analizar la influencia de adición de pavimento reciclado en la propiedad de estabilidad y flujo de una mezcla asfáltica.
- Determinar la influencia de adición de pavimento reciclado en la resistencia retenida al daño inducido por humedad a una mezcla asfáltica.
- Determinar la influencia de adición de pavimento reciclado en el porcentaje de CBR de base granular del pavimento.



CAPITULO II

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES

2.1.1 Antecedentes internacionales

Patiño et al. (2015), nos dicen que el comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas colombianas con la inclusión de 100% de pavimento reciclado se menciona en su artículo en la revista "Tecnura". Su objetivo fue determinar el comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas utilizando pavimento flexible granular reciclado (RAP) con asfaltos de penetración 60/70 y 80/100 junto con granulometrías MDC 2 y MD20 del Instituto Nacional de Vías y del Instituto de Desarrollo Urbano, respectivamente. Plantearon la problemática de que, a pesar de la eficacia del RAP y de su impacto en la seguridad vial, se ha aplicado en varios países, pero no a un ritmo elevado. La National Asphalt Pavement Association (NAPA) de Estados Unidos afirma que se pueden generar mezclas con grandes porcentajes de RAP (30-40%), pero que su producción se ve limitada por el hecho de que la concentración de RAP aumenta con la rigidez. El tipo de investigación fue cuantitativa, nivel de investigación correlacional. Se realizó la caracterización del pavimento asfáltico reciclado, hallando el contenido de asfalto con el que se encontraba al ser reciclado, seguidamente se hizo diseño de mezclas para mezclas asfálticas en caliente con asfalto PEN 80-100 y 60-70, para posteriormente someterlos a ensayo de fatiga, se realizaron 3 probetas por cada variación de porcentaje de asfalto a 2, 3, 4 y 5 % en peso para los dos tipos de mezclas asfálticas. Como resultados nos mostraron que para la MDC con asfalto PEN 60/70 y 80/100, donde se evidencia que los ciclos de cargas son diferentes a un mismo nivel de deformación; la mezcla 80/100 soportó un mayor número de ciclos de carga, por tal motivo esta mezcla tiene un mejor comportamiento a la fatiga. La conclusión del estudio fue que la granulometría MDC-2 con asfalto 80/100 producía



el mejor comportamiento a la fatiga de las mezclas probadas porque tenía un mayor contenido en finos y se combinaba con un asfalto blando, lo que daba a la mezcla una mayor trabajabilidad y ciclos de vida más largos. Las mezclas son vulnerables al tipo de asfalto utilizado, por lo que el comportamiento superior a la fatiga no es atribuible únicamente a la granulometría. Además, como las granulometrías analizadas tienen pendientes idénticas según el tipo de asfalto, es imposible determinar cuál de ellas presenta el comportamiento óptimo a la fatiga. Debido a su menor viscosidad que el asfalto de penetración 60/70, a su menor rigidez y a su mayor capacidad de deformación, el asfalto de penetración 80/100 proporcionó la mayor resistencia a la fatiga para las muestras fabricadas con las dos granulometrías estudiadas. Es evidente que las mezclas con RAP, independientemente de su granulometría y tipo de asfalto, son más rígidas y presentan mayores pendientes en el examen comparativo de todas las leyes de fatiga con respecto a una mezcla asfáltica MD 20 sin RAP y asfalto 60/70. Es crucial recordar que las condiciones de utilización del 100% de RAP resultan en un aumento relativamente bajo de las pendientes, y que el uso de asfalto con una relación de penetración de 80/100 tiene un impacto menor. Al final, se determinó que las mezclas asfálticas de la investigación podían emplear un 100% de pavimento reciclado. Para determinar su viabilidad, no sólo en las bases asfálticas sino también en las capas de rodadura, hay que realizar más investigaciones con granulometrías alternativas y asfaltos modificados.

Alarcón (2003), en su tesis doctoral, expone un estudio que realizó sobre el comportamiento de las mezclas bituminosas recicladas en caliente en plantas con el objetivo de avanzar en la práctica del calentamiento de pavimentos asfálticos para su reutilización. El nivel de la investigación fue de tipo explicativo con enfoque experimental. La cuestión era que las autoridades viarias españolas se habían dado cuenta recientemente de lo crucial que resultaba aumentar la vida útil de los materiales del



pavimento. Sin embargo, al igual que en otras naciones, España utiliza áridos frescos y asfalto para crear el pavimento cuando construye nuevas carreteras o modifica y mejora las ya existentes. Este planteamiento dio lugar al desarrollo de nuevas canteras o a la sobreexplotación de las existentes, así como al uso sustancial de asfalto nuevo, todo lo cual tuvo un efecto grande y perjudicial sobre el medio ambiente. Por otro lado, se popularizó la técnica de triturar las capas asfálticas viejas y sustituirlas por mezclas frescas en proyectos de refuerzo o rehabilitación de firmes. Este método permitía crear materiales con un alto potencial de reutilización de los áridos y ligantes que contenían. Sin embargo, estos materiales se vierten con frecuencia en vertederos, lo que tiene un efecto adverso sobre el medio ambiente. Los procesos de reciclado son claramente fascinantes y ventajosos desde el punto de vista del medio ambiente y del consumo de materiales. El reciclado en planta de mezclas bituminosas en caliente no ha sido, sin embargo, un método practicado con frecuencia hasta ahora. Se ensayaron las mezclas S-20, G-20 y G-25, tres tipos de mezclas frecuentes en España, en capas intermedia y base, añadiendo un 30% de RAP; se eligió esta cantidad por ser la que más frecuentemente emplean las fábricas de reciclado de mezclas asfálticas. Además, se emplearon ligantes de los tipos B-80/100, B-150/200 y B-180/220. Los materiales fueron sometidos a un total de 449 probetas y 1000 ensayos separados, tanto para caracterizar el RAP como los materiales vírgenes. Llegó a la conclusión de que el rendimiento de la mezcla final se ve influido significativamente por la selección del betún adecuado. En teoría, bastaría con realizar un estudio de la penetración del ligante final y confirmar que se ajusta a los criterios PG-3 para concentraciones de MBR inferiores al 25%. Para asegurarse de que se han restablecido las propiedades del ligante final, se aconseja realizar un análisis más profundo de su comportamiento examinando su punto de reblandecimiento, índice de penetración y punto de fragilidad de Frass para contenidos superiores al 25% de MBR o



cuando el betún del material fresado tenga una penetración muy baja (inferior a 15 dmm). En su ejemplo, pudo confirmar que el aumento de la concentración de MBR hace que las mezclas se vuelvan más quebradizas y menos cohesivas después de probar masillas con varios porcentajes de MBR manteniendo una proporción constante de betún total.

Camacho (2016), en su tesis, describe la aplicación del pavimento asfáltico reciclado como base granular. El objetivo era realizar ensayos de laboratorio con diversas fuentes de RAP y material granular virgen (MGV) para determinar sus propiedades físicas y mecánicas; comparar las propiedades físicas y mecánicas del RAP según las especificaciones técnicas vigentes; y extraer una conclusión sobre la viabilidad del RAP como sustituto del material granular virgen en carreteras de balasto. Para determinar la concentración de RAP por peso de material granular virgen que permita alcanzar un comportamiento satisfactorio como firme en pavimentos expuestos, ejecutar experimentos físicos y mecánicos en laboratorio sobre probetas compuestas por diversos porcentajes de RAP. El tipo de investigación empleada es cuantitativa, de nivel correlacional. La extracción del material granular y pavimento asfáltico reciclado se hicieron del mantenimiento de la Ruta Nacional 30703 (Costa Rica), para posteriormente realizar 03 juegos de ensayos de caracterización (granulometría, índice de plasticidad, Proctor, CBR, etc.). para posteriormente realizar las combinaciones de adición de pavimento asfáltico reciclado en el material granular en 0, 25, 50, 75 y 100% de RAP. Como resultado se tuvo que con una combinación de RAP de 50 al 75%, cumple con la caracterización de los materiales dentro de los rangos permitidos (cantera Urrajas – Cartago). Teniendo en cuenta que los parámetros técnicos permiten áridos no plásticos, llegó a las siguientes conclusiones: Aunque los dos materiales de RAP carecen de plasticidad, no deben descartarse porque todas las fuentes muestreadas cumplían el requisito de tener más del 50% de caras fracturadas retenidas en la malla n° 4 (4,75 mm),



y las propiedades de ambas mezclas de RAP con MGTV en cuanto a durabilidad, abrasión y caras fracturadas cumplen los parámetros técnicos; La dosificación del contenido de RAP del 50% al 75% de la combinación Ujarrás-Cartago es la que mejor se ajusta a las normas técnicas; las combinaciones de RAP y MGTV presentan un mayor rendimiento para ser empleadas como material sustitutivo en carreteras de balasto que el material RAP solo.

2.1.2 Antecedentes nacionales

Aguilar & Infanzón (2020), en la tesis se abordó la relevancia de los métodos de reciclado de pavimentos. A partir de un estudio de investigaciones nacionales y extranjeras, el objetivo general era evaluar la eficacia de la tecnología de reciclado en caliente de pavimentos asfálticos antiguos para reutilizarlos en una nueva mezcla asfáltica en caliente. Los objetivos específicos incluían la identificación de las ventajas medioambientales del reciclado de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente, el uso de un pavimento antiguo como parte de una nueva mezcla asfáltica y la reducción de los costes del proyecto mediante el uso del método de reciclado en pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. El nivel de investigación fue descriptivo con enfoque no experimental. La muestra de estudio consistió en 11 investigaciones nacionales, 11 investigaciones internacionales, 5 libros, 3 manuales y 6 revistas y papers. Los resultados mostraron que se utilizaron diferentes cantidades de RAP (asfalto reciclado), especialmente 10%, 20%, 30% y 40% de RAP, para crear diseños de ligantes asfálticos. Se comprobó que el diseño con un 30% de RAP cumple todos los criterios de las normas. En comparación con el diseño habitual, esta solución ahorró un 14% en áridos gruesos, un 16% en áridos finos y un 1,52% en cemento asfáltico. Muchos países del mundo tienen en mente la protección del medio ambiente. Es factible disminuir la explotación de nuevas



canteras y la acumulación de residuos de pavimento mediante el proceso de reciclado de mezclas bituminosas en caliente para su reutilización, lo que contribuye a disminuir el impacto sobre el medio ambiente y el deterioro de la capa de ozono. Al comparar los gastos, se observa que el ahorro crece a medida que aumenta la cantidad de pavimento de asfalto reciclado. Basándose en los resultados de laboratorio, se eligió el diseño con un 30% de RAP, ya que cumplía los requisitos técnicos indicados en la norma. La utilización de RAP reduce en gran medida los costes de fabricación en la creación de pavimento asfáltico, como demuestra el ahorro del 10,8% en el coste total de la mezcla estándar que permite este método.

Crispín y Helguero (2019), el objetivo principal de la tesis sobre conformación de bases granulares con cemento Portland y pavimento asfáltico reciclado fue realizar cambios sustanciales en la Avenida Separador Industrial, en los barrios de La Molina y Santa Anita. Para ello se estableció el porcentaje ideal de reutilización de RAP (asfalto reciclado) y cemento Portland tipo I. Como resultado, fue factible comparar una base granular estándar con una base estabilizada con cemento Portland tipo I y pavimento reciclado. Para la mejora y estabilización de una cimentación deteriorada, se pretendía determinar específicamente la dosis adecuada de cemento Portland tipo I y la adición de RAP, indicando el diseño, el equipo y los materiales a emplear. También se compararon estructuralmente la base granular típica y la base sugerida por la investigación. Además, se compararon los tiempos de construcción de la base granular estabilizada con cemento Portland tipo I y pavimento reciclado con los de la base granular típica. El nivel de investigación fue descriptivo con enfoque experimental, y la población de estudio fue el pavimento asfáltico de Lima Metropolitana, teniendo como muestra el pavimento asfáltico en la Avenida Separadora Industrial en los distritos de Santa Anita, Ate y La Molina. Los resultados mostraron que se empleó un 10% de RAP en cada una de las tres



dosis de ensayo de la tesis durante las pruebas de laboratorio. A pesar de que el CBR para la dosis del 3% era mayor, con un 157%, se optó por utilizar en su lugar un 2% de cemento (CBR = 134,9%) debido a consideraciones de coste y beneficio. Dado que una base convencional proyectó un CBR de 100% y una base estabilizada ha recibido un CBR que varía de 100% a 157%, se determinó que una base estabilizada con cemento y RAP se comporta estructuralmente mejor que una base granular convencional. Se observó que la disminución de tiempo era sustancial a la luz de los cronogramas y de la tabla comparativa de tiempos mostrada en el Capítulo VIII. El tiempo necesario para completar una rehabilitación de pavimento asfáltico con una base estabilizada con cemento Portland tipo I y RAP se reduce en 43 días, o 52,44%, en comparación con una rehabilitación de pavimento asfáltico con una base granular normal, que necesitaría 82 días.

Fustamante (2018), el reciclaje de pavimentos asfálticos en la creación de mezclas asfálticas fue el enfoque del trabajo de tesis del investigador. Para el mejoramiento de la Av. Mesones Muro km0+000-2+066 en Chiclayo en el año 2018, el objetivo general fue presentar una propuesta técnica para la construcción de una carpeta asfáltica utilizando pavimento asfáltico reciclado (RAP). Con la finalidad de comparar el diseño del pavimento construido utilizando pavimento asfáltico reciclado (RAP) para el mejoramiento de la Av. Mesones Muro a, uno de los objetivos particulares fue definir un diseño estándar de pavimento asfáltico sin RAP. Antes de ser utilizado en la construcción de una nueva capa asfáltica para la mejora de la citada avenida, también se examinaron las propiedades mecánicas del pavimento asfáltico reciclado (RAP). Adicionalmente, se propuso un concepto de pavimento asfáltico utilizando RAP, agregados pétreos frescos y cemento asfáltico PEN 60/70 para el mismo objetivo. Para determinar la factibilidad económica del ligante RAP en el mejoramiento de la Av. Mesones Muro km0+000-2+066 en Chiclayo, se realizó una comparación de costos entre su diseño y el ligante



convencional. El tipo de investigación realizado fue de carácter cuantitativo y de nivel explicativo. La población bajo estudio estuvo compuesta por todos los pavimentos reciclados de la provincia de Chiclayo, y la muestra utilizada consistió en un total de 75 probetas, de las cuales 15 fueron destinadas a la muestra patrón y 60 correspondieron a las diferentes combinaciones (10%, 20%, 30% y 40%) de RAP. Los resultados obtenidos revelaron que, para lograr un diseño de mezclas que cumpliera con los requisitos establecidos por la EG-2013, se requería una adición de RAP del 30%. En conclusión, se determinó que este porcentaje de RAP cumplía con las especificaciones exigidas para el mejoramiento de la Av. Mesones Muro. La investigación estableció un diseño de ligante estándar que sirvió como punto de referencia para la comparación con el diseño de ligante creado utilizando RAP. El diseño sugerido requería una superficie asfáltica de 3" de espesor hecha con una gradación de mezcla MAC-2. Para conseguirlo, se empleó un 5,8% del contenido ideal de cemento asfáltico PEN 60/70, un 35% de grava triturada, un 20% de arena triturada y un 45% de arena triturada. El análisis de las características del RAP reveló que la gradación de sus partículas por sí sola no se ajustaba al diseño MAC-2, siendo necesario añadir áridos adicionales para elevar la gradación. La mejor cantidad de asfalto recuperado, que resultó ser del 4,73% en una muestra de 1274,8 gramos, demostró también que este asfalto podía reciclarse. Se utilizaron diferentes porcentajes de RAP (10%, 20%, 30% y 40%) para crear diseños de ligantes asfálticos, y se descubrió que el diseño que empleaba un 30% de RAP cumplía todas las especificaciones establecidas por las normas EG-2013 y CE.010 de Pavimentos Urbanos. Los porcentajes de áridos gruesos, áridos finos y contenido de cemento asfáltico se redujeron en un 14%, 16% y 1,52%, respectivamente, con este diseño. Al comparar los gastos de producción de la mezcla asfáltica normal y el diseño de mezcla con un 30% de RAP, se encontró que el



coste global de la mezcla estándar se redujo en un 10,8%. Esto demostró cómo el uso de RAP redujo en gran medida el coste de producción de mezclas asfálticas.

2.1.3 Antecedentes locales o regionales

González (2017), los objetivos del estudio fueron: examinar el comportamiento mecánico de los pavimentos de las carreteras de los distritos de San Miguel, San Román y Puno a los que se les había agregado suelo reciclado; examinar el comportamiento mecánico de los pavimentos de esas mismas carreteras a los que se les había agregado mezcla asfáltica reciclada; y examinar el comportamiento mecánico de los pavimentos de esas mismas carreteras a los que se les había agregado agregados reciclados. EL nivel de investigación fue explicativo no experimental, se sometieron 5 probetas con porcentajes del 50% de agregados vírgenes y 50% de agregados reciclados, 5 probetas con porcentajes de 70% de agregados vírgenes y 30% de agregados reciclados, y 5 probetas con el 100% de agregados vírgenes. Llegó a las siguientes conclusiones: Es posible reciclar los suelos de cimentación mediante la adición de materiales de cantera en las granulometrías adecuadas; ante esto, se han examinado los suelos de cimentación del tramo oval Pedro Vilcapaza de la avenida Circunvalación; se ha adicionado material de cantera en una cantidad de 30% en peso, y esto ha mejorado sus características mecánicas: Entendiendo que el reciclado es factible aún con la mejora de las propiedades mecánicas de los suelos de fundación de un nuevo pavimento permite la clasificación AASHTO de A-6-2 a A1-a, los límites de consistencia del índice de plasticidad de 16.50% a 7,10%, y la densidad seca (DS) de 1,841 gr/cm³ a 2,106 gr/cm³; Los suelos de base de un pavimento pueden reciclarse añadiendo los residuos de mezcla bituminosa procedentes de pavimentos flexibles renovados en las cantidades adecuadas. En el presente trabajo, la adición de un 5% de residuos de mezcla bituminosa ha mejorado las siguientes características:



clasificación de suelos AASHTO de A-2-4 a A-1-a, límites de consistencia, concretamente el índice de plasticidad (I_p) de 6.60% a 5.46%, y densidad seca de 1.984 gr/cm³ a 2.1060 gr/cm³. Sin embargo, ya no se aconseja añadir más del 5%.



2.2 MARCO TEÓRICO

2.2.1 Pavimentos

Según (Rodríguez & Rodríguez, 2004), el pavimento se refiere a las capas de material seleccionado que reciben directamente las cargas del tráfico y las disipan hacia las capas inferiores, creando una superficie de rodadura que debe funcionar de manera eficiente. Para lograr un rendimiento adecuado, se requieren las siguientes condiciones: ancho apropiado, alineación horizontal y vertical correcta, resistencia suficiente para evitar fallas y grietas bajo cargas, así como una buena adherencia entre el vehículo y el pavimento incluso en condiciones húmedas. También debe tener la capacidad de resistencia ante los esfuerzos destructivos del tráfico, las condiciones climáticas y el agua. Además, se debe garantizar una buena visibilidad y un entorno agradable para prevenir la fatiga del conductor. (p. 16).

Dado que la carga ejercida sobre un pavimento disminuye a medida que se profundiza, se recomienda colocar los materiales de mayor resistencia en las capas superiores. Por otro lado, las terracerías suelen contener materiales de menor calidad, pero son los más comunes en la naturaleza y, por ende, también los más económicos (Rodríguez & Rodríguez, 2004, pág. 17).

Dado que el grosor de cada capa se elige para reducir las cargas que soporta la capa inmediatamente inferior, la estratificación de un pavimento se realiza teniendo en cuenta consideraciones económicas. La forma de construcción influye en la resistencia de las distintas capas, además del material empleado. La compactación y el contenido de humedad son dos variables importantes a este respecto. El material sufrirá deformaciones permanentes si no se compacta adecuadamente a medida que se consolida bajo la tensión aplicada (Rodríguez & Rodríguez, 2004, pág. 17).



De acuerdo a (Aguilar & Infanzón, 2020), el elemento estructural completo del pavimento, conocido como subrasante, es la tierra de cimentación. La subrasante debe estar preparada para soportar un paquete estructural, que es un sistema de capas de distintos grosores destinadas a soportar cargas externas durante un tiempo predeterminado. El pavimento se ve desde la perspectiva del usuario como una superficie que debe ser segura y cómoda para caminar. Su objetivo es ofrecer un servicio de alta calidad que tenga un impacto beneficioso en el estilo de vida de las personas (p. 11).

Según (Manual de carreteras "Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos", 2013) el pavimento es una estructura de varias capas erigida sobre el subsuelo de una carretera con el objetivo de resistir y dispersar las tensiones producidas por el tráfico en movimiento, al tiempo que mejora la seguridad y el confort del tráfico. La capa de rodadura, la subbase y la base son las tres capas principales que componen el pavimento. También nos indica los siguientes conceptos:

“Capa de Rodadura: Es la parte superior de un pavimento y se presenta en diversos materiales, como adoquines, hormigón rígido de cemento Portland y asfalto flexible. Su finalidad principal es ayudar directamente a la actividad de los vehículos ofreciendo una superficie resistente y duradera” (p. 25).

“Base: Esta capa, que se sitúa debajo de la capa de rodadura, tiene la responsabilidad principal de soportar, dispersar y transmitir las tensiones provocadas por el tráfico. Esta capa será de material granular drenante con un CBR no superior al 80% o será tratada con cemento, cal o asfalto” (p. 25).

Subbase: Es una capa que soporta a la base y a la carpeta. Adicionalmente, la capa subbase desempeña un papel fundamental al funcionar como un sistema de drenaje y control de la ascensión capilar del agua. No obstante, la inclusión de esta capa puede



variar según el tipo, diseño y dimensionamiento específicos del pavimento, y en algunos casos puede prescindirse de ella. Esta capa puede estar compuesta por un material granular con un Índice de Soporte de California (CBR) igual o superior al 40%, o puede ser tratada con asfalto, cal o cemento para mejorar sus propiedades y contribuir al rendimiento general del pavimento (p. 25).

2.2.1.1 Tipos de pavimentos

Según (Rodríguez & Rodríguez, 2004), Las losas de hormigón hidráulico, que en ocasiones pueden incorporar armadura de acero, constituyen el pavimento rígido. La vida útil de este pavimento oscila entre 20 y 40 años, a pesar de que su coste inicial es superior al del pavimento flexible. Los únicos lugares donde este tipo de pavimento necesita reparación suelen ser las conexiones entre losas (p. 17).

(Sáez, 2019) indica que los pavimentos flexibles, es aquel cuya estructura total se defleca o flexiona dependiendo de las cargas que transitan sobre él. Está conformado, principalmente, de una carpeta asfáltica, que se apoya en otras capas inferiores denominadas base y sub base. Cada capa recibe cargas por encima y se extiende en ellas, luego, pasa estas cargas a las siguientes capas hasta que el esfuerzo se disipe (p. 11).

Según (Sáez, 2019) el pavimento rígido se caracteriza por estar compuesto por una losa de concreto Portland que se coloca sobre una base o directamente sobre la subrasante. Este tipo de pavimento transmite las cargas generadas por el tráfico de forma directa al suelo de manera eficiente, ya que es autoresistente y puede soportar las cargas sin deformarse significativamente (p. 11).

El pavimento flexible se destaca por su menor costo de construcción inicial, aunque su vida útil es más limitada, generalmente entre 10 y 15 años. Una de sus



desventajas es que requiere un mantenimiento constante para asegurar su durabilidad. Una base, una subbase y una capa de rodadura asfáltica constituyen la mayor parte de este tipo de pavimento. Una base flexible o semirrígida con una capa de rodadura de una mezcla bituminosa de asfalto o alquitrán de consistencia plástica es lo que define a los pavimentos flexibles (Rodríguez & Rodríguez, 2004, pág. 18).

También tenemos la clasificación según (Manual de carreteras "Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos", 2013) la cual nos indica:

- Pavimentos Flexibles
- Pavimentos Semirrígidos
- Pavimentos Rígidos

La capa de rodadura del pavimento flexible es un ligante formado por materiales bituminosos, como ligantes, áridos y, quizás, aditivos. El pavimento flexible se compone de varias capas, incluidas capas granulares como la subbase y la base. La capa de rodadura, que puede colocarse encima de las capas granulares, suele ser de composición asfáltica. El mortero asfáltico, el tratamiento superficial bicapa, el micropavimento, el macadán asfáltico, la mezcla asfáltica en frío y la mezcla asfáltica en caliente son algunas de las opciones más populares para las capas de rodadura hechas de asfalto (p. 25).

Se denomina pavimento semirrígido a una construcción formada en su mayor parte por capas de asfalto y con un espesor de material bituminoso. Sobre una base tratada con asfalto se emplea una capa de asfalto caliente. La adición de una capa de asfalto sobre una base tratada con cemento o cal también se considera pavimento semirrígido. Los pavimentos de adoquines entran en la categoría de pavimentos semirrígidos (p. 26).

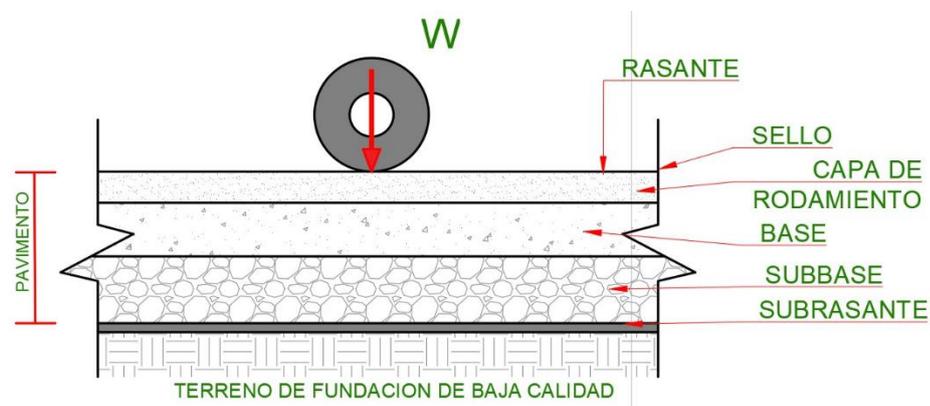
La capa de subbase del pavimento rígido está compuesta en su mayor parte por material granular. No hay que olvidar que esta capa puede ser tanto una base granular como una estabilizada con cemento, asfalto o cal. También se incluye una capa de rodadura, formada por losas de hormigón de cemento hidráulico, que sirven de aglutinante y están compuestas por áridos. También pueden utilizarse aditivos en la mezcla en circunstancias específicas para mejorar las cualidades del hormigón (Manual de carreteras "Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos", 2013, pág. 26).

2.2.1.2 Estructura de un pavimento flexible

“A continuación se presentan algunas categorías para agrupar las cualidades relativas de cada capa en la construcción de carreteras, como el espesor, la resistencia y la deformabilidad en las circunstancias de servicio previstas” (Sáez, 2019, pág. 21).

Figura 1

Estructura de un pavimento flexible.



Fuente: (Rodríguez & Rodríguez, 2004, pág. 21).

2.2.1.2.1 Carpeta de rodadura

Según (Aguilar & Infanzón, 2020), la capa que se coloca sobre la subbase del pavimento se conoce como capa de rodadura. Su objetivo principal es proteger las capas subyacentes del pavimento de la intrusión de humedad impermeabilizando la superficie

e impidiendo la infiltración de la lluvia. Además, impide que las capas subyacentes se hundan como consecuencia del tráfico (p. 18)

2.2.1.2.2 Base granular

Según (Menéndez, 2016), las bases granulares en los pavimentos flexibles deben contar con la suficiente fricción entre partículas capaz de ser estable ante la acción de las cargas vehiculares. Las bases deben tener un valor limitado de finos pasante de la malla N° 200 suficiente para mantener el grado de compactación y la cohesión de sus componentes. Sin embargo, una cantidad excesiva de finos puede ser perjudicial al bloquear el drenaje y, por ende, crear otros problemas. Las bases granulares deben ser compactadas hasta alcanzar su densidad máxima alcanzable que minimice la deformación permanente producto de las cargas vehiculares (p. 161).

Tabla 1

Requerimiento granulométrico para base granular.

Tamiz	Porcentaje que pasa en peso			
	Gradación A	Gradación B	Gradación C	Gradación D
50 mm. (2")	100	100	100	100
25 mm. (1")		75-95	100	
9,5 mm. (3/8 ")	30-65	40-75	50-85	60-100
4,75 mm. (N.º 4)	25-55	30-60	35-65	50-85
2,0 mm. (N.º 10)	15-40	20-45	25-50	40-70
425 µm. (N.º 40)	8-20	15-30	15-30	25-45
75 µm. (N.º 200)	2-8	5-15	5-15	8-15

Fuente: (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013)

2.2.1.2.3 Sub base

Según (Menéndez, 2016), la subbase cumple la función de dotar estructura de soporte suficiente a los pavimentos. Adicionalmente puede servir como filtro y/o capa

anticontaminante de la base con la subrasante y también como plataforma de trabajo cuando la subrasante tiene una baja capacidad de soporte (p. 164).

Debe notarse que la granulometría requerida para la subbase es similar a la base granular. La diferencia radica en que la subbase puede ser producto directo del zarandeo sin necesidad de pasar por un proceso de trituración a diferencia de la base granular que si requiere caras fracturadas (p. 164).

Tabla 2

Requerimiento para subbase granular.

Tamiz	Porcentaje que Pasa en Peso			
	Gradación A	Gradación B	Gradación C	Gradación D
50 mm. (2")	100	100	-	-
25 mm. (1")	-	75-95	100	100
9,5 mm. (3/8")	30-65	40-75	50-85	60-100
4,75 mm. (N.º 4)	25-55	30-60	35-65	50-85
2,0 mm. (N.º 10)	15-40	20-45	25-50	40-70
425 µm. (N.º 40)	8-20	15-30	15-30	25-45
75 µm. (N.º 200)	2-8	5-15	5-15	8-15

Fuente: (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013)

La capa base desempeña una función económica al permitirnos reducir gastos convirtiendo una parte del espesor de la capa de base en un equivalente de la subbase. Además, esta capa impide que la subrasante absorba el pavimento e impide que el agua de las capas inferiores ascienda por capilaridad. La transmisión eficaz de la tensión desde la capa base a las capas inferiores es crucial (p.164).



a) Principales funciones de la Subbase.

- Transmitir los esfuerzos a la capa subrasante de manera adecuada, asegurando una distribución uniforme de las cargas a lo largo de la estructura del pavimento.
- Proporcionar una interfaz entre los materiales de la base y la subrasante, evitando la contaminación y la mezcla no deseada de ambos materiales.
- Minimizar los efectos adversos en el pavimento causados por cambios volumétricos y el rebote elástico de las terracerías o el terreno de cimentación.
- Reducir el costo total del pavimento, ya que al estar ubicada debajo de la capa base, está sujeta a menores esfuerzos y puede cumplir con especificaciones menos rigurosas. Esto permite utilizar materiales de menor costo en comparación con los utilizados en la capa base (Rodríguez & Rodríguez, 2004).

2.2.1.2.4 Sub rasante

Según (Rodríguez & Rodríguez, 2004), la subrasante, que se encuentra en los últimos 30 cm de una terracería de corte o terraplén, desempeña un papel fundamental como cimiento para los pavimentos. Por lo general, está compuesta por el mismo suelo utilizado en la terracería. Es de vital importancia que el nivel de las aguas freáticas se encuentre al menos a 1.50 m por debajo de la Subrasante, lo cual se logra mediante la implementación de drenajes o elevando el nivel de la capa (p. 22).

La sub-rasante cumple una función crucial al soportar las cargas transmitidas por el pavimento y proporcionarle sustentación. Es considerada la cimentación del pavimento y su calidad influye directamente en el espesor requerido, lo que puede resultar en ahorros

de costos sin comprometer la calidad del pavimento. Para asegurar un desempeño adecuado, la sub-rasante debe cumplir con ciertas características. Estas incluyen un límite de expansión máximo del 5%, un grado de compactación mínimo del 95% y una resistencia máxima a la penetración de 3 pulgadas (7.62 cm). Además, para carreteras con poco tráfico, se aconseja un espesor mínimo de 30 cm, mientras que para carreteras con un Tráfico Medio Diario Anual (TMAA) de más de 2000 vehículos, se aconseja un espesor de 50 cm. Evitar la contaminación del pavimento por el terraplén y su absorción por el movimiento de tierras es otro papel crucial de la subrasante. La integridad de la estructura se salvaguarda y su vida útil se prolonga manteniendo una barrera eficaz entre el pavimento y el suelo subyacente (Rodríguez & Rodríguez, 2004, pág. 23).

2.2.1.3 Característica de un pavimento (propiedades físicas)

De acuerdo a (Aguilar & Infanzón, 2020), nos menciona que:

A continuación, se enumeran los aspectos más cruciales del cemento asfáltico que deben tenerse en cuenta a la hora de planificar, construir y mantener las carreteras:

- **Durabilidad:** muestra en qué medida las propiedades de un cemento asfáltico siguen presentes después de haber sido sometido a procesos naturales de envejecimiento y degradación.

Se refiere al grado de conservación de las cualidades originales tras la exposición a circunstancias típicas de deterioro. Es la característica física más difícil de cuantificar, ya que en ella influyen varios factores (Salamanca, 2007)

- **Adhesión y Cohesión:** Adhesión es la capacidad del cemento asfáltico para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación. Cohesión es la



capacidad del cemento asfáltico de mantener firmemente en su puesto las partículas de agregado en el pavimento terminado.

- Susceptibilidad al endurecimiento y al envejecimiento: El endurecimiento del asfalto es causado por la combinación con el oxígeno (oxidación) o por volatilización (estado sólido al gaseoso). La oxidación y el endurecimiento más severo, ocurren durante el mezclado, debido a que, el asfalto se encuentra a altas temperaturas y en películas delgadas.
- Susceptibilidad a la temperatura: Esta es una de las propiedades más importantes del asfalto. Esta propiedad, varía entre asfaltos de diferente origen, sin importar que tengan el mismo grado de consistencia (pp.10-11). Como indica (Salamanca, 2007), los asfaltos son termoplásticos, esto implica que, al cambiar su temperatura, se endurecen (más viscosos) y se reblandecen (menos viscosos). Cuando el medio está a temperatura ambiente, debe ser lo suficientemente viscoso como para mantener unidas las partículas agregadas y lo suficientemente fluido como para cubrir todas las partículas (agregados).

2.2.1.3.1 Comportamiento de un pavimento

(Higuera, 2012) indica que la máxima magnitud de las variables de los estados tensionales, se presenta en el punto de la aplicación de la carga sobre la estructura del pavimento y va disminuyendo a medida que se aleja del punto de aplicación de la carga en un contorno que puede llegar hasta los 2.4m, donde la magnitud de los esfuerzos, deformaciones y deflexiones es muy pequeña.

También que en la mecánica de pavimentos la magnitud de los esfuerzos, deformaciones y deflexiones es relativamente pequeña, pero si consideramos el efecto



cíclico de la aplicación de las cargas del tránsito y las solicitaciones de la estructura del pavimento, los estados tensionales superan a los valores admisibles de los materiales y se produce la fatiga, el ahuellamiento y la deformación de la estructura del pavimento. Por esta razón, en el diseño racional o mecanista de las estructuras de pavimentos se debe controlar la magnitud de los estados tensionales.

2.2.1.4 Ciclo de vida de un pavimento

Según (Gamboa, 2009) se denomina ciclo de vida del pavimento a la proyección del tiempo de vida útil de un pavimento, ya que desde su construcción comienza a deteriorarse inicialmente imperceptible hasta llegar a su deterioro total.

Se puede clasificar en las siguientes etapas:

- a) **Construcción.** Es la etapa inicial que cumple con todos los estándares de calidad para satisfacer todos los niveles de serviciabilidad.
- b) **Deterioro imperceptible.** Esta etapa generalmente se da en la carpeta asfáltica debido al clima y al tránsito. Este deterioro es el desgaste de la carpeta, pero a simple vista no es visible.

Muchas veces no se realiza el mantenimiento en esta etapa debido a que el pavimento, visiblemente se encuentra en buenas condiciones, su mantenimiento en esta etapa es sumamente importante puesto que si no se realiza el tiempo de vida útil del pavimento esta disminuye drásticamente.

- c) **Deterioro Acelerado.** Cuando la primera capa del pavimento se deteriora, lo que generalmente se da dentro de varios años de la etapa inicial, toda la

resistencia de toda la estructura del pavimento se ve reducida por lo que el deterioro se da de manera inmediata.

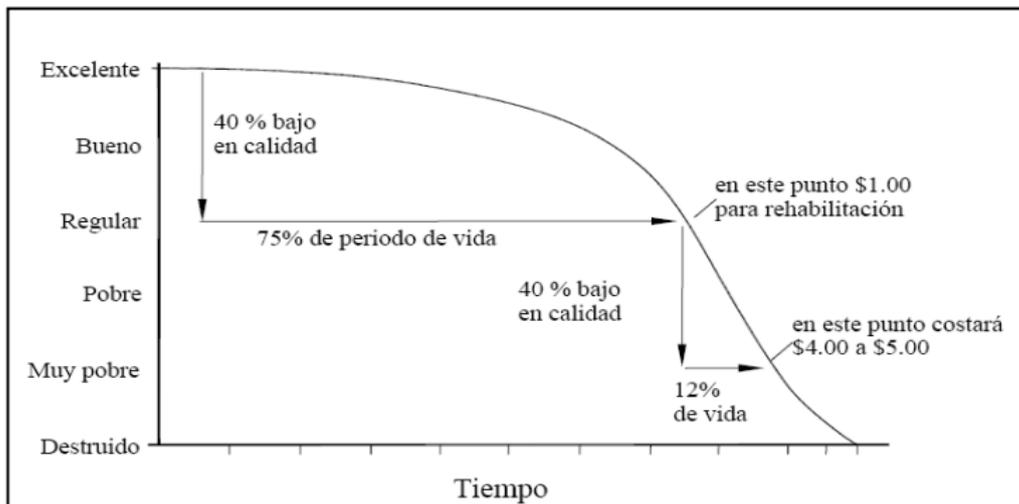
Podemos identificar esta etapa al observar que existen fallas notorias en la superficie de rodadura.

d) Deterioro Total. Es la etapa final del pavimento, lo que implica la destrucción total del pavimento. Su nivel de serviciabilidad es prácticamente nulo por lo que se puede decir que es intransitable para los vehículos.

Según la siguiente imagen se puede representar gráficamente lo indicado anteriormente.

Figura 2

Cálculo del índice de condición aplicado en del pavimento flexible en la av. Las palmeras de piura, 2009

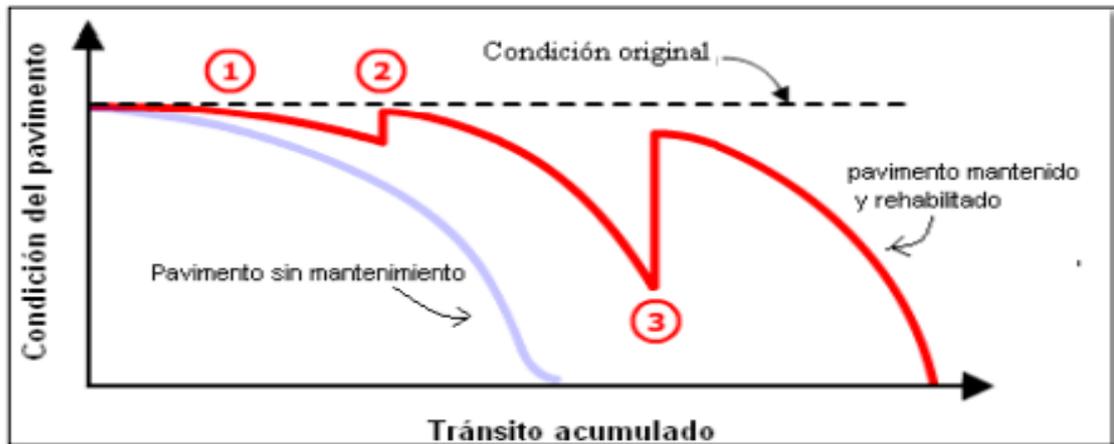


Fuente: (Medina & De La Cruz, 2015)

(Medina & De La Cruz, 2015) también nos comenta sobre el alargamiento del ciclo de vida de los pavimentos con trabajos de mantenimiento y rehabilitación según la siguiente figura 3.

Figura 3

Evaluación superficial del pavimento flexible del Jr. José Gálvez del distrito de Lince aplicando el método del PCI (2015).



Fuente: (Medina & De La Cruz, 2015)

Se observa la curva gris la vida útil de un pavimento sin ningún tipo de mantenimiento, con la curva roja se muestra lo mencionado líneas arriba, la primera etapa del deterioro imperceptible, el deterioro rápido y el deterioro total para finalizar el ciclo de vida del pavimento.

2.2.2 Pavimento flexible

2.2.2.1 Comportamiento de un pavimento asfáltico

(Crispín & Helguero, 2019), menciona a cerca del comportamiento de pavimento asfáltico:

El comportamiento de los pavimentos de asfalto incluye factores relacionados con su funcionalidad, construcción y seguridad. La resistencia a la fricción entre los neumáticos y el pavimento es uno de los factores importantes. El estado físico del pavimento, conocido como rendimiento estructural, puede influir considerablemente en su resistencia y capacidad portante.



2.2.3 Mezclas asfálticas

(Garnica, Flores, José, & Delgado, 2005), explica que la definición de mezcla asfáltica es una mezcla de áridos minerales unidos por un ligante asfáltico, lo que da lugar a una capa homogénea de asfalto que cubre totalmente los áridos.

2.2.3.1 Composición de las mezclas asfálticas

Según (Menéndez, 2016), las mezclas asfálticas se componen de agregados minerales, relleno, asfalto y, opcionalmente, modificadores o aditivos. Las rocas se trituran para producir áridos, que luego se separan en montones en función de su tamaño. Los áridos de mayor tamaño se denominan áridos gruesos, mientras que la arena o los áridos finos son los que pueden pasar a través de la malla N° 4. La arena se crea mezclando determinadas arenas naturales con arenas creadas durante el proceso de trituración de los áridos. Si no hay suficiente material para pasar a través de la malla N.º 200, se añade un relleno, que suele ser de cal hidratada o cemento (p. 173).

La fricción y la cohesión entre los componentes de las mezclas asfálticas interactúan para darle sus cualidades mecánicas. El tamaño máximo del árido grueso y la distribución del tamaño de los áridos influyen en la fricción, que es el resultado de la unión entre las partículas. Por el contrario, la cohesividad resulta de las características del asfalto y de la composición de la mezcla fina (p. 173).

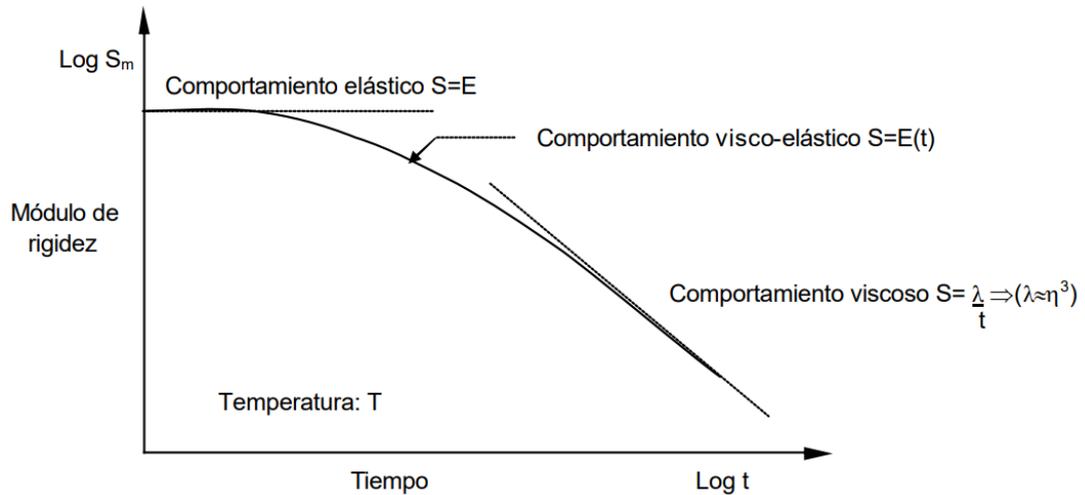
2.2.3.1.1 Comportamiento de las mezclas asfálticas

Debido a la interacción de sus componentes, las mezclas asfálticas exhiben un comportamiento visco-elastoplástico. Mientras que los agregados pétreos muestran un comportamiento elastoplástico, el mástico (combinación de asfalto y polvo mineral)

presenta un comportamiento viscoelástico. Por lo tanto, las mezclas asfálticas se caracterizan por un comportamiento visco-elástico-plástico (Garnica et al., 2005).

Figura 4

Comportamiento de una mezcla asfáltica.



Fuente: (Garnica, Flores, José, & Delgado, 2005)

2.2.3.1.2 Cemento Asfáltico

Cuando se calienta a 175°C, el cemento asfáltico no debe generar espuma, tener un aspecto homogéneo y estar libre de humedad. Además, el cemento asfáltico puede alterarse mediante la adición de otros aditivos, como rejuvenecedores, polímeros u otros productos aprobados, siempre que superen las pruebas necesarias. En estas situaciones, las normas específicas especificarán el tipo de aditivo y los parámetros que deben satisfacer tanto el cemento asfáltico modificado como las mezclas asfálticas resultantes. El Supervisor deberá aceptar estos requisitos, así como la dosis y la dispersión uniforme del aditivo incluido (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013, pág. 471).

El cemento asfáltico es un aglomerante de color oscuro que consiste en mezclas complejas de hidrocarburos no volátiles de alto peso molecular, los cuales se obtienen del



petróleo crudo. Estos hidrocarburos pueden estar disueltos en el asfalto de forma natural, mediante la evaporación de depósitos encontrados en la superficie terrestre, conocidos como asfaltos naturales. También se pueden obtener a través de procesos de destilación industrial, siendo el bitumen el componente predominante en estos casos (Valenzuela, 2003)

a) Composición química del asfalto

(Menéndez, 2016), indica que elementos como el vanadio, el níquel, el hierro, el magnesio y el calcio están presentes en concentraciones microscópicas en el asfalto. Estos metales pueden encontrarse como estructuras de queroseno, óxidos o sales inorgánicas. La mayoría de los asfaltos incluyen estos elementos en cantidades variadas, según un estudio elemental de varios tipos de asfalto fabricados a partir de diversos petróleos crudos:

- Carbón 82 – 88%
- Hidrogeno 8 – 11%
- Azufre 0 – 6%
- Oxígeno
- Nitrógeno

(Salamanca, 2007), manifiesta que después de analizar varios asfaltos se obtiene la tabla 3 de los principales elementos que componen el asfalto, la cual se muestra a continuación.

Tabla 3

Representación de la composición química elemental de un asfalto.

Código	B-2959	B-3036	B-3051	B-3602
Origen	Mezcla Mexicana	Arkansas Lousiana	Boscan	California
Porcentaje de Carbono	83.77	85.78	82.90	86.77
Porcentaje de Hidrógeno	9.91	10.19	10.45	10.94
Porcentaje de Nitrógeno	0.28	0.26	0.78	1.10
Porcentaje de Azufre	5.25	3.41	5.43	0.99
Porcentaje de Oxígeno	0.77	0.36	0.29	0.20
Vanadio, ppm.	180.00	7.00	1,380.00	4.00
Níquel, ppm.	22.00	0.40	109.00	6.00

Fuente: (Salamanca, 2007).

b) Clasificación por penetración

En el Perú, el ensayo de penetración se utiliza como método de clasificación de los asfaltos. Este ensayo, que evalúa la consistencia del asfalto, ha sido utilizado desde el siglo XIX para caracterizar este material. Los ensayos de penetración y punto de ablandamiento son de origen empírico, es esencial que estos son llevados a cabo bajo las mismas condiciones que los estándares establecen para que sus resultados tengan validez (Menéndez, 2016, pág. 175).

Tabla 4

Especificaciones técnicas del cemento asfáltico clasificado por penetración.

Tipo		Grado Penetración									
Grado	Ensayo	PEN 40-50		PEN 60-70		PEN 85-100		PEN 120-150		PEN 200-300	
		min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx
Pruebas sobre el Material Bituminoso											

Tipo		Grado Penetración									
Grado	Ensayo	PEN 40-50		PEN 60-70		PEN 85-100		PEN 120-150		PEN 200-300	
		min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, 0,1mm	MTC E 304	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto de Inflamación, °C	MTC E 312	232		232		232		218		177	
Ductilidad, 25°C, 5cm/min, cm	MTC E 306	100		100		100		100		100	
Solubilidad en Tricloro-etileno, %	MTC E 302	99.0		99.0		99.0		99.0		99.0	
Índice de Penetración (Susceptibilidad Térmica) (1)	MTC E 304	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
Ensayo de la Mancha (Oliensies) (2)		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Solvente Nafta - Estándar		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Solvente Nafta - Xileno, % Xileno	AASHTO M 20	Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Solvente Heptano - Xileno, % Xileno		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Pruebas sobre la Película Delgada a 163°C, 3,2 mm, 5 h											
Pérdida de masa, %	ASTM D 17S4	0.8		0.8		1.0		1.3		1.5	
Penetración retenida después del ensayo de película fina, %	MTC E 304	55+		52+		47+		42+		37+	
Ductilidad del residuo a 25°C, S cm/min, cm ³	MTC E 306			50		75		100		100	

Fuente: (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013).

c) Clasificación por viscosidad

En la década de 1960, la FHWA, ASTM, AASTHO y una serie de organismos de carreteras de EE.UU. empezaron a clasificar los asfaltos de acuerdo a su viscosidad mediante la norma ASTM D3381 (Menéndez, 2016, pág. 175).

Tabla 5

Especificaciones técnicas del cemento asfáltico clasificado por viscosidad.

Características	Grado de Viscosidad				
	AC-2,5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-40
Viscosidad Absoluta a 60°C, Poises	250±50	500±100	1.000±200	2.000±400	4.000±800
Viscosidad Cinemática, 135°C St mínimo	80	110	150	210	300
Penetración 25°C, 100gr, 5 s mínimo	200	120	70	40	20
Punto de Inflamación COC, °C mínimo	163	177	219	232	232
Solubilidad en tricloroetileno, % masa, mínimo	99	99	99	99	99
Pruebas sobre el residuo del ensayo de película fina					
*Viscosidad					
Absoluta, 60°C, Poises máximo	1,250	2,500	5,000	10,000	20,000
*Ductilidad, 25°C, Scm/min, cm, mínimo	100	100	so	20	10
Ensayo de la Mancha (Oliensies)					
Solvente Nafta - Estándar	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo
Solvente Nafta -Xieno, %Xieno	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo
Solvente Heptano• -Xileno, %Xileno	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo

Fuente: (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013).

2.2.3.1.3 Agregados

Para evitar que el material asfáltico se desprenda debido a la acción del agua y del tráfico, los áridos pétreos utilizados en la creación de tratamientos o mezclas bituminosas deben tener la capacidad de retener el material asfáltico aplicado. Sólo se permitirá el uso de áridos con cualidades hidrófilas si se aplica un aditivo de eficacia probada que garantice una adherencia adecuada. (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013).



De acuerdo a (Aguilar & Infanzón, 2020), cualquier sustancia mineral dura e inerte que se utilice en la creación de pavimentos de mezcla bituminosa en caliente en forma de partículas o trozos graduados se denomina "árido", también conocido como roca, material granular o árido mineral. La arena, la grava, la piedra triturada, la escoria y el polvo de roca son ejemplos de tipos típicos de áridos. En la mayoría de los sistemas de pavimentación, los áridos representan entre el 90% y el 95% del peso y entre el 75% y el 85% del volumen. Dado que los áridos aportan la mayor parte de la capacidad de carga y de las propiedades resistentes, su selección tiene una gran influencia en el comportamiento del pavimento. A la hora de elegir los áridos, también deben tenerse en cuenta los siguientes rasgos de calidad (p. 28):

- Graduación y tamaño máximo
- Forma de la partícula
- Textura de la superficie
- Capacidad de absorción
- Afinidad con el asfalto
- Peso específico

(Chuman, 2017), nos dice lo siguiente acerca de los agregados:

Los áridos pétreos se componen de partículas sólidas que tienen un tamaño y una forma predeterminados. Los áridos finos, los áridos gruesos y las cargas minerales son las tres categorías de áridos que se eligen para su uso en las mezclas asfálticas. Para ser utilizados en las mezclas asfálticas, los áridos deben ser:



a) Agregados gruesos

Según (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013), el agregado grueso debe tener las siguientes características para ser usado en una Mezcla Asfáltica en Caliente:

Tabla 6

Requerimientos para 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 Total	MTC E 219	0.5% máx.	0.5% máx.
Absorción	MTC E 206	1.0% máx.	1.0% máx.

Fuente: (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013).

b) Agregado fino

Según (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013), el agregado fino debe poseer las siguientes características para ser usado en una mezcla asfáltica en caliente:

Tabla 7*Requerimientos para 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.	8máx.
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 20S	0,5% máx.	0,5% máx.

Fuente: (*Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013*).

c) **Filler mineral**

El relleno o sustancia de relleno, se añade a las mezclas asfálticas para equilibrar el tamaño de las partículas de los pequeños áridos. Su principal objetivo es aumentar la cohesión de la mezcla rellenando los espacios entre las partículas. La cal hidratada, el cemento Portland, el polvo de roca y las cenizas finas son algunos de los componentes adecuados que pueden utilizarse como relleno en las mezclas asfálticas. Estos componentes contribuyen a mejorar las cualidades mecánicas y la estabilidad de la mezcla, haciendo que el pavimento sea más resistente y duradero (*Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013, pág. 677*).

2.2.3.2 Tipos de mezclas asfálticas

2.2.3.2.1 Mesclas asfálticas en caliente

Se crea combinando los componentes de la mezcla asfáltica a cierta temperatura, normalmente entre 130°C y 160°C, dependiendo de la viscosidad del cemento asfáltico (que debe ser la adecuada para la adherencia entre el cemento asfáltico y los áridos pétreos) (MTC, 2013).



(Instituto de Asfalto, 2001, citado por Aguilar & Infanzón, 2020) indica que, el asfalto y la grava se añaden a la mezcla asfáltica en caliente en proporciones exactas. Estas proporciones relativas determinan las características físicas de la mezcla y, en última instancia, su rendimiento como pavimento terminado. El método Marshall y el método Hveem son dos métodos de diseño utilizados a menudo para determinar las proporciones ideales de asfalto y áridos en una mezcla. Para determinar las proporciones ideales de asfalto y agregado para proporcionar la resistencia y longevidad especificadas del pavimento, utilice el Método Marshall o el Método Hveem. Estos métodos se basan en pruebas y análisis realizados en laboratorio utilizando muestras de mezcla de pavimentación. Durante el análisis de la muestra de mezcla de pavimentación, se evalúan cuatro características clave de la mezcla que pueden influir en su comportamiento. Estas características incluyen la estabilidad Marshall, la fluidez Marshall, la densidad aparente y la resistencia a la fatiga. Estos análisis proporcionan información importante sobre cómo la mezcla responderá a las cargas del tráfico, la resistencia al agrietamiento y la durabilidad a largo plazo. Al considerar estas características y su influencia en el comportamiento de la mezcla, los ingenieros y diseñadores de pavimentos pueden tomar decisiones informadas sobre las proporciones de asfalto y agregado que se deben utilizar para obtener un pavimento de calidad y adecuado para las condiciones de tráfico previstas (p. 29). Las cuatro características son:

- Densidad de la mezcla
- Vacíos de aire, o simplemente vacíos
- Vacíos en el agregado mineral
- Contenido de asfalto (p. 57).

Según (Menéndez, 2016), en este tipo de mezclas, se realiza el calentamiento del cemento asfáltico previo a su mezcla con los agregados. Antes de la mezcla, es posible incorporar mejoradores de adherencia, modificadores e incluso material reciclado. Además, se pueden utilizar diferentes variantes de granulometría, como mezclas densas, mezclas abiertas o mezclas escalonadas (p. 173).

2.2.3.2.2 *Gradación*

La gradación de la mezcla asfáltica en caliente deberá ser de acuerdo al siguiente cuadro (También se puede utilizar las gradaciones que se encuentran en la AST D 3515 e Instituto del Asfalto). (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013).

Tabla 8

Husos granulométricos para tipos de mezclas asfálticas en caliente.

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.0 4)	43-54	51-68	65-87
2,00 mm (N .0 10)	29-45	38-52	43-61
425 μ m (N.0 40)	14-25	17-28	16-29
180 μ m (N.0 80)	8-17	8- 17	9-19
75 μ m (N.0 200)	4-8	4-8	5-10

Fuente: (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013).

2.2.3.2.3 *Mezclas asfálticas en frío*

Según (Menéndez, 2016), “en este tipo de mezcla, los áridos y el cemento asfáltico se combinan con agua y un emulsionante o disolvente. Esto permite mezclar los componentes sin afectar a la temperatura del cemento asfáltico” (p. 174).



Según (Padilla, 2004, citado por Aguilar & Infanzón, 2020), las mezclas a base de emulsiones asfálticas se utilizan con frecuencia en la construcción y mantenimiento de carreteras secundarias. Se aconseja sellar las mezclas abiertas en frío con lechadas asfálticas para aumentar su vida útil. Incluso semanas después de su fabricación, estas mezclas conservan una buena trabajabilidad. Debido al uso de emulsiones con asfalto fluidificado, el ligante empleado en ellas tiene una viscosidad baja durante un largo periodo de tiempo. Aunque el aumento de la viscosidad es gradual cuando está almacenado, una vez aplicado en una capa fina, el agente fluidificante se evapora, lo que provoca un endurecimiento bastante rápido. Otra clase de mezclas en frío puede crearse sin necesidad de un ingrediente fluidificante utilizando emulsiones de rotura lenta, aunque su uso está menos extendido. En cuanto la emulsión se ha dividido, estas mezclas pueden comprimirse. El proceso constante de aumento de la resistencia de la mezcla se denomina maduración, y en él interviene sobre todo el agua perdida durante la rotura de la emulsión, que aumenta la cohesividad de la mezcla (p. 30).

Se denomina mezcla asfáltica en frío a la combinación de ácido emulsificante, agua, agregados pétreos y ligante asfáltico utilizado convenientemente en Slurry Seal y Micropavimento (International Slurry Surfacing Association, 2021).

2.2.3.2.4 Características de mezclas asfálticas en caliente

Se dice que es en caliente por que tanto los agregados pétreos, así como el cemento asfáltico son precalentados para su mezcla. (Garnica, Flores, José, & Delgado, 2005), también nos menciona propiedades más relevantes en una mezcla asfáltica en caliente son:



a) Estabilidad.

“Capacidad de la mezcla asfáltica para resistir deformación y desplazamiento”
(Garnica, Flores, José, & Delgado, 2005).

Estos parámetros de carga se refieren al punto de presión en el que una mezcla asfáltica caliente compactada en una briqueta se deforma o falla por completo. Este número puede utilizarse para determinar cuánto durará una mezcla asfáltica (Huari, 2020, pág. 44).

“Capacidad de resistir a los esfuerzos producidos por el tránsito que producen las deformaciones” (Sáez, 2019)

b) Durabilidad.

Se trata de una cualidad que procede naturalmente de la resistencia de la mezcla asfáltica a los efectos corrosivos del aire, el agua, la temperatura y el tráfico, que pueden envejecer el asfalto, provocar la desintegración de los áridos y separar la película asfáltica de los áridos (Garnica, Flores, José, & Delgado, 2005).

“Depende del diseño de la mezcla asfáltica, de la película asfáltica que rodea cada árido mineral, del calibre de los áridos y del propio asfalto” (Lagla, 2014, pág. 10).

c) Flexibilidad.

“Capacidad de la mezcla asfáltica para adaptarse a los movimientos y asentamientos progresivos de la base y la subrasante sin agrietarse ni romperse”.
(Garnica, Flores, José, & Delgado, 2005).



Capacidad del pavimento para adaptarse a los movimientos y asentamientos de la base. Después de que se ha determinado la construcción de la carpeta, el pavimento tiene que empezar a trabajar en su vida útil, la cual estará afectada por ciertos movimientos producidos por las cargas y esfuerzos que soportará (acción y reacción frente a ellas) (Sáez, 2019).

d) Resistencia a la fatiga.

La fatiga se encuentra directamente relacionada a la deformación horizontal por tracción, por lo tanto, si la deformación es mayor, la vida útil del pavimento se verá afectada. Está se presentan como ahuellamiento o por agrietamiento térmico (Lagla, 2014, pág. 15).

“Capacidad de soportar los esfuerzos provocados por el tránsito” (Sáez, 2019).

e) Resistencia al fracturamiento por baja temperatura.

“Capacidad de la mezcla asfáltica para resistir el agrietamiento en tiempo frío. depende sobre todo de la firmeza del asfalto durante las bajas temperaturas” (Garnica, Flores, José, & Delgado, 2005).

Es la capacidad de pavimento para resistir el agrietamiento ante cambios bruscos de temperatura, se debe considerar en el diseño que el gradiente térmico no debe ser mayor a 30°C. Esto reducirá la resistencia al fracturamiento por bajas temperaturas a medida que el pavimento envejece (Vilchez & Yerén, 2022, pág. 107).

f) Resistencia al daño por humedad.

Esta característica de la mezcla asfáltica tiene que ver con la dificultad que tienen el aire y el agua para entrar en su interior. También está estrechamente relacionada con



las propiedades químicas del agregado mineral, la cantidad de huecos en la mezcla compactada, los procesos de oxidación del asfalto y otras propiedades químicas del agregado mineral. Cabe destacar que todas las mezclas asfálticas utilizadas en la construcción de carreteras tienen cierto nivel de permeabilidad (Beranjano & Caicedo, 2017, pág. 28).

“Resistencia que ofrecerá al paso del aire o agua” (Sáez, 2019).

g) Resistencia al deslizamiento.

Se refiere a la resistencia al deslizamiento que tienen las ruedas del vehículo cuando transitan sobre la carpeta asfáltica, especialmente cuando la superficie está húmeda. Por lo tanto, es importante considerar en el diseño de mezcla asfáltica que los agregados formen una superficie rugosa al colocarlos y compactarlos (Balarezo & Tanaka, 2022, pág. 20).

h) Trabajabilidad

“Propiedad que afecta a la sencillez de extender y comprimir la mezcla asfáltica in situ” (Garnica, Flores, José, & Delgado, 2005).

2.2.4 Diseño de mezclas asfálticas

Según (Universidad Mayor de San Simón, 2004), menciona que las mezclas asfálticas se refieren a la combinación de agregado bien graduado, ligante asfáltico como ligante, filler mineral y aditivos si este se requiere. Se diseña en un laboratorio y posteriormente se elabora en una planta de asfalto, tomando como referencia el diseño de mezcla asfáltica, una vez que se obtenga la temperatura de diseño se proporcionan los componentes, de acuerdo a lo mencionado anteriormente (pág. 255).



2.2.4.1 *Diseño de mezcla asfáltica en caliente*

Según (Chuman, 2017), nos dice acerca del diseño de mezcla asfáltica en caliente:

Las proporciones de estos ingredientes, que incluyen el ligante asfáltico, los áridos, el relleno mineral y los aditivos, determinan las propiedades físicas de la mezcla final, lo bien que funcionan en esa mezcla y cuánto durará la mezcla durante su vida útil. Los métodos de diseño Marshall y Hveen se utilizan con frecuencia para diseñar mezclas asfálticas.

2.2.4.2 *Característica y comportamiento de la mezcla*

a) Densidad de la mezcla

La densidad de la mezcla asfáltica compactada, que se mide en kg/m^3 (S. I.), viene determinada por su peso unitario y se calcula multiplicando la densidad del agua. Esta densidad se ha hallado en un laboratorio y se ha comparado con la mezcla asfáltica hecha en fábrica (Terán, 2015, pág. 40).

b) Vacíos de aire

Son los vacíos que contiene la mezcla colocada y compactada, es importante controlar este vacío, ya que es por donde fluye el asfalto cuando recibe cargada de los vehículos, se considera un 3% de vacío de aires en el diseño de mezclas, si es menor de este índice se tornará rígido el pavimento flexible y si es mayor al 10% será muy permeable (Balarezo & Tanaka, 2022, pág. 18).

c) Vacíos en el agregado mineral

Los vacíos de áridos minerales son bolsas de aire entre las partículas de áridos ya presentes en una mezcla asfáltica que se han colocado y compactado en el ligante

asfáltico, incluidos los espacios rellenos por el asfalto. El vacío de agregado mineral es importante para el acomodo del volumen efectivo del asfalto el MAC, así como, el volumen de vacíos que contiene la mezcla. Un factor esencial a tener en cuenta a la hora de diseñar una mezcla asfáltica es que ésta será más duradera cuanto más gruesa sea la capa de asfalto sobre la partícula de árido (Chuman, 2017, pág. 47). Se muestra a continuación la siguiente tabla 9:

Tabla 9

Porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral.

Tamiz	Tamaño máx. nominal de partículas		Mínimo % de vacíos VAM
	Pulgadas	mm	
No. 16	0.0469	1.18	23,5
No. 8	0.093	2.36	21 ,0
No. 4	0.187	4.75	18.00
3/8	0.375	9.50	16.00
1/2	0.500	12.5	15.00
3/4	0.750	19.00	14.00
1	1.0	25.00	13.00
1 1/2	1.5	37.50	12.00
2	2.0	50.00	11,5
2 1/2	2.5	63.00	11.00

Fuente: (Chuman, 2017)

d) Contenido de asfalto

En contenido óptimo de asfalto en la mezcla debe ser obtenida previamente en un laboratorio, ya que es importante para controlar la producción en planta. El contenido óptimo de asfalto en un diseño va a depender de propiedad de adherencia, poros y calidad e los agregados, así como, de la calidad el mismo asfalto (Terán, 2015, pág. 41).

e) Propiedades de la Mezcla: Estabilidad y Flujo

Es importante definir las propiedades de una mezcla asfáltica en caliente (Estabilidad y Flujo), para comprender su importancia e interpretar el resultado los ensayos a elaborar para el presente estudio:

Estabilidad. - Se refieren a los valores de carga en los que una muestra compactada de briqueta experimenta deformación o fractura completa bajo una presión constante. El ensayo implica la aplicación gradual de carga sobre la briqueta mediante cabezales superior e inferior, hasta que se registre la lectura en el indicador en el momento en que la briqueta falla. El valor máximo de carga indicado por el dial de carga se conoce como Estabilidad Marshall. Este valor puede servir como un indicador de la resistencia a largo plazo de una mezcla asfáltica en caliente (Huari, 2020, pág. 44).

La estabilidad extremadamente alta da como resultado un pavimento final excesivamente rígido, lo que reduce la durabilidad y la vida útil del pavimento. La cohesión interna (asfalto) y la fricción (forma del árido) son las que confieren estabilidad a una mezcla asfáltica. Por lo tanto, la estabilidad de la mezcla asfáltica aumenta a medida que el árido se vuelve más rugoso y anguloso (Chuman, 2017, pág. 52).

Tabla 10

Causas y efectos de inestabilidad de pavimentos.

Causas	Efectos
Exceso de asfalto en la mezcla	Ondulaciones, ahuellamientos y afloramiento o exudación
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente, durante un cierto tiempo; dificultad para la comparación
Agregado redondeado sin o pocas, superficies trituradas.	Ahuellamientos y canalización

Fuente: (Chuman, 2017)

Flujo. - Los valores de estabilidad extremadamente altos dan como resultado un pavimento final excesivamente rígido, lo que reduce la durabilidad y la vida útil del pavimento. La cohesión interna (ligante asfáltico) y la fricción (forma del árido) son las que confieren estabilidad a una mezcla asfáltica. Por lo tanto, la estabilidad de la mezcla asfáltica aumenta a medida que el árido se vuelve más rugoso y anguloso (Huari, 2020, pág. 44).

Es una propiedad importante para el diseño de mezclas asfálticas en caliente, se obtiene este dato por el método Marshall, conjuntamente con la estabilidad, ambos nos proporcionan el factor de rigidez de la mezcla asfáltica (Crispín & Helguero, 2019, pág. 20).

A continuación, se muestra especificaciones del diseño Marshall para la Estabilidad y Fluencia:

Tabla 11

Rangos estandarizados para el diseño Marshall.

Especificación del Método Marshall	Tráfico Liviano		Tráfico Mediano		Tráfico Pesado	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
No. de golpes	35		50		75	
Estabilidad Newton (Nw)	3336		5338		8006	
Libras (Lb)	750		1200		1 800	
Fluencia 0,25 mm (0,01")	8	18	8	16	8	14
% de vacíos	3	5	3	5	3	5

Fuente: (Chuman, 2017)

Según (D 6927 - 15: Standar Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures, 2015), define estabilidad y fluencia de la siguiente manera:



El laboratorio utiliza los valores de estabilidad y fluidez Marshall, combinados con la densidad, el contenido de huecos, los huecos en el árido mineral o los huecos rellenos por el asfalto, para crear mezclas y evaluar las mezclas asfálticas. El proceso de mezcla en la fábrica de asfalto puede verse utilizando los resultados de estabilidad y fluidez de Marshall. También pueden utilizarse para examinar diversas mezclas y cómo les afectan distintos factores, como la presencia de agua (p. 2).

2.2.4.3 Método Marshall de diseño de mezclas

2.2.4.3.1 Prepara para efectuar los procedimientos Marshall

Debido a que los componentes que conformarán la mezcla final, como son, los agregados, asfalto, filler mineral y aditivos, por lo tanto, se deberá tener especial cuidado al seleccionar dichos materiales en laboratorio y en el diseño (características de los materiales a emplear en el diseño) (Chuman, 2017, pág. 61).

Este procedimiento abarca la preparación y compactación de una probeta de mezcla asfáltica de 4 pulgadas de diámetro y 2,5 pulgadas de altura. Para los ensayos de laboratorio y la fabricación de aglomerado asfáltico en una planta que emplee un tamaño máximo de 1 pulgada, este procedimiento está normalizado (D6926 - 20: Standar Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus, 2020, pág. 1).

2.2.4.3.2 Selección de las muestras de material

2.2.4.3.3 Preparación del agregado

Es necesario que los agregados se encuentren dentro de las especificaciones mínimas de característica y calidad, la principal que debe cumplir es la granulometría, el cual debe ser similar a la que se producirá en planta. Es importante mencionar que estos deben estar limpios y secos antes de mezclarse con el asfalto (Terán, 2015, pág. 102).

2.2.4.3.4 *Secado del Agregado*

Para cada combinación de árido y composición asfáltica, preparar al menos tres muestras. Secar los áridos a un peso constante a 110.5 °C y, a continuación, dividirlos en las fracciones de tamaño necesarias mediante tamizado en seco (D5581 - 07a: Standar Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus, 2013, pág. 1). Se recomiendan las siguientes fracciones de tamaño:

Tabla 12

Cantidad a secar de acuerdo al tamaño máximo nominal.

Mallas recomendadas
2 to 1 1/2 in. (50 to 37.5 mm)
1 1/2 to 1 in. (37.5 to 25.0 mm)
1 to 3/4 in. (25.0 to 19.0 mm)
3/4 to 3/8 in. (19.0 to 9.5 mm)
3/8 in. to No. 4 (9.5 mm to 4.75 mm)
No. 4 to No. 8 (4.75 mm to 2.36 mm)
Passing No. 8 (2.36 mm)

Fuente: (D5581 - 07a: Standar Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus, 2013, pág. 1)

2.2.4.3.5 *Análisis Granulométrico por Vía Húmeda*

Los agregados que son usados en construcción de carreteras como bases, mezcla asfáltica para pavimentos y superficies granulares como control de erosiones. Los minerales con arcilla y aquellos solubles en agua, deben ser separados mediante lavado por el tamiz N° 200 para así tener un material representativo para el diseño de mezclas asfálticas (ASSTHO T 11: Materials Finer than N° 200 (75 um) Sieve in Minerals Aggregates by Washing, 2020, pág. 1).



2.2.4.3.6 Determinación de Peso Unitario y Vacíos de Agregados

El peso unitario de un agregado se calcula con el resultado de la proporción de peso y el volumen, y esta comparada con el peso unitario del agua, a la misma temperatura que los agregados, es el peso específico de dicho agregado (Chuman, 2017, pág. 64).

2.2.4.3.7 Preparación de las muestras de ensayo (probeta)

Las probetas de mezclas asfálticas son preparadas con diferentes cantidades de cemento asfáltico, haciendo que estas varíen en pequeñas cantidades de porcentaje en peso respecto al peso de los agregados. En cuanto la proporción de los agregados se separa a partir del análisis granulométrico (Chuman, 2017, pág. 65). Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

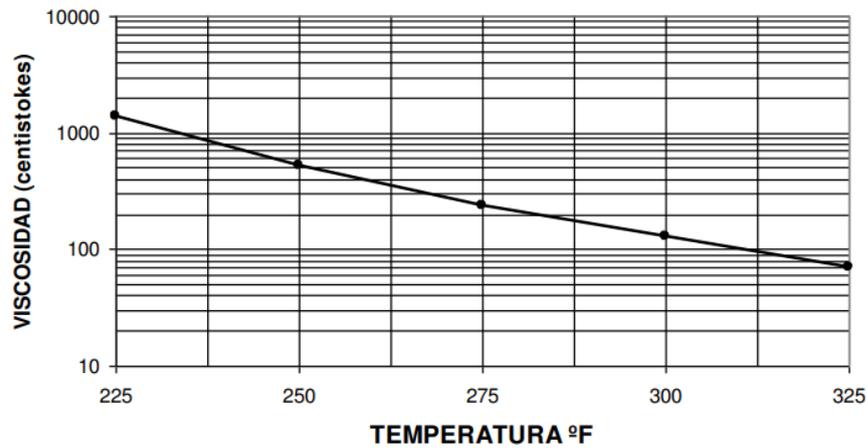
- El árido y el asfalto se calientan completamente hasta que todas las partículas del árido quedan cubiertas. Esto simula los procedimientos de calentamiento y mezcla que tienen lugar en la planta.
- Como parte de la preparación para la compactación, las mezclas asfálticas calientes se vierten en los moldes Marshall calentados. Durante este procedimiento se utiliza un martillo de compactación Marshall calentado para evitar que la superficie de la mezcla se enfríe al golpearla.
- Las briquetas son comprimidas a través de impactos del martillo de compactación Marshall.

Para conocer la temperatura de mezcla del asfalto con los agregados, se debe tener en cuenta la carta de viscosidad del asfalto e intersecarlo de acuerdo al siguiente ábaco:

Figura 5

Curva de viscosidad vs temperatura de los cementos asfálticos.

Figura VII.1. Curva Viscosidad – Temperatura para Cementos Asfálticos



Fuente: The Asphalt Institute's, Manual (MS-2).

Fuente: (Universidad Mayor de San Simón, 2004)

2.2.4.3.8 Procedimiento de ensayo Marshall

De acuerdo a antecedentes se infiere que el contenido óptimo de asfalto en una mezcla asfáltica virgen, se encuentra al rededor del 6% con referencia al peso de los agregados. Para realizar un diseño en laboratorio se debe hacer 6 variaciones de porcentaje de asfalto y 3 probetas por cada variación, por lo tanto, se deberá tener 18 briquetas, en consecuencia, la cantidad de agregado debe ser aproximadamente de 29 kg y 1 gln de asfalto (Universidad Mayor de San Simón, 2004, págs. 267 - 268).

Los procedimientos de ensayo en el método Marshall son los siguientes:

2.2.4.3.9 Determinación del Peso Específico Total

El peso específico se determina en cuanto al espécimen compactado según este haya alcanzado temperatura ambiente, si la probeta es muy porosa este ensayo se realiza recubriendo con parafina y si tiene un vacío entre el 2% – 4 %, se satura y se realizan los registros (Garnica, Flores, José, & Delgado, 2005, pág. 8).

El espécimen es sumergido en baño de agua a 25 °C, se calcula el peso antes de sumergirlo y se toma otro peso después de sumergirlo y haberlo secado con un paño absorbente, la diferencia entre estos datos es la medida del volumen de agua a 25 °C. La gravedad específica Bulk es calculada a partir de estos datos (D 2726M - 19: Standar Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures, 2019, pág. 2).

2.2.4.3.10 Ensayo de Estabilidad y Fluencia

El propósito del ensayo de estabilidad y fluencia Marshal es obtener resultados de 03 especímenes como mínimo por cada variación de porcentaje de asfalto en la mezcla. En cuanto al agregado, filler mineral y tipo de asfalto a emplear este debe ser constante, sin variar sus características y sin variar las proporciones en caso de agregado y filler (Manual de Ensayo y Materiales, 2016, pág. 590).

Tabla 13

Evolución de la densidad en el diseño Marshall.

No. de golpes	Gravedad específica	% de vacíos	% de vacíos en el agregado mineral	Estabilidad (lb)	Índice de Flujo 0,01"
25	2.382	5.1	17.1	1425	18
50	2.396	4.6	16.6	2300	14.5
75	2.437	2.9	15.2	2300	14
25	2.395	1.5	13.8	1550	20.5
50	2.422	0.4	12.8	1750	19.5
75	2.433	0.0	12.4	1500	22.5

Fuente: (Universidad Mayor de San Simón, 2004)



2.2.4.3.11 Análisis de densidad y vacíos

Para determinar la densidad de la mezcla se considera el promedio de cada una de las muestras con las mismas proporciones en sus componentes, por tanto, debe tener las mismas características. El Vacío de agregado mineral es calculado en base al peso específico total de agregados (en volumen, restar el volumen del agregado del volumen total de la mezcla). Los vacíos llenos de asfalto se calculan al restar los vacíos de aire de VMA, dividido esto entre VMA multiplicado por cien (Chuman, 2017, págs. 69-70).

2.2.5 Pavimento asfáltico reciclado

De acuerdo con (Aguilar & Infanzón, 2020), sabemos que es un método de aprovechamiento de materiales que se desarrolló en los años setenta, durante el periodo de la crisis energética, y que se basa en métodos de molienda en frío. La utilización y expansión de esta práctica están influenciadas por el equilibrio económico necesario entre los costos asociados a su implementación y, no obstante, el coste del betún y la disponibilidad de áridos de alta calidad.

Algunos autores prefieren establecer una diferencia entre reciclado y termorregeneración. El término "termorregeneración" se refiere al proceso de fresar una capa, calentarla de nuevo, combinarla con material fresco, en la mayoría de los casos utilizando equipos in situ, y extenderla de nuevo, ya sea como capa única o como base de una mezcla fresca en caliente. Durante este procedimiento pueden añadirse pequeñas cantidades de materiales que permitan humedecer el betún de la mezcla envejecida.

Para obtener las mejores calidades finales, el reciclado implica la construcción de una mezcla en la que se añade material fresco a la mezcla reciclada. Los materiales actuales pueden levantarse, descomponerse, mezclarse con áridos frescos y añadirse a la



obra mediante maquinaria, o el proceso puede llevarse a cabo en una instalación fija. Este procedimiento permite generar mezclas de calidad comparable a las originales.

Gracias a los progresos tecnológicos logrados en el equipo de reciclado, como las fresadoras, en la actualidad se pueden identificar los siguientes tipos de labores de reciclado:

- Reciclado en frío implica la remoción del pavimento existente mediante un proceso de fresado en frío, con una profundidad de hasta 150 mm en el caso de capas delgadas y más de 150 mm en el caso de capas profundas.

- En el reciclado en caliente, el hormigón asfáltico se crea en una instalación central utilizando el material recuperado (RAP), árido en caliente, asfalto o un agente de reciclado.

- En el reciclado caliente in-situ, el pavimento antiguo se calienta para hacerlo flexible y, a continuación, se fresa o escarifica mientras aún está caliente. En este procedimiento, el material fresco de mezcla en caliente y/o un agente de reciclado se introducen en la máquina en una sola pasada antes de ser compactado. Después de la compactación puede añadirse una capa de rodadura nueva (pp. 122-123)

El reciclado de pavimento asfáltico se define como la recolección y transformación de materiales deteriorados que ya cumplieron su tiempo de vida para la conformación de uno nuevo con un aporte mínimo de materiales nuevos (Crispín & Helguero, 2019)



2.2.5.1 Pavimento asfáltico reciclado en caliente

(Rodríguez & Rodríguez, 2004), sostiene que los asfaltos reciclados en caliente: Se combina el RAP (pavimento asfáltico recuperado) con agregado nuevo y cemento asfáltico y/o agente de reciclado, para producir una mezcla asfáltica en caliente. Si bien se usan plantas en caliente por pastones (terceados), comúnmente las plantas empleadas para producir la mezcla reciclada son las del tambor. El RAP en su mayor parte es producido por fresado en frío, pero también puede elaborarse a partir de la remoción del pavimento y trituración. Los equipos y procedimientos para colocación y compactación de la mezcla son aquellos típicos de las mezclas asfálticas en caliente (p. 07).

En esta operación, la mezcla asfáltica fabricada en una planta caliente se utilizará para crear una o más capas de asfalto. Los componentes reciclados de las capas de asfalto antiguas se combinan con materiales frescos, agentes rejuvenecedores y otras adiciones según sea necesario. El objetivo es cumplir los requisitos técnicos necesarios y asegurarse de que se respeta el proyecto (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013).

El reciclado en caliente de pavimento asfáltico se refiere al proceso de recuperación de materiales de capas de pavimento deterioradas o de mezclas nuevas que no han cumplido con las especificaciones técnicas de un proyecto, adicionando materiales vírgenes en proporciones adecuadas para cumplir con los parámetros exigidos (Alarcon, 2003)

2.2.5.2 Materiales empleados en pavimentos asfálticos reciclados

Como en los pavimentos comunes se debe conocer los materiales a utilizar, así como sus características.



2.2.5.2.1 Mezcla asfáltica reciclada (recycled asphalt pavement RAP)

Es el material compuesto por cemento asfáltico y agregados pétreos que ya perdieron sus propiedades físicas y químicas iniciales, provenientes del retiro de un pavimento, para su rehabilitación o reconstrucción (Alarcon, 2003).

El reciclado o también llamado reutilización del pavimento asfáltico, es conocido como RAP por su nombre en inglés (Recycled Asphalt Pavement), existe tratamiento de reciclado de pavimento asfáltico in situ y en planta (Crispín & Helguero, 2019, pág. 25).

Las propiedades físicas y químicas de estos materiales dependen de los materiales iniciales que fueron utilizados, el tiempo que sirvieron y las condiciones a las que estuvieron sometidas en su vida útil (Alarcon, 2003)

Según (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013) este material se divide en:

a) Agregados recuperados de la capa asfáltica antigua.

Agregado obtenido mediante disgregación de una capa asfáltica, sus características deberán ser similares a los agregados vírgenes.

La granulometría de este material es la que determina en gran parte la calidad de éste.

b) Material Bituminoso de la mezcla por reciclar.

Deberá ser susceptible de mezclar con material bituminoso virgen y que se obtenga una mezcla homogénea.

El punto de ablandamiento es el parámetro que determina la calidad de este material. Una de las características más importantes de los pavimentos asfálticos

reciclados para su reutilización es la estabilidad y flujo, puesto que si estos parámetros son buenos son indicios de que el pavimento asfáltico aún mantiene sus características iniciales.

(Alarcon, 2003) nos presenta un cuadro donde se muestran las propiedades más usuales del pavimento asfáltico reciclado (MBR por sus siglas de Mezcla Bituminosa Reciclada o RAP por sus siglas de Recycled Asphalt Pavement).

Tabla 14

Valores típicos en mezclas bituminosas.

Propiedades del MBR	Rango de valores típico
Densidad	1.940 - 2.300 g/cm ³
Contenido de humedad	Normal: hasta un 5% Máximo: 7.8 %
Contenido de betún	Normal: 4.5 - 6 % Máximo: 3 - 7 %
Penetración del betún	10 - 80 dmm a 25°C
Índice de penetración	Cercano a cero
Punto de reblandecimiento	>65 a 70°C
Viscosidad absoluta del betún	4000 - 25000 poises a 60°C

Fuente: (Alarcon, 2003).

2.2.5.2.2 Agregados de aporte o adición

La posibilidad de realizar un pavimento asfáltico con agregados 100% provenientes de pavimento asfáltico reciclado es muy limitado por lo que inevitablemente se requiere de agregados vírgenes que aporten las características que requieren el pavimento asfáltico reciclado para cumplir con las propiedades físicas mínimas para componer un pavimento asfáltico de uso nuevo.

Estos agregados de aporte son calculados en función al agregado reciclado que se va a utilizar y deben cumplir con los parámetros mínimos establecidos en las directivas y normas vigentes con las que se estén trabajando en el momento.

(Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013) recomienda que los agregados de adición, tengan en lo posible características mineralógicas similares a la de los agregados a reciclar, esto con el fin de que el material bituminoso tenga similar adhesividad a los materiales.

También el (MTC, 2013) nos da algunos parámetros para este material en el cual se muestra a continuación en las tablas 15 y 16.

Tabla 15

Requerimientos de agregados gruesos de adición en mezclas recicladas en caliente.

	Ensayo	Requerimiento según tipo de tráfico (millones de ejes equivalentes)		
		s 0,3	> 0,3 - 3	> 3
Desgaste de Los Ángeles	MTC E 207	25% máx.	25% máx.	25% máx.
Desgaste Micro-Deval	ASTM O 7428		25% máx.	20% máx.
10 % de finos (KN)	Seco Relación Húmedo/seco	BS 812 Part 110		110 min.
				75% min.
Durabilidad al Sulfato de Magnesio	MTC E 209	18 °Al máx.	18 % máx.	18 °Al máx.
Partículas fracturadas mecánicamente (agregado grueso) % mínimo 1 cara /2 caras	MTC E 210	75 / --	75 / 60	85 / 70
Coefficiente de resistencia al deslizamiento	ASTM E 303	0,45 mín.	0,45 min.	0,45 min.
Partículas chatas y alargadas	ASTM O 4791	10% máx.	10% máx.	10% máx.

Fuente: (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013).

Tabla 16

Requerimientos de agregados finos de adición en mezclas recicladas en caliente.

	Ensayo	Requerimiento según tipo de tráfico (millones de ejes equivalentes)		
		≤ 0.3	> 0.3-3	> 3
Durabilidad (al sulfato de magnesio)	MTC E 209	18° máx.	18% máx.	18° máx.
Angularidad	ASTM O 1252	40% mín.	45% mín.	45% mín.
Índice de plasticidad	MTC E 111	N.P.	N.P.	N.P.
Equivalente de arena	MTC E 114	50% mín.	50% mín.	50% mín.
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0.5 % máx.	0.5 % máx.	0.5 % máx.

Fuente: (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013).

Así mismo nos presenta una tabla de granulometría estándar que se debe cumplir para las mezclas asfálticas en caliente.

2.2.5.2.3 Material Bituminoso de aporte o adición

(Alarcon, 2003) manifiesta que el material bituminoso para una operación de reciclado en caliente de una mezcla envejecida en la que se desee reconstituir las propiedades físicas y químicas del ligante, debería reunir las siguientes características:

- a) Viscosidad adecuada para que junto al ligante envejecido resulte un ligante similar al del ligante objetivo, tras el proceso de producción y puesta en obra.
- b) Una composición química que restaure las relaciones de componentes típicas del ligante objetivo.
- c) Compatibilidad química con el ligante envejecido.

2.2.5.2.4 Agentes Rejuvenecedores

El envejecimiento químico del betón produce un endurecimiento y una pérdida de sus capacidades mecánicas y aglutinantes al alterar su composición y estructura coloidal.



Una vez puesta en servicio la carretera, este proceso irreversible continúa durante toda su vida útil. Comienza con la fabricación de la mezcla bituminosa en la fábrica de asfalto (Alarcon, 2003)

Los agentes rejuvenecedores son materiales que modifican las propiedades químicas del pavimento asfáltico envejecido, para posteriormente ser añadido a una mezcla nueva. Se coloca y compacta esta combinación mediante procesos convencionales. Se utiliza rejuvenecedores cuando el reciclado es in situ (Crispín & Helguero, 2019, pág. 26).

De acuerdo con (Alarcon, 2003) algunas propiedades que estos agentes deben cumplir son:

- Viscosidad adaptable.
- Punto de inflamación compatible con la del asfalto a utilizar.
- Contenido elevado en aromáticos de alto peso molecular para facilitar la compatibilidad y restituir la composición inicial.
- Contenido bajo o nulo en asfaltenos y en saturados.
- Coste asumible.

De acuerdo con el (MTC, 2013) también están los:

2.2.5.2.5 Aditivos mejoradores de adherencia

Para el conjunto de los agregados de adición, se exigirá el requisito de adhesividad obtenido mediante el ensayo de resistencia conservada en tracción indirecta con un valor del 80 % como mínimo; en caso que estos requisitos no sean satisfechos, no se permitirá



el empleo de agregado pétreo, salvo que se incorpore un producto mejorador de adherencia, de calidad reconocida, en la proporción necesaria para satisfacerlos, la cual deberá ser aprobada por el Supervisor.

2.2.5.3 Procedimiento para obtención del pavimento asfáltico reciclado (recycled asphalt pavement- rap)

Inicialmente se debe evaluar el pavimento asfáltico a reciclar, para determinar si se va a demoler o realizar el mantenimiento. A continuación, se presenta las metodologías más comunes para obtener el pavimento asfáltico reciclado y recomendaciones (Puig, 2021) tenemos dos métodos de obtención del pavimento asfáltico reciclado.

2.2.5.3.1 Demolición Mecánica.

Este método generalmente es considerado para grandes extensiones de pavimento se realiza con motoniveladora, tractores, excavadoras, según a las especificaciones del proyecto. Una de las desventajas de este método es que no se logra una precisión y un acabado homogéneo en la superficie, incluso se puede producir daños en la base granular (Pastás, 2021, págs. 15-16).

2.2.5.3.2 Fresado.

Para la obtención de pavimento asfáltico reciclado se usa la máquina fresadora, este método se caracteriza, por tener una precisión alta en las secciones a cortar, así como, en la profundidad a retirar la carpeta asfáltica envejecida, para el inicio de recuperación de RAP mediante el fresado se debe tener una superficie libre de contaminantes (Galindo, 2019, pág. 18).

“La ventaja de este método es que el material obtenido se asemeja a las características requeridas para su reciclado” (Puig, 2021).

2.2.5.4 Factores ambientales

(Aguilar & Infanzón, 2020), se evaluó mediante una fase de revisión en la que se estableció una conexión entre la causa (actividad considerada) y su impacto en el medio ambiente (variables medioambientales). Para identificar las consecuencias medioambientales se utilizó el siguiente cuadro de referencia (p. 31).

Tabla 17

Factores ambientales - causa y obtención de asfaltos modificados.

Factores Ambientales		Causa (Acción considerada)- Obtención de asfalto modificado
Componente Ambiental	Aspecto Ambiental	
Aire	Calidad del aire	Generación de material particulado (polvo), por el proceso de la trituración de neumático.
	Ruido y Vibraciones	Incremento a los Niveles de ruido y vibraciones en el área de influencia por el uso de equipos y maquinarias.
	Emisiones atmosféricas	Emisiones Atmosféricas producidas por el uso de equipos y maquinarias durante el proceso de obtención del asfalto modificado.
Socioeconómico	Desarrollo económico local	Contracción de mano de obra local durante el desarrollo de las actividades
	Económico	Disminución de precios
Cultural	Salud	Afectación a la salud pública por la generación de material particulado
	Estético Paisajístico	Nivel de calidad del paisaje
Relleno sanitario	Vida útil del relleno sanitario	Incremento de la vida útil del relleno sanitario, por la disminución del almacenamiento de neumáticos usados.

Fuente: (Aguilar & Infanzón, 2020).



2.2.5.5 *Ventajas de utilización de rap*

De acuerdo a (Huari, 2020), tenemos las siguientes ventajas:

b) Beneficios Económico

Desde la perspectiva económica, se pueden identificar los siguientes beneficios asociados:

- Una reducción de los costos en el proceso de colocación de carpeta asfáltica.
- Un ahorro significativo en el traslado de materia prima, como el asfalto y los agregados.
- La disminución en los tiempos necesarios para llevar a cabo las intervenciones de pavimentación.
- Una reducción en las importaciones de productos relacionados con la obra.
- La disminución en los porcentajes de ligante asfáltico requeridos en la mezcla, lo que contribuye a un uso más eficiente de este material (p. 3).

Según (Miranda, 2019) se ha registrado que los gastos de construcción pueden disminuir significativamente, en un rango estimado entre el 14% y el 32%, al emplear mezclas asfálticas que contienen porcentajes de RAP (Recycled Asphalt Pavement) que van del 20% al 50%. Asimismo otros autores indican una reducción de hasta el 7.5% en el costo de la mezcla debido a la reducción en el uso de materias primas, sin que esto afecte negativamente las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas que contienen RAP (p. 4).



c) Beneficios Ambientales

Además, los beneficios ambientales asociados son los siguientes:

- La reutilización de materiales que han llegado al final de su vida útil, lo cual evita su disposición en vertederos y reduce la generación de residuos.
- La disminución en el volumen de los vertederos, ya que se aprovechan los materiales de pavimentos antiguos en lugar de desecharlos.
- La reducción en el suministro de material virgen necesario para la construcción, lo que contribuye a la conservación de los recursos naturales.
- La disminución en los procesos de extracción de materias primas limitadas, lo cual tiene un impacto positivo en la preservación del medio ambiente y la mitigación del agotamiento de recursos.

d) Beneficios Técnicos

El diseño y el rendimiento de las mezclas asfálticas con cantidades variables de RAP son las principales ventajas tecnológicas. Para evaluar estas mezclas se utilizan ensayos de fatiga, deformación permanente y daños inducidos por la humedad. Se ha observado que la resistencia a la fatiga disminuye cuando aumenta el porcentaje de RAP. No obstante, es factible construir mezclas asfálticas que contengan un 60% de RAP y obtener resultados comparables a los de una mezcla estándar. Por otra parte, se ha constatado que cuando aumenta la proporción de RAP, también lo hace la resistencia en las situaciones de deformación permanente y de resistencia a los daños inducidos por la humedad. La cantidad de RAP presente en la mezcla tiene una relación directamente proporcional con la resistencia. En consecuencia, la resistencia a la deformación



persistente y a los daños inducidos por la humedad aumenta con la proporción de RAP (Miranda, 2019).

2.2.6 Mejoramiento de base con pavimento asfáltico reciclado

2.2.6.1 Definición

(Camacho, 2016) nos menciona que el pavimento asfáltico reciclado puede ser usado para el mejoramiento de capas granulares (base y subbase) agregando cemento asfáltico al RAP, estos mejoramientos se pueden realizar en frío o en caliente, al ser utilizado en caminos de trocha carrozal o afirmados, se comporta como un supresor de polvo (p. 110).

2.2.6.2 Beneficios de utilización de pavimento asfáltico reciclado

Se debe tener en consideración de la importancia y los beneficios que trae al reciclar el pavimento asfáltico envejecido, en la parte económica el uso de RAP al utilizar en la base o sub base reduce el costo de los materiales en un 30%, cuando se utiliza un 50% de RAP en dicha combinación (Camacho, 2016).

La utilización de pavimento asfáltico reciclado en la base granular es beneficiosa hasta cierto punto, se evalúa que las propiedades mecánicas (CBR, abrasión, caras fracturadas) se conservan (Peña & Cáceres, 2021, pág. 112).

La utilización del pavimento asfáltico reciclado en las capas granulares, aporta también beneficios ambientales, debido a que se evita extraer volúmenes de material nuevo de canteras nuevas tales como cerros y/o ríos, además de colapsar los botaderos de materiales excedentes de construcción (Camacho, 2016).



De acuerdo a (Crispín & Helguero, 2019) describe que en comparación de una base estabilizada y una base con pavimento asfáltico reciclado, se obtiene un ahorro del 13.14%.

2.2.6.3 Desventajas en la utilización de pavimento asfáltico reciclado

Una de las desventajas al utilizar pavimento asfáltico reciclado para producir material de base granular es el mezclado y la dificultad al compactar el RAP, se debe utilizar agentes estabilizadores para contrarrestar esta desventaja (Miranda, 2019, pág. 2).



CAPITULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 ÁMBITO DE ESTUDIO

La presente investigación se realizó con pavimento asfáltico reciclado obtenido de la Av. La Torre de la ciudad de Puno, el material mencionado se extrajo mientras se ejecutaba el proyecto llamado “Sistema de Tratamiento de las Aguas Residuales de la Cuenca del Lago Titicaca” en el cual, se venía realizando la destrucción y remoción de la carpeta de rodadura para el mantenimiento y cambio de tuberías de desagüe; con agregados de la Planta de Asfalto Municipal de la ciudad de Juliaca; así mismo con material base de la cantera de Taparachi de la ciudad de Juliaca provincia de San Román de la región Puno.

Los ensayos realizados fueron: Contenido de Humedad ASTM D2216 - 19, Limite Líquido, Limite Plástico e Índice de Plasticidad ASTM D4318 - 17, Granulometría por Tamizado ASTM D6913/D6913M - 17, Proctor Modificado ASTM D1557 - 12; ASTM D4718/D4718M - 15, Valor Relativo de Soporte (CBR) ASTM D1883 - 16, Análisis granulométrico ASTM C 136/136M - 14, Índice de plasticidad del material que pasa el tamiz No 200 ASTM D4318 - 17, Desgaste por abrasión ASTM C131/C131M - 14, Equivalente de arena ASTM D2419 - 14, Partículas chatas y alargadas ASTM D4791 - 10, Caras fracturadas ASTM D5821 - 13, Valor azul de metileno (para arcillas, rellenos minerales y finos) AASHTO T 330, Gravedad específica y absorción del agregado fino ASTM C128 - 15, Gravedad específica y absorción del agregado grueso ASTM C127 - 15, Diseño de mezcla asfáltica en caliente o frío (Método Marshall) ASTM D1559, Elaboración de briquetas Marshall ASTM D 6926, Rotura de briqueta para Estabilidad y flujo Marshall ASTM D6927, Peso unitario de mezcla asfáltica compactada ASTM D2726/D2726M/19, Peso específico máximo teórico (Rice) ASTM D2041, Lavado



asfáltico incluye granulometría y reporte de % de asfalto ASTM D2172/D2172M - 17, Adherencia en agregado grueso (revestimiento y desprendimiento) AASHTO T-182, Resistencia de mezcla asfáltica al daño inducido por humedad (Lottman) ASTM D4867, todos ellos realizados en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Escuela profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional del Altiplano ubicado en el Av. Floral 1153 en la ciudad de Puno.

Cabe precisar que los materiales fueron obtenidos según las normas ASTM D420 guía para la investigación y muestreo de suelos y rocas, ASTM D75 Práctica para muestreo de Agregados, ASTM C702 Práctica para reducir muestras de agregados al tamaño de prueba.

3.2 PERIODO DE ESTUDIO

- Recolección de pavimento asfáltico reciclado: diciembre de 2021.
- Ensayos y pruebas en laboratorio: octubre a diciembre de 2022.

3.3 PROCEDENCIA DEL MATERIAL UTILIZADO

3.3.1 Pavimento asfáltico reciclado

El material de pavimento asfáltico reciclado se obtuvo de la Av. La Torre de la Ciudad de Puno. La destrucción y remoción de la carpeta asfáltica en el tramo de la Av. La Torre, se realizó entre los meses de octubre de 2021 a enero de 2022, por el proyecto “Sistema de Tratamiento de las Aguas Residuales de la Cuenca del Lago Titicaca”.

Figura 6

Ubicación de extracción de pavimento asfáltico reciclado (Av. la Torre - Puno).



Fuente: Google Earth Pro.

Figura 7

Muestreo y extracción de pavimento asfáltico reciclado de Av. la Torre - Puno.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

3.3.2 Material base granular

El material para la base se obtuvo de la cantera de Taparachi, ubicada en la ciudad de Juliaca a la cual se a 1.5 km de la carreta Juliaca – Puno y tiene como coordenadas 378244 E, 8283725 N.

Figura 8

Ubicación del lugar de obtención de material para base granular (Cantera Taparachi – Juliaca).



Fuente: Google Earth Pro.

Figura 9

Muestreo de material para base granular patrón.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

3.3.3 Agregados

Los agregados tanto como la piedra chancada, la arena chancada y la arena zarandeada fueron obtenidos de la planta de asfalto municipal de la ciudad de Juliaca la cual se ubica a 100 m de la carretera Juliaca – Arequipa y tiene como coordenadas 373128 E, 8283026 N.

Figura 10

*Ubicación del lugar de obtención de agregado para mezclas asfálticas en caliente
(Planta de Asfalto Municipal - Juliaca).*



Fuente: Google Earth Pro.

Figura 11

Extracción de agregados para diseño de mezcla asfáltica en caliente patrón.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

3.3.4 Asfalto PEN 120-150

El asfalto o cemento asfáltico se obtuvo por donación de la obra “Mejoramiento del servicio de movilidad de la vía de articulación (salida a Arequipa – salida a Puno)”.

Figura 12

Extracción de cemento asfáltico PEN 120-150.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

Según (Instituto del Asfalto , 1962) nos muestra la tabla 18 que define la utilización de los tipos de asfalto en función al clima donde serán utilizados.

Tabla 18

Uso de cemento asfáltico graduados por penetración en función del clima.

Pavimentación	CLIMA				
	Muy Cálido	Cálido	Moderado	Frio	Frígido
AEROPUERTOS					
Pistas de despegue	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Caminos auxiliares	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Aparcamientos	60-70	60-70	60-70	85-100	85-100
CARRETERAS					
Tráfico pesado y muy pesado	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Tráfico pesado y muy pesado	40-50	60-70	60-70	85-100	120-150
Tráfico medio ligero	40-50	60-70	60-70	85-100	120-150
CALLES					
Tráfico pesado y muy pesado	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Tráfico pesado y muy pesado	40-50	60-70	85-100	85-100	120-150
Trafico medio ligero	40-50	60-70	85-100	85-100	120-150
CAMINOS PARTICULARES					
Industriales	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Comerciales Estac. Serv.	40-50	60-70	60-70	85-100	85-100
Residenciales	60-70	60-70	85-100	85-100	85-100
APARCAMIENTOS					
Industriales	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Comerciales	40-50	60-70	60-70	85-100	85-100
ZONA DE RECREO					
Pista de tenis	60-70	60-70	85-100	85-100	85-100
Terrenos de juego	60-70	60-70	85-100	85-100	85-100
BORDILLOS	40-50	40-50	60-70	85-100	85-100

Fuente: (Instituto del Asfalto , 1962, pág. 25).

El comportamiento de los asfaltos en relación al clima se ve directamente afectado por la temperatura ambiente. La penetración del asfalto, es decir, su capacidad de ablandamiento, juega un papel crucial en este aspecto. En climas cálidos, los asfaltos de baja penetración conservan su flexibilidad a temperatura ambiente, evitando la formación de fisuras debido a su menor tendencia a endurecerse. Sin embargo, en climas fríos, estos asfaltos experimentan una notable disminución en su capacidad de flexión, volviéndose más rígidos y propensos a la formación de fisuras. Por otro lado, los asfaltos de alta

penetración presentan una mayor flexibilidad en climas cálidos, lo cual puede llevar a problemas como el ahuellamiento en días calurosos. No obstante, en climas fríos, esta flexibilidad se compensa con la rigidez que proporciona el clima, lo que resulta en un comportamiento óptimo. En resumen, la elección adecuada de la penetración del asfalto en función del clima es fundamental para garantizar su comportamiento óptimo. En climas fríos, es necesario considerar asfaltos de mayor penetración que proporcionen la rigidez necesaria para resistir las bajas temperaturas, mientras que, en climas cálidos, es preferible utilizar asfaltos de menor penetración que mantengan su flexibilidad sin comprometer la estabilidad del pavimento. (Instituto del Asfalto , 1962).

También tenemos referencias de los fabricantes (Petro Perú), la cual muestra la misma tabla que muestra el Instituto del Asfalto, donde indica el uso del cemento asfáltico graduado por penetración en función al clima.

Lo que indica otro fabricante (Asfaltos Perú) es una clasificación de tipos de cemento asfáltico en función a la altura donde será utilizada.

Tabla 19

Tipos de asfalto y su uso según la altitud.

ALTITUD	<2000 MSNM	>2000 MSNM	>3200MSNM
Penetración de			
cemento asfáltico	60-70	85-100	120-150
a utilizar			

Fuente: <https://www.asfaltoperu.com/tipos-de-asfalto-en-el-peru/>

3.3.5 Filler (cemento portland tipo IP)

El filler utilizado fue el cemento portland tipo IP de la marca RUMI, el cual fue adquirido de una ferretería, se comprobó que su fecha de fabricación no fuera mayor a 3 meses (fecha de vencimiento 03/02/2023).



3.4 JUSTIFICACIÓN DEL PORCENTAJE DE RAP

Para el observar la influencia del pavimento asfáltico reciclado en las propiedades mecánicas de la estructura del pavimento se verificó los antecedentes por lo que para la influencia en la base se decidió iniciar al 15%, 30%, 45% y 60% con base en (Camacho 2016), quien estudió la adición de pavimento asfáltico reciclado a material granular virgen teniendo como resultado que el comportamiento de esta combinación se enmarca mejor en los 50% y 75%, pero revisando la (MTC, 2013) norma peruana nos encontramos que limita el uso de cualquier elemento reciclado hasta el 50% y para los porcentajes de pavimentos asfáltico reciclado en las mezclas asfálticas vírgenes se añadió 15%, 25%, 35% y 45% según lo indicado por (Aguilar & Infanzón, 2020), evaluaron los porcentajes añadidos teniendo como conclusión que fue el diseño con 30% de RAP añadido el único que cumplió con todos los requisitos establecidos por la norma.

3.5 DISEÑO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

3.5.1 Tipo de investigación

La investigación realizada es de tipo aplicada, puesto que se puede aplicar de manera inmediata para la solución de problemas prácticos (Arias, 2012).

3.5.2 Nivel de investigación

Esta investigación es de nivel explicativo, debido a que desarrolla el por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta o por qué se relación dos o más variables (Hernandez, Fernandez, & Baptista, 2014).

3.5.3 Población y muestra

3.5.3.1 Población

La población estudiada fue el grupo de las probetas elaboradas de material virgen y las probetas elaboradas con adición de pavimento asfáltico reciclado al 15%, 25%, 35%



y 45%, siendo un total de 51 probetas de mezcla asfáltica estudiada y las muestras de material base virgen y también con adición de pavimento asfáltico reciclado al 15%, 30%, 45% y 60% siendo un total de 15 ensayos de CBR realizados para la base granular.

3.5.3.2 Muestra

Según la norma ASTM D6926 Elaboración de briquetas Marshall se deben elaborar no menos de 3 briquetas ni más de 5 briquetas para una prueba, también según lo indicado en la ASTM D6927 se considera que un resultado de prueba es el promedio de las pruebas de tres muestras.

Basados en la ASTM D420 Guía para la investigación y muestreo de suelos y rocas, ASTM D75 Práctica para muestreo de Agregados, ASTM C702 Práctica para reducir muestras de agregados al tamaño de prueba. Se obtuvieron las muestras para someter a los ensayos realizados en esta investigación. Como se muestran en las tablas 20, 21, 22, 23, 24 y 25.

Tabla 20

Cantidad de ensayos Proctor realizados.

ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO	
TIPO DE MATERIAL	CANTIDAD DE PRUEBAS
Material virgen pasa base	4
SUB TOTAL	4
TOTAL	4

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 21

Cantidad de ensayos de CBR realizados.

VALOR RELATIVO DE SOPORTE CBR	
TIPO DE MATERIAL	CANTIDAD DE PRUEBAS
Material virgen pasa base	3



VALOR RELATIVO DE SOPORTE CBR

TIPO DE MATERIAL	CANTIDAD DE PRUEBAS
Material virgen pasa base + 15% de RAP	3
Material virgen pasa base + 30% de RAP	3
Material vírgen pasa base + 45% de RAP	3
Material vírgen pasa base + 60% de RAP	3
SUB TOTAL	15
TOTAL	15

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 22

Cantidad de briquetas realizadas para el diseño de mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1.

PRUEBA ESTÁNDAR PARA ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL	
TIPO DE MATERIAL	CANTIDAD DE BRIQUETAS
Mezcla virgen con 5.5 % de asfalto	3
Mezcla virgen con 5.9 % de asfalto	3
Mezcla virgen con 6.0 % de asfalto	3
Mezcla virgen con 6.5 % de asfalto	3
Mezcla virgen con 7.0 % de asfalto	3
SUB TOTAL	15
TOTAL	15

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 23

Cantidad de briquetas realizadas para el diseño de mezcla asfáltica del RAP.

PRUEBA ESTÁNDAR PARA ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL	
TIPO DE MATERIAL	CANTIDAD DE BRIQUETAS
Mezcla con material virgen	3
Mezcla con 15% de RAP	3
Mezcla con 25% de RAP	3
Mezcla con 35% de RAP	3
Mezcla con 45% de RAP	3
SUB TOTAL	15
TOTAL	15

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.



Tabla 24

Cantidad de ensayos de compactabilidad para MAC-1 y RAP.

ENSAYO DE COMPACTIBILIDAD	
TIPO DE MATERIAL	CANTIDAD DE BRIQUETAS
Mezcla virgen a 5 golpes	2
Mezcla virgen a 50 golpes	2
Mezcla con RAP óptimo a 5 golpes	2
Mezcla con RAP óptimo a 50 golpes	2
SUB TOTAL	08
TOTAL	08

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 25

Cantidad de ensayos Lottman modificado.

RESISTENCIA AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD	
TIPO DE MATERIAL	CANTIDAD DE BRIQUETAS
Mezcla virgen a condiciones normales	3
Mezcla virgen a condiciones críticas	3
Mezcla con RAP óptimo a condiciones normales	3
Mezcla con RAP óptimo a condiciones críticas	3
SUB TOTAL	12
TOTAL	12

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

3.6 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.6.1 Propiedades de los materiales

3.6.1.1 Propiedades del material granular para base

3.6.1.1.1 Ensayo de contenido de humedad

Este ensayo se hizo obedeciendo las indicaciones de la ASTM D 2216 – 19.



- **Equipo Utilizado**

- Horno de secado, ventilado y controlado por termostato capaz de mantener temperatura uniforme de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Balanza de 1000 g de capacidad con precisión de 0.01 g
- Recipientes resistentes a altas temperaturas.

- **Procedimiento**

- Se realizó la obtención y transporte del material de acuerdo con la norma ASTM D4220/D4220M,
- Se pesó 2.5 kg para colocar al horno, ya que, la norma ASTM D2216-19 nos indica que para una muestra de tamaño máximo es de 3/4", corresponde el peso indicado.
- Se registró la masa del recipiente y su código de identificación.
- Luego se colocó la muestra húmeda en el recipiente y se registró su masa.
- Se dejó la muestra con el recipiente en el horno a $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$, hasta obtener una masa constante.
- Se sacó del horno y dejó enfriar a temperatura ambiente y se registró su masa.
- Para el cálculo, se realizó utilizando la siguiente fórmula:

$$W\% = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso de la muestra seca}} \times 100$$

Figura 13

Ensayo de contenido de humedad para material de base granular patrón.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

- **Resultados**

Los resultados se muestran en la siguiente tabla 26:

Tabla 26

Resultados de contenido de humedad para la base granular patrón.

Descripción	TA-01	TA-02
Peso de tara (gr)	995.00	985.00
Peso de la tara + muestra húmeda (gr)	4757.00	4658.00
Peso de la tara + muestra seca (gr)	4730.00	4641.00
Peso del agua contenida (gr)	27.00	17.00
Peso de la muestra seca (gr)	3735.00	3656.00
Contenido de Humedad (%)	0.72 %	0.46 %
Contenido de Humedad Promedio (%)	0.59 %	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 26 se tiene un contenido de humedad promedio de 0.59% para el material base virgen.

3.6.1.1.2 Ensayo de granulometría por tamizado

Este ensayo se realizó en base a la norma ASTM D6913/D6913M-17

- **Equipo Utilizado**

- Balanza de 1000 g de capacidad con precisión de 0.01 g

- Recipientes resistentes a altas temperaturas.
- Juego de tamices de malla metálica de acuerdo a la norma MTC E11, tamices: (2", 1 ½", 1", ¾", ½", ⅜", N°4, N° 10, N° 20, N° 40, N° 100, N°200 y base)
- **Procedimiento**
 - Se realizó la obtención y transporte del material de acuerdo con la norma ASTM D4220/D4220M.
 - De acuerdo a la norma ASTM D6913/D6913M, se tiene que para un tamaño máximo de ¾" se debe tamizar como mínimo 1.3 kg y reportar los resultados con 1% de precisión.
 - Dejamos secar la muestra a temperatura ambiente hasta conseguir masa constante
 - Armamos el juego de tamices, vertimos la muestra y procedemos a tamizar de forma manual durante 10 minutos.

Figura 14

Ensayo de granulometría para la base granular.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

- **Resultados**

Se tiene los datos en la tabla 27:

Tabla 27

Datos iniciales para el ensayo de granulometría.

Datos iniciales	
Peso de Material	
Peso Inicial Total (kg)	3,493.5
Peso Fracción Fina Para Lavar (gr)	1,445.4

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Los resultados se muestran en la tabla 28:

Tabla 28

Resultado de ensayo de granulometría por tamizado.

Tamices ASTM	Apertura (mm)	Peso Retenido	Retenido Parcial	Retenido Acumulado	Porcentaje que Pasa	Base Gradación A	
5"	127.00						
4"	101.60						
3"	73.00						
2 1/2"	60.30						
2"	50.80				100.0	100	100
1 1/2"	37.50						
1"	25.40	600.0	17.2	17.2	82.8		
3/4"	19.00	446.1	12.8	29.9	70.1		
1/2"	12.70	564.9	16.2	46.1	53.9		
3/8"	9.520	313.3	9.0	55.1	44.9	30	65
1/4"	6.350						
N° 4	4.750	423.8	12.1	67.2	32.8	25	55
N° 8	2.360						
N° 10	2.000	444.5	10.1	77.3	22.7	15	40
N° 16	1.190						
N° 20	0.850	214.2	4.9	82.2	17.9		
N° 30	0.600						
N° 40	0.420	103.0	2.3	84.5	15.5	8	20
N° 50	0.300						



Tamices ASTM	Abertura (mm)	Peso Rete nido	Retenido Parcial	Retenido Acumulado	Porcentaje que Pasa	Base Gradación A	
N° 60	0.250	52.5	1.2	85.7	14.3		
N° 80	0.180						
N° 100	0.150	198.5	4.5	90.2	9.8		
N° 140	0.106						
N° 200	0.074	128.7	2.9	93.1	6.9	2	8
Pasante		3.9	0.1	93.2			

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

A continuación (tabla 29) analizamos los resultados del ensayo de granulometría de la base granular:

Tabla 29

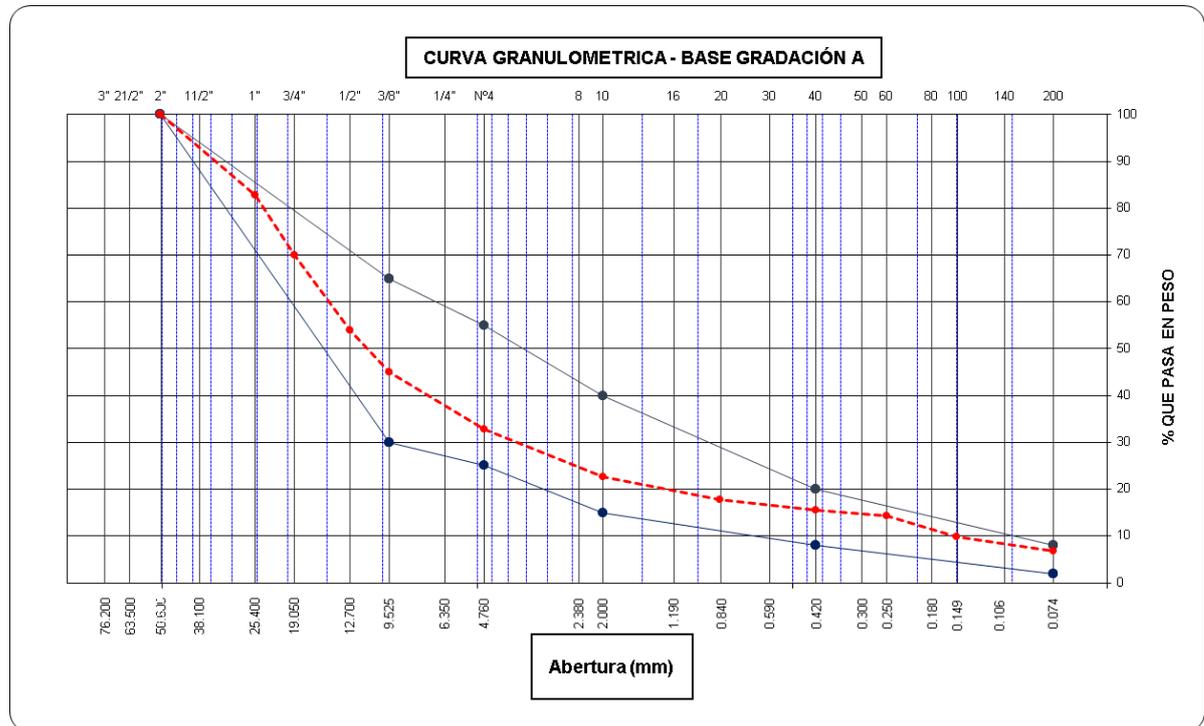
Análisis de resultados.

Análisis de resultados de granulometría	
Grava (%)	67.21 %
Arena (%)	32.79 %
Finos (%)	6.90 %
Pasa tamiz N° 4 (5mm):	57.2 %
Pasa tamiz N° 200 (0,080 mm):	7.8 %
D60:	9.52 mm
D30:	1.19 mm
D10 :	0.10 mm
Coefficiente de uniformidad (Cu):	95.20
Grado de curvatura (Cc):	1.49
TMN	1"

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 15

Curva granulométrica de la base granular - gradación A.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Se tiene como resultado de la granulometría del material para base granular, que se alinea y se encuentra dentro del huso granulométrico de Gradación A, de acuerdo a los requerimientos de la EG-2013. Así como se muestra en la tabla 28 y figura 15.

3.6.1.1.3 Ensayo de límite líquido, límite plástico e índice plasticidad

Este ensayo se hizo bajo los lineamientos de la norma ASTM D4318 - 17

- **Equipo Utilizado**

- Tamiz N° 40.
- Balanza de 1000 g de capacidad con precisión de 0.01 g
- Recipientes resistentes a altas temperaturas.
- Horno de secado, ventilado y controlado por termostato capaz de mantener temperatura uniforme de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Kit completo de “Cuchara de Casagrande”.



- Placa lisa de vidrio que no absorbe humedad.
- Espátula metálica.
- **Procedimiento**
 - Se tomó una muestra representativa del suelo mediante el método de cuarteo.
 - Se tamizó esta muestra por el tamiz N° 40.
 - Seguidamente se le añadió agua y se revuelve con la espátula, dejando saturar durante 8 horas (el contenedor fue cubierto por un material impermeable), esto con el fin que se consiga una saturación total y homogénea.
 - Para el límite líquido se remueve la muestra de suelo, con una espátula colocamos una porción de muestra preparado en la cuchara del dispositivo de límite líquido en el punto donde la cuchara descansa, sobre la base, se apretó y extendió a una profundidad aproximadamente de 10 mm.
 - Se formó una ranura en la superficie de la muestra utilizando el ranurador con el borde biselado hacia afuera, en una línea que une el punto más bajo con el punto más alto.
 - Se giró la manija para hacer que la cuchara golpee la base a una velocidad de 1.9 a 2.1 golpes por segundo hasta que las dos mitades separadas por la ranura entren en contacto en la parte inferior a lo largo de una distancia de 13mm.
 - En este caso la muestra ensayada no tuvo límite líquido debido a que la ranura se cerraba a menos de 5 golpes a pesar de que se intentó realizar con diferentes contenidos de humedad.

- Para el límite plástico se utilizó la misma muestra que en el límite líquido
- Se tomó una muestra entre 1.5g y 2g y se formó una masa elipsoidal.
- Se hizo rodar la muestra sobre la platina de vidrio con la palma de la mano hasta conseguir un diámetro uniforme de 3.2 mm en toda su longitud.
- A este diámetro se fracturó la muestra así que se tomó registro de su masa.
- Las muestras se dejaron secando en un horno a $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$ hasta alcanzar una masa constante.
- Se dejó enfriar a temperatura ambiente y se tomó lectura de su masa, para así obtener el contenido de humedad.

Figura 16

Ensayo para determinar el índice plástico.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

- **Resultados**

Los resultados se muestran en las tablas 30 y 31:

Tabla 30

Resultado del ensayo de límite líquido.

N° TARRO	LÍMITE LÍQUIDO				
	1	2	3	4	PROMEDIO
TARRO + SUELO HÚMEDO (g)	38.63	44.09	53.06	50.03	
TARRO + SUELO SECO (g)	36.06	40.34	49.83	47.55	
AGUA (g)	2.57	3.75	3.23	2.48	
PESO DEL TARRO (g)	28.08	27.84	39.04	39.11	
PESO DEL SUELO SECO (g)	7.98	12.50	10.79	8.44	
% DE HUMEDAD (g)	32.21	30.00	29.94	29.38	
N° DE GOLPES	16	24	29	35	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 31

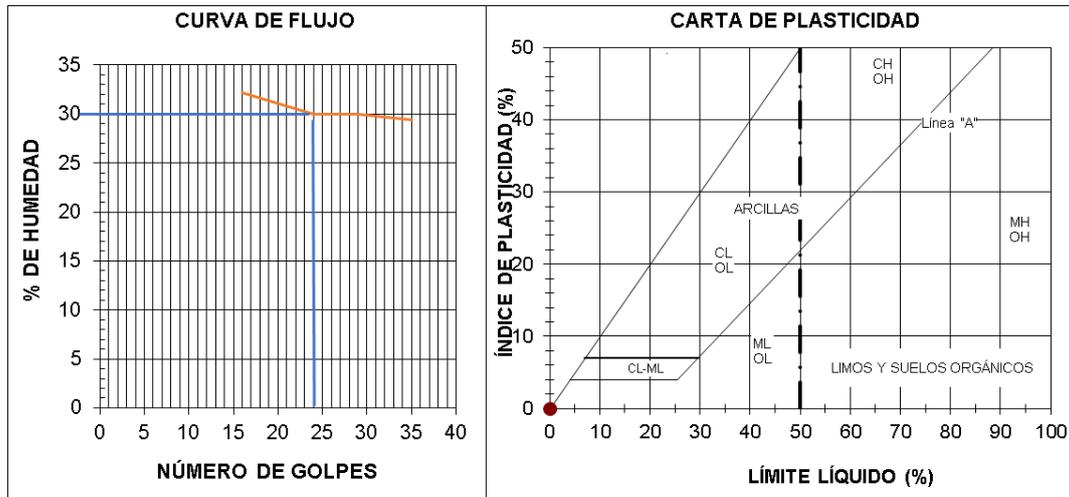
Resultados del ensayo de límite plástico.

N° TARRO	LÍMITE PLÁSTICO		PROMEDIO
	1	2	
TARRO + SUELO HUMEDO	19.64	20.17	
TARRO + SUELO SECO	19.27	19.72	
AGUA	0.37	0.45	
PESO DEL TARRO	18.03	18.03	
PESO DEL SUELO SECO	1.24	1.69	
% DE HUMEDAD	29.84	26.627	28.23

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 17

Determinación de límite líquido a 25 golpes.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 32

Resumen de resultados de índice de plasticidad.

RESULTADOS		
Límite líquido	30.00%	
Límite plástico	28.23%	
Índice de plasticidad	1.77 %	Ligeramente plástico

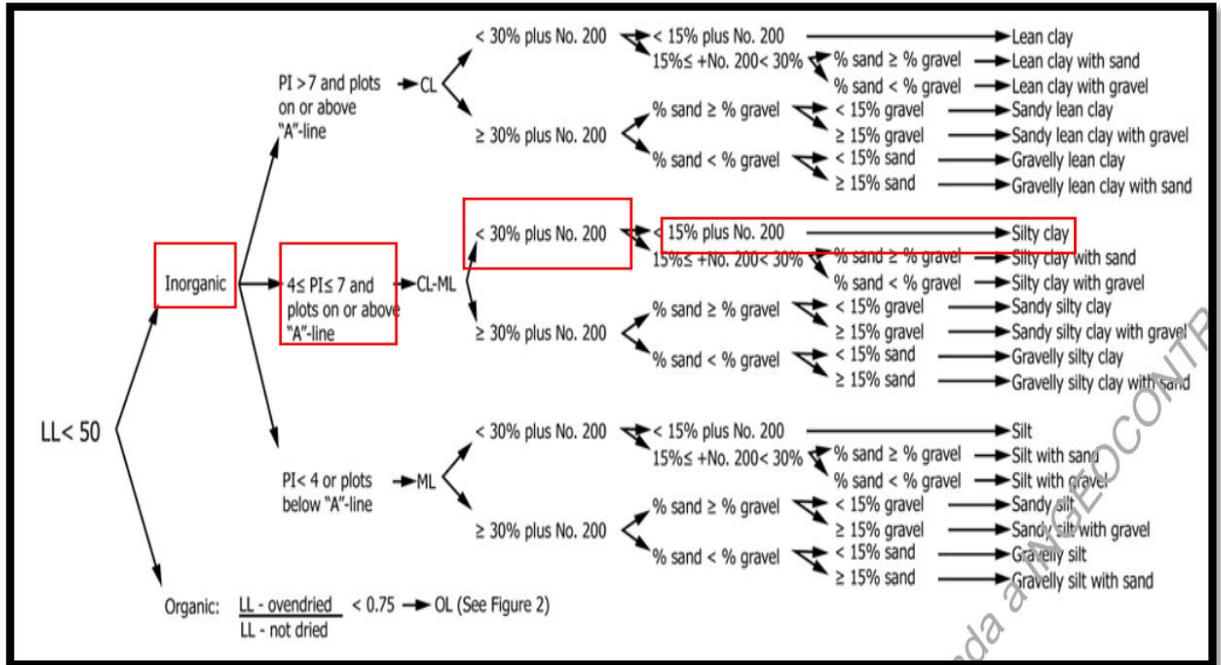
Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Se tiene que el límite plástico, se determina intersecando 25 golpes con el contenido de humedad de la curva de flujo, resultando 30.00 % de humedad, el límite plástico es de 28.23 %, por lo tanto, el índice de plasticidad es de 1.77 % , esto representa un material para base granular ligeramente plástico, y que está dentro de los parámetros mencionados en la sección 403 de la EG-2013 (índice plástico máximo 2%).

La clasificación del suelo se realizó de acuerdo a la figura 18, el cual nos da como resultado que la composición del suelo de base granular corresponde a CL-ML, el cual es una arcilla limosa de ligera plasticidad.

Figura 18

Clasificación del material pasante de No 40.



Fuente: ASTM D2887-17.

3.6.1.1.4 Ensayo de Proctor Modificado

Este ensayo se hizo bajo los lineamientos de la norma ASTM D1557-12.

- **Equipo Utilizado**

- Molde Proctor 6" (incluye placa base y collarín)
- Pisón 10 lb
- Bandejas
- Recipientes resistentes a altas temperaturas.
- Horno de secado, ventilado y controlado por termostato capaz de mantener temperatura uniforme de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Guantes de Goma
- Tamiz 3/4"
- Probeta



- **Procedimiento**

- Para este ensayo se procedió a elegir un método C, debido a que menos del 30% del material se retiene en el tamiz 3/4".
- Se seleccionó el material por cuarteo ASTM D702 y reducción de muestras de acuerdo a la norma ASTM D75.
- Para este ensayo se utilizó 5.9 kg para cada ensayo, y se satura con porcentajes de 4%, 6%, 8% y 10% de humedad, dejamos saturando por 4 horas, para que el material alcance la saturación higroscópica. (se dejó saturar 4 horas debido a que este material es granular y tiene poca presencia de suelos finos).
- Se tomó registro de la masa del molde con la base metálica, así mismo tomamos las medidas del molde (diámetro y altura).
- Se separó la muestra en 5 porciones iguales
- Se ha vertido la primera capa en el molde y con el pisón compactamos a 56 golpes de manera uniforme, seguidamente, vertimos la segunda capa y nuevamente compactamos a 56 golpes así sucesivamente las 5 porciones de muestra.
- Terminado de compactar se quitó el collar y con una regla metálica procedemos a enrasar el molde, completamos las partes que quedaron con poros con muestra que pasa el tamiz N° 4.
- Se tomó registro de la masa del molde más la muestra compactada.
- Se quitó la muestra del molde y de la parte central tomamos aproximadamente 500g para obtener su contenido de humedad.
- De la misma manera se continuó con el procedimiento para los 04 contenidos de humedad.

- **Resultados**

Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 33

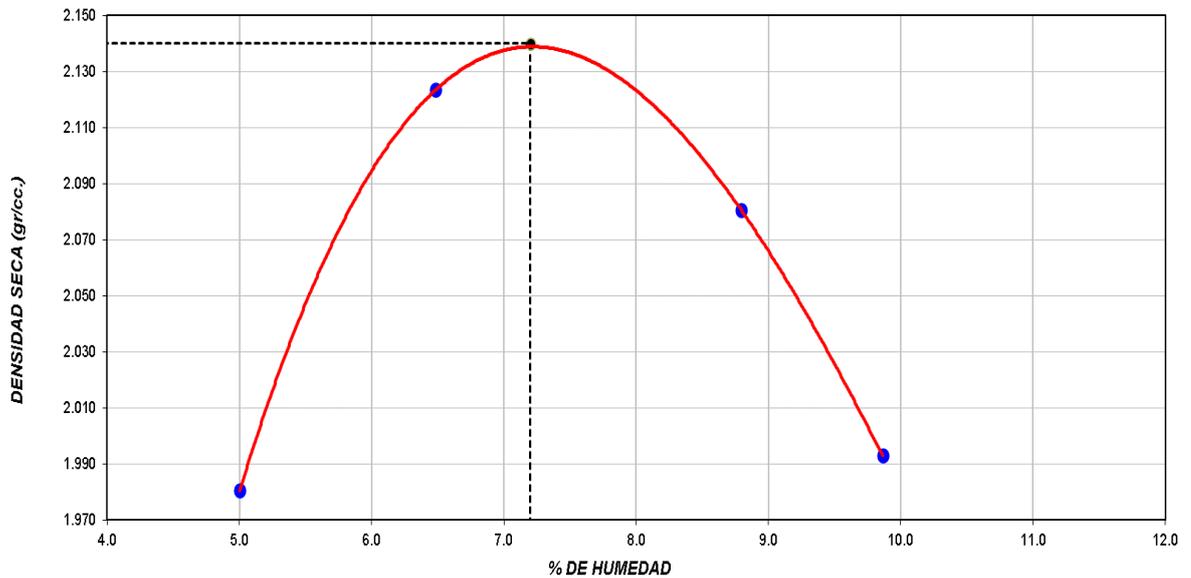
Resultados del ensayo de Proctor Modificado para la base granular patrón.

ENSAYO DE COMPACTACIÓN - PROCTOR MODIFICADO PARA CBR ASTM D1557 / ASTM D1883					
		Volumen Molde	2129.8	cm ³	
		Peso Molde	5613	gr.	
NUMERO DE ENSAYOS		1	2	3	4
Peso Suelo + Molde	gr.	10,042	10,429	10,434	10,276
Peso Suelo Húmedo Compactado	gr.	4,429	4,816	4,821	4,663
Peso Volumétrico Húmedo	gr.	2.080	2.261	2.264	2.189
Recipiente Numero		TA-05	TA-04	TA-02	TA-01
Peso de la Tara	gr.	87.3	88.0	89.4	89.1
Peso Suelo Húmedo + Tara	gr.	654.0	955.0	794.4	847.9
Peso Suelo Seco + Tara	gr.	627.0	902.2	737.5	779.8
Peso del agua	gr.	27.0	52.8	57.0	68.1
Peso del suelo seco	gr.	540	814	648	691
Contenido de agua	%	5.0	6.5	8.8	9.9
Densidad Seca	gr/c c	1.980	2.124	2.081	1.993
Densidad Máxima Seca:		2.140	gr/cm³		
Contenido Humedad Optima:				7.20	%

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 19

Curva para hallar el contenido de humedad óptimo para una densidad seca máxima.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

De la tabla 33 y figura 19 se tiene como resultados que el contenido óptimo de agua es de 7.20 %, para una densidad seca máxima de 2.140 gr/cm³. Estos resultados se utilizaron para elaborar el ensayo de valor relativo de soporte California (CBR).

3.6.1.1.5 Ensayo de valor relativo de soporte (CBR)

Este ensayo se hizo bajo los lineamientos de la norma ASTM D1883-16

- **Equipo Utilizado**

- Molde CBR 6" (incluye placa base y collarín, disco espaciador, placa y cargas)
- Pisón 10 lb
- Trípode
- Dial para medir deformación
- Prensa CBR



- Horno de secado, ventilado y controlado por termostato capaz de mantener temperatura uniforme de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Bandejas
- Guantes de Goma
- Tamiz 3/4"
- Probeta
- **Procedimiento**
 - Se seleccionó el material por cuarteo (ASTM D702) y reducción de muestras de acuerdo a la norma ASTM D75.
 - Con el ensayo de Proctor modificado se obtuvo el contenido de humedad óptimo y la máxima densidad que alcanza el suelo.
 - Se preparó la muestra y añadimos el contenido de humedad óptimo descontando el contenido de humedad que tiene el material en su estado natural, se utilizó 5.9 kg y amasamos con el guante de goma.
 - Una vez logrado una mezcla homogénea se separó en 05 porciones iguales.
 - Se preparó el molde CBR sobre la base metálica poniendo debajo el disco separador, sobre ello colocamos un papel filtro.
 - Se tomó registro de las medidas del molde (masa, diámetro y altura) y del disco espaciador (altura).
 - Se vertió la primera porción de muestra dentro del molde y compactamos con el pisón a 56 golpes, quitamos el collar y procedemos a enrasar con una regla metálica completando los poros con muestra que pasa el tamiz N° 4.
 - Se tomó registro de la masa del molde con la muestra.



- Se quitó el molde de la base metálica y procedemos a fijarla, pero de manera invertida, quitando el disco espaciador.
- Se tomó registro de la masa del molde, base metálica y muestra compactada.
- Sobre la muestra se colocó la placa perforada con vástago y sobre ella los discos de carga.
- Seguidamente se tomó lectura de la altura con el trípode y dial, dejándolo luego saturar sumergido en agua durante 4 días, tomando registro de la altura (expansión por saturación) con el dial cada 24 horas.
- Pasada los 4 días se tomó la última lectura de expansión, y procedemos a sacar del agua, quitamos la placa perforada con vástago y so con los anillos de carga dejando escurrir por 15 minutos.
- Transcurrido el tiempo se procedió a llevar el molde a la prensa CBR, para someterlo a una penetración con velocidad de 1.27 mm por minuto.
- Se tomó registro de la carga en intervalos indicados en la norma.
- Se culminó el ensayo en la prensa CBR tomamos una muestra del centro del molde y obtenemos su contenido de humedad.
- Se realizó el mismo procedimiento para las siguientes muestras.

Figura 20

Ensayo de CBR para muestra patrón y base granular añadida con RAP (etapa sumergida).



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

- **Resultados**

Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 34

Resultados del ensayo de CBR para la base granular patrón.

ENSAYO DE VALOR DE SOPORTE DE CALIFORNIA ASTM D1883						
CÁLCULO DE LA RELACIÓN DE SOPORTE CALIFORNIA (C.B.R.)						
Molde N°	1		2		3	
Número de capas	5		5		5	
Número de golpes	56		56		56	
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO
Peso suelo + molde (gr.)	13,288	13,374	12,837	12,970	13,952	14,041
Peso molde (gr.)	8,408	8,408	8,006	8,006	9,082	9,082
Peso suelo compactado (gr.)	4,880	4,966	4,831	4,964	4,870	4,959
Volumen del molde (cm ³)	2,123	2,123	2,108	2,108	2,124	2,124
Densidad húmeda (gr./cm ³)	2.298	2.339	2.292	2.355	2.293	2.335
Densidad Seca (gr./cm ³)	2.142	2.139	2.141	2.137	2.142	2.113
CONTENIDO DE HUMEDAD						
Peso de tara (gr.)	37.5	37.5	38.5	38.5	27.9	27.9
Tara + suelo húmedo (gr.)	167.2	283.9	128.9	348.3	130.2	245.3



**ENSAYO DE VALOR DE SOPORTE DE CALIFORNIA
ASTM D1883**

Tara + suelo seco (gr.)	158.4	262.8	122.9	319.7	123.5	224.7
Peso de agua (gr.)	8.8	21.1	5.9	28.6	6.7	20.6
Peso de suelo seco (gr.)	120.9	225.3	84.4	281.2	95.6	196.8
Humedad (%)	7.3	9.3	7.1	10.2	7.0	10.5

EXPANSIÓN

Fecha	Hora	Tiempo Hr	Dial 0.01 mm	Expansión		Dial	Expansión		Dial	Expansión	
				mm	%		mm	%		mm	%
11-Nov	10:30	0	9.330	0.00	0.00	3.635	0.00	0.00	0.535	0.00	0.00
12-Nov	10:30	24	9.390	0.06	0.05	3.704	0.07	0.06	0.594	0.06	0.05
13-Nov	10:30	48	9.415	0.08	0.07	3.741	0.11	0.09	0.655	0.12	0.10
14-Nov	10:30	72	9.441	0.11	0.10	3.770	0.14	0.12	0.700	0.17	0.14
15-Nov	10:30	96	9.450	0.12	0.10	3.780	0.15	0.12	0.750	0.22	0.19

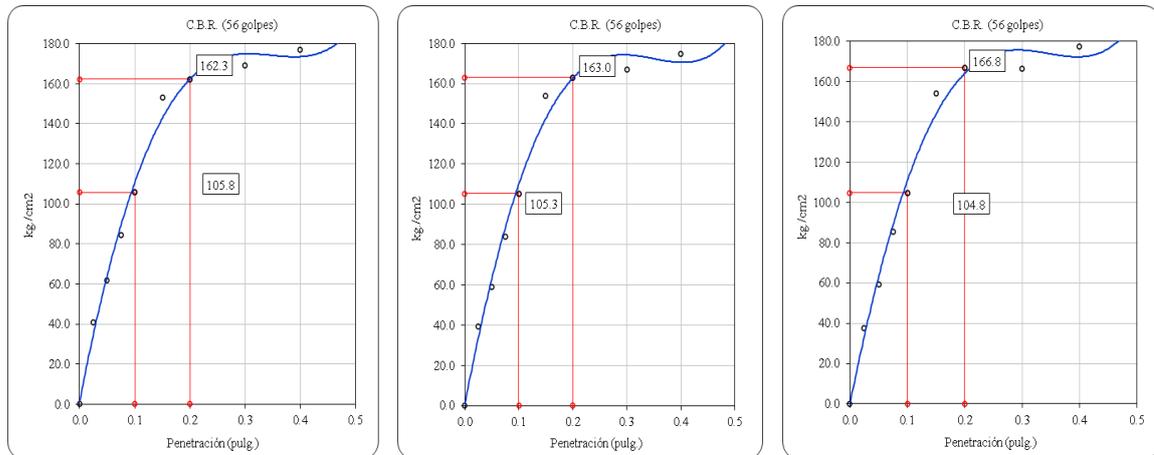
PENETRACIÓN

Penetración (pulg.)	Carga Standard (kg/cm ²)	Molde N° 1				Molde N° 2				Molde N° 3			
		Carga		Corrección		Carga		Corrección		Carga		Corrección	
		kg	kg/c m ²	kg/c m ²	CB R %	kg	kg/c m ²	kg/c m ²	CB R %	kg	kg/c m ²	kg/c m ²	CB R %
0.025		797.80	41.0							731	37.5		
0.050		1205.42	61.9			115.2	59.2			115.7	59.4		
0.075		1640.65	84.2			163.2	83.8			166.4	85.4		
0.100	70.307	2060.37	105.8	105.8	15.05	205.2	105.3	105.3	14.98	204.0	104.8	104.8	14.90
0.150		2982.25	153.1			300.1	154.1			300.3	154.2		
0.200	105.460	3161.81	162.3	162.3	15.39	317.4	163.0	163.0	15.45	324.9	166.8	166.8	15.82
0.300		3293.66	169.1			325.3	167.0			324.1	166.4		
0.400		3445.77	176.9			340.6	174.9			345.6	177.4		
0.500		3678.93	188.9			361.0	185.3			371.2	190.6		

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 21

Comportamiento del CBR de la base granular patrón.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 35

Resumen de resultados de CBR para la base granular patrón.

	Porcentaje de CBR			Promedio
CBR (0.1")	150.5%	149.8%	149.0%	149.8%
CBR (0.2")	153.9%	154.5%	158.2%	155.5%
Den. (g/cc)	2.140	2.141	2.142	2.141

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Se obtuvo un CBR de 149.8% promedio a 0.1" de penetración con una densidad seca máxima de 2.141 gr/cm³ y un CBR de 155.5% promedio a 0.2" de penetración con una densidad seca máxima de 2.141 gr/cm³, como se muestra en la tabla 35, por lo cual cumple con el requerimiento establecido de CBR (100.00 % min) según EG-2013.

3.6.1.2 Propiedades del material virgen para la carpeta asfáltica

3.6.1.2.1 Ensayo de granulometría por tamizado de los agregados

Este ensayo se realizó con base en la ASTM C 136/D136 M-14

- **Equipo Utilizado**

- Balanza de 1000 g de capacidad con precisión de 0.01 g
- Recipientes resistentes a altas temperaturas.



- Juego de tamices de malla metálica de acuerdo a la norma E11, para los agregados grueso (piedra chancada) tamices: (2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", N°4, y base), para los agregados finos (arena chancada y arena zarandeada) tamices: (N° 4, N° 10, N° 20, N° 40, N° 60, N° 80, N° 100, N° 200 y base)
- **Procedimiento**
 - Para el agregado grueso (piedra chancada) se procedió a lavar la muestra y se dejó secar en un horno a $110 \pm 5 \text{ } ^\circ\text{C}$ hasta alcanzar masa constante.
 - Ya seca la muestra se procedió a obtener el tamaño máximo nominal, que según la ASTM C136/C136M-14 es la abertura de la primera malla que retiene material. En este caso fue la malla 3/4".
 - Para este tamaño nominal, el tamaño de muestra mínimo es de 5kg
 - Se procedió a armar el juego de tamices, vertimos el material sobre el primer tamiz y agitamos por aproximadamente 10 minutos, observando que no exista exceso de material en los tamices.
 - Terminado el proceso se tomó registro del peso retenido en cada tamiz.
 - Para los agregados finos se realizó el mismo procedimiento excepto el de lavar la muestra y se cambian los tamices.

- **Resultados**

Se tiene los datos iniciales en la tabla 36:

Tabla 36

Datos iniciales de a granulometría de la piedra chancada.

Peso de material	
Peso inicial total (kg)	5,302
Peso fracción fina para lavar (gr)	0.0

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Los resultados se muestran en la tabla 37:

Tabla 37

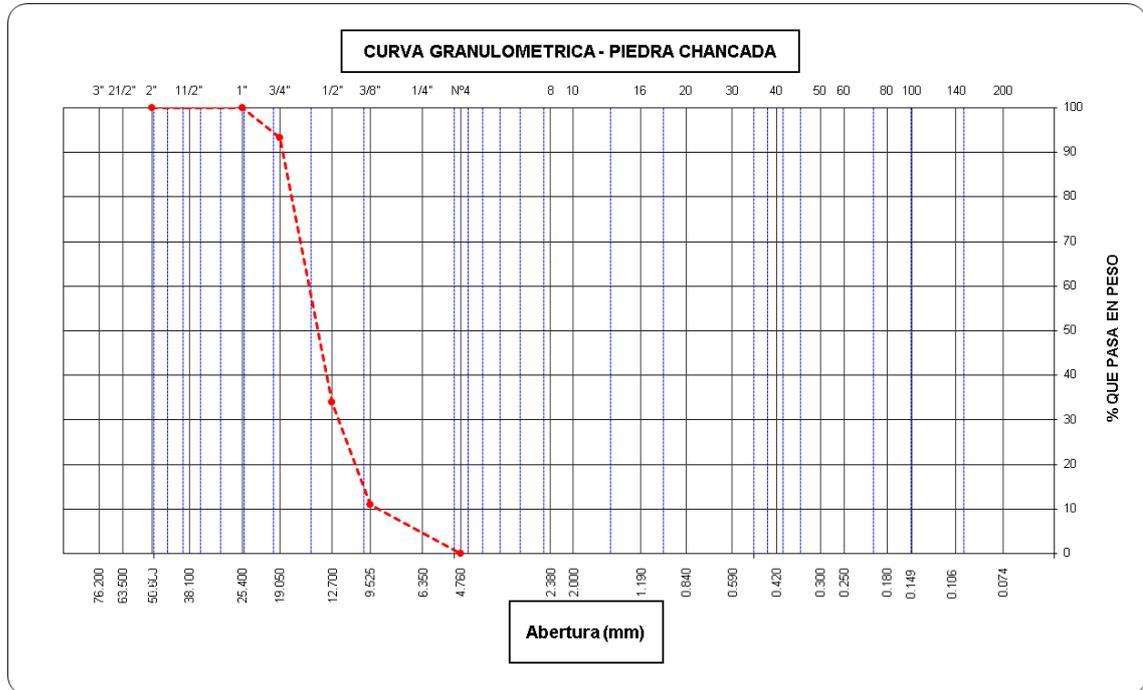
Resultados de la granulometría para piedra chancada de TMN 3/4".

Tamices ASTM	Abertura (mm)	Peso Retenido	Retenido Parcial	Retenido Acumulado	Porcentaje que Pasa
5"	127.000				
4"	101.600				
3"	73.000				
2 1/2"	60.300				
2"	50.800				100.0
1 1/2"	37.500				100.0
1"	25.400				100.0
3/4"	19.000	352.0	6.6	6.6	93.4
1/2"	12.700	3,155.0	59.5	66.2	33.9
3/8"	9.520	1,218.0	23.0	89.1	10.9
1/4"	6.350				
N° 4	4.750	574.0	10.8	100.0	0.1
N° 8	2.360				
N° 10	2.000				
N° 16	1.190				
N° 20	0.850				
N° 30	0.600				
N° 40	0.420				
N° 50	0.300				
N° 60	0.250				
N° 80	0.180				
N° 100	0.150				
N° 140	0.106				
N° 200	0.074				
Pasante					

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 22

Curva granulométrica de la piedra chancada TMN 3/4".



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 38

Datos iniciales para granulometría de la arena zarandeada.

Peso de Material	
Peso inicial total (kg)	1,387
Peso fracción fina para lavar (gr)	1,139.3

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 39

Resultados de granulometría de arena zarandeada.

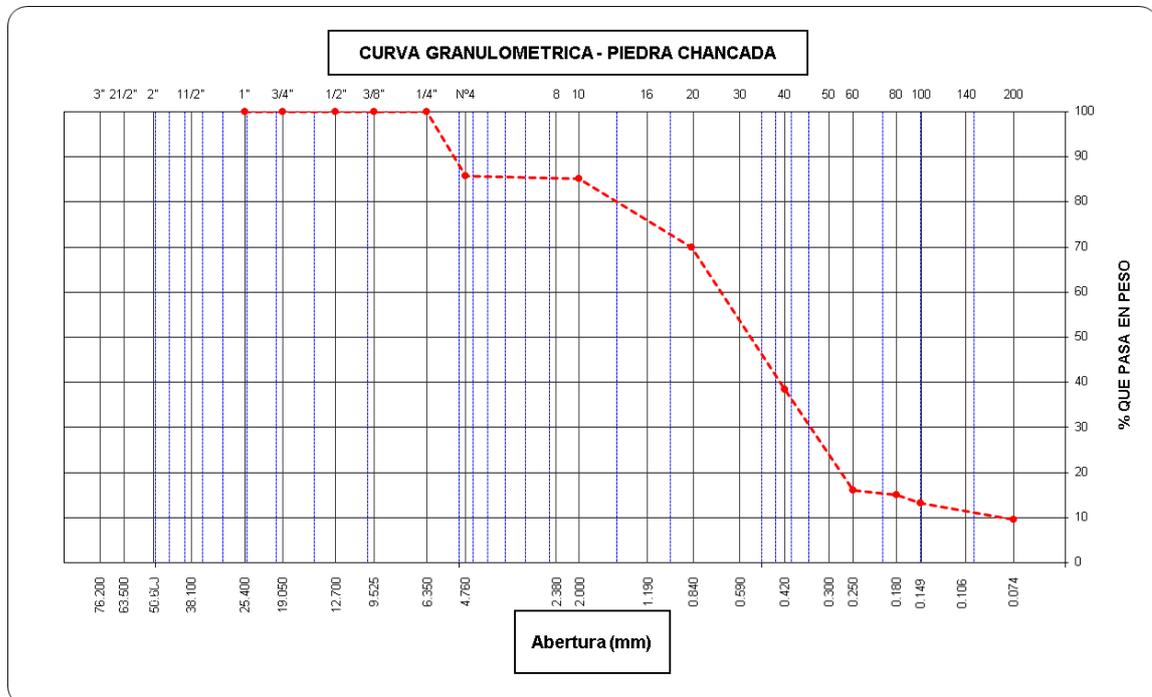
Tamices ASTM	Abertura (mm)	Peso Retenido	Retenido Parcial	Retenido Acumulado	Porcentaje que Pasa
5"	127.00				
4"	101.60				
3"	73.00				
2 1/2"	60.30				
2"	50.80				
1 1/2"	37.50				
1"	25.40				100.0

Tamices ASTM	Abertura (mm)	Peso Retenido	Retenido Parcial	Retenido Acumulado	Porcentaje que Pasa
3/4"	19.00				100.0
1/2"	12.700				100.0
3/8"	9.52				100.0
1/4"	6.35				100.0
N° 4	4.75	186.0	14.3	14.3	85.7
N° 8	2.36				
N° 10	2.00	8.0	0.6	14.8	85.2
N° 16	1.19				
N° 20	0.85	222.1	15.3	30.1	69.9
N° 30	0.60				
N° 40	0.42	457.8	31.5	61.5	38.5
N° 50	0.30				
N° 60	0.25	327.6	22.5	84.0	16.0
N° 80	0.18	14.1	1.0	85.0	15.0
N° 100	0.150	25.9	1.8	86.8	13.2
N° 140	0.106				
N° 200	0.074	54.5	3.8	90.5	9.5
Pasante		8.0	0.6	91.1	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 23

Curva granulométrica de la arena zarandeada.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 40

Datos iniciales para la granulometría de la arena zarandeada.

Peso de Material	
Peso Inicial Total (kg)	1,304
Peso Fracción Fina Para Lavar (gr)	1,247.7

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 41

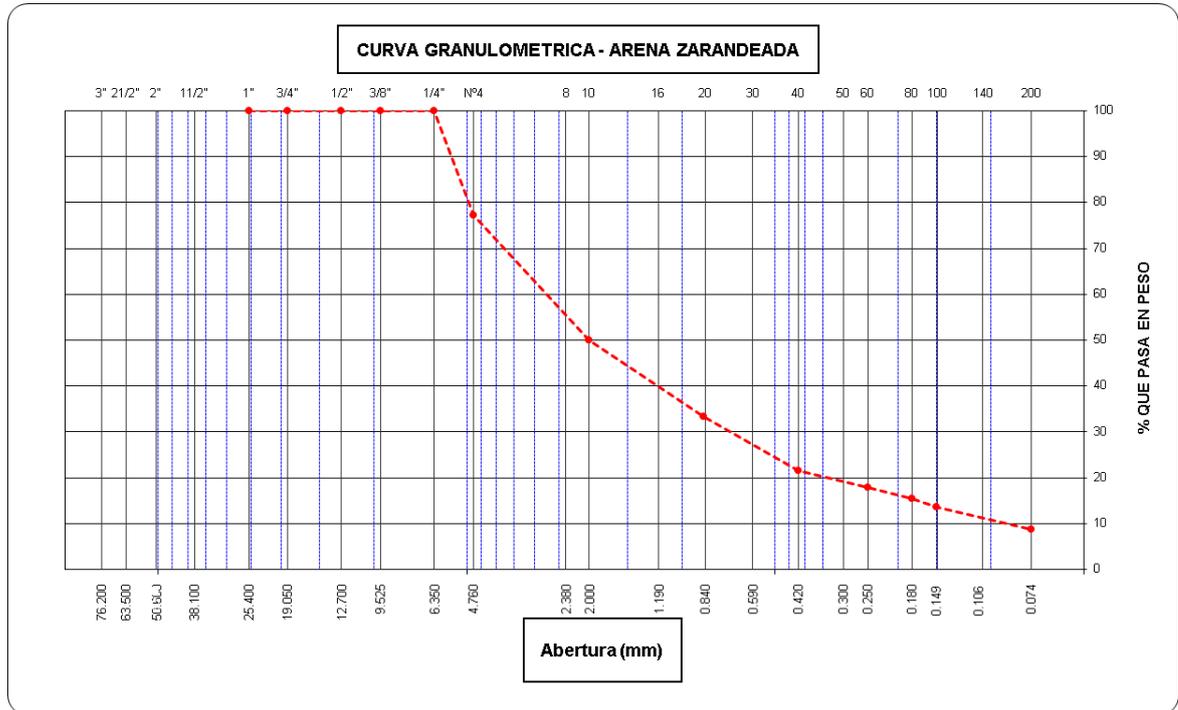
Resultados de granulometría de arena chancada.

Tamices ASTM	Abertura (mm)	Peso Retenido	Retenido Parcial	Retenido Acumulado	Porcentaje que Pasa
5"	127.00				
4"	101.60				
3"	73.00				
2 1/2"	60.30				
2"	50.80				
1 1/2"	37.50				
1"	25.40				100.0
3/4"	19.00				100.0
1/2"	12.70				100.0
3/8"	9.52				100.0
1/4"	6.35				100.0
N° 4	4.75	316.0	22.8	22.8	77.2
N° 8	2.36				
N° 10	2.00	401.1	27.2	50.0	50.0
N° 16	1.19				
N° 20	0.85	245.5	16.6	66.6	33.4
N° 30	0.60				
N° 40	0.42	174.9	11.9	78.5	21.5
N° 50	0.30				
N° 60	0.25	52.5	3.6	82.0	18.0
N° 80	0.18	38.9	2.6	84.7	15.3
N° 100	0.150	26.3	1.8	86.4	13.6
N° 140	0.106				
N° 200	0.074	71.1	4.8	91.3	8.7
Pasante		60.8	4.1	95.4	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 24

Curva granulométrica de la arena chancada.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Realizada la granulometría de los agregados (piedra chancada, arena chancada y arena zarandeada), se procedió a la combinación teórica de los tres agregados mediante el método analítico, para lo cual se realizó un sistema de ecuaciones tomando como coeficientes los valores de granulometría de las mallas 1", 3/4", 1/2", 3/8", Nº4, 10, 40, 80 Y 200. Utilizando la siguiente denotación:

Figura 25

Sistema de ecuaciones lineales.

$$\begin{aligned}
 a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + a_{13} x_3 + \dots + a_{1n} x_n &= b_1 \\
 a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + a_{23} x_3 + \dots + a_{2n} x_n &= b_2 \\
 a_{31} x_1 + a_{32} x_2 + a_{33} x_3 + \dots + a_{3n} x_n &= b_3 \\
 \dots & \\
 a_{m1} x_1 + a_{m2} x_2 + a_{m3} x_3 + \dots + a_{mn} x_n &= b_m
 \end{aligned}$$

Fuente: http://recursostic.educacion.es/descartes/web/materiales_didacticos/sistemas_d_e_ecuaciones_lineales_2bcnt/discusion_por_el_teorema_de_rouche.htm



b_1, b_2, b_3, b_m , son promedio de los rangos de granulometría a satisfacer para la gradación MAC-1.

X_1, X_2, X_3, X_n , son proporciones a utilizar de cada material.

$a_{11}, a_{21}, a_{31}, \dots, a_{m1}$ son valores de granulometría de la piedra chancada.

$a_{12}, a_{22}, a_{32}, \dots, a_{m2}$ son valores de granulometría de la arena chancada.

$a_{13}, a_{23}, a_{33}, \dots, a_{m3}$ son valores de granulometría de la arena zarandeada.

$a_{14}, a_{24}, a_{34}, \dots, a_{m4}$ son valores de granulometría del filler.

Con los datos de la granulometría de los agregados, procedemos a generar 4 ecuaciones lineales correspondientes a las mallas 1", 3/4", 1/2" y 3/8". Las ecuaciones son las siguiente:

$$100 * X_1 + 100 * X_2 + 100 * X_3 + 100 * X_4 = 100$$

$$93.4 * X_1 + 100 * X_2 + 100 * X_3 + 100 * X_4 = 90$$

$$33.9 * X_1 + 100 * X_2 + 100 * X_3 + 100 * X_4 = 76$$

$$10.9 * X_1 + 100 * X_2 + 100 * X_3 + 100 * X_4 = 68.5$$

Donde:

X_1 es el valor de porcentaje de piedra chancada a añadir en la combinación teórica de agregados.

X_2 es el valor de porcentaje de arena chancada a añadir en la combinación teórica de agregados.

X_3 es el valor de porcentaje de arena zarandeada a añadir en la combinación teórica de agregados.

X_4 es el valor de porcentaje de filler a añadir en la combinación teórica de agregados.



Tenemos que:

$$X_2 = 0.4469 = 44.69 \%$$

$$X_3 = 0.1506 = 15.06 \%$$

$$X_4 = 0.0077 = 0.77\%$$

Para cálculo de X1, sabemos que:

$$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 = 100.0 \%$$

entonces tenemos que:

$$X_1 = 39.48 \%$$

Finalmente ajustamos, redondeamos y colocamos las proporciones a utilizar en la mezcla teórica de agregados para MAC-1 (tabla 42):

$X_1 = 39.3 \%$, de piedra chancada.

$X_2 = 45.0 \%$ de arena chancada.

$X_3 = 15.0 \%$ de arena zarandeada.

$X_4 = 0.7\%$ de filler.

Tabla 42

Combinación teórica de agregados para el huso granulométrico MAC-1.

Tamiz	Abe- rtur- a (m m)	Piedra Chanc- ada	Arena Chanc- ada	Arena Zarande- ada	Ceme- nto	(%)	Observacio- nes
	%						MAC 1
Combinacion es		39.3	45	15	0.7	100	
3"	75.0 00						
2 1/2"	63.0 00						

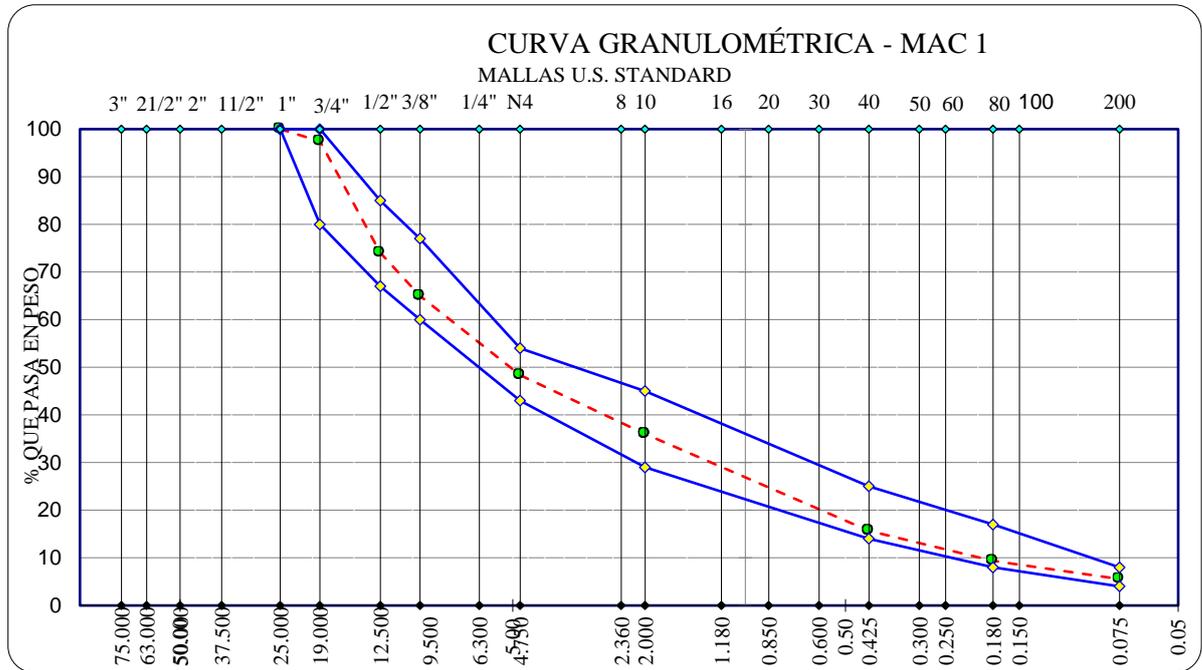


Tamiz	Abe rtur a (m m)	Piedra Chanc ada	Arena Chanc ada	Arena Zarande ada	Ceme nto	(%)	Observacio nes
							MAC 1
% Combinacion es		39.3	45	15	0.7	100	
2"	50.0 00						
1 1/2"	37.5 00						
1"	25.0 00	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100
3/4"	19.0 00	93.4	100.0	100.0	100.0	97.4	80 - 100
1/2"	12.5 00	33.9	100.0	100.0	100.0	74.0	67 - 85
3/8"	9.50 0	10.9	100.0	100.0	100.0	65.0	60 - 77
1/4"	6.30 0						
No4	4.75 0	0.1	77.2	85.7	100.0	48.3	43 - 54
No8	2.36 0						
No10	2.00 0		50.0	85.2	100.0	36.0	29 - 45
No16	1.18 0						
No20	0.85 0						% 51. Grava: 7
No30	0.60 0						% 42. Arena: 8
No40	0.42 5		20.9	37.1	100.0	15.7	14 - 25 % Fino: 5.6
No50	0.30 0						
No60	0.25 0						
No80	0.18 0		14.8	13.4	99.5	9.4	8 - 17
No100	0.15 0						
No200	0.07 5		8.2	7.8	98.6	5.6	4 - 8
PASA							

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 26

Curva granulométrica de la combinación teórica de los agregados incluyendo filler (huso MAC-1).



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 43

Huso granulométrico MAC-1.

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.0 4)	43-54	51-68	65-87
2,00 mm (N .0 10)	29-45	38-52	43-61
425 µm (N.0 40)	14-25	17-28	16-29
180 µm (N.0 80)	8-17	8- 17	9-19
75 µm (N.0 200)	4-8	4-8	5-10

Fuente: (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013).



De la combinación teórica de los agregados para alcanzar el huso granulométrico MAC-1, se obtuvo lo siguiente: 39.3 % de piedra chancada, 45.0 % de arena chancada, 15.0 % de arena zarandeada y 0.7 % de cemento portland tipo IP (tabla 42).

3.6.1.2.2 Ensayo de desgaste por abrasión e impacto (Abrasión los ángeles)

Este ensayo se realizó con base en la ASTM C131/ C131M-14

- **Equipo Utilizado**

- Balanza de 5000 g de capacidad y de 1g de precisión
- Juego de tamices (N° 1", 3/4", 1/2", 3/8", N°4, N° 8)
- Máquina los ángeles que cumplen con las especificaciones de la ASTM C131/C131M-14
- Esferas de carga según la norma
- Recipientes resistentes a altas temperaturas.
- Horno de secado, ventilado y controlado por termostato capaz de mantener temperatura uniforme de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

- **Procedimiento**

- Para este ensayo se seleccionó muestra de acuerdo a la ASTM D75 y la reducimos hasta el tamaño de la muestra según la ASTM C702
- De acuerdo a su granulometría se observó que teníamos pasante de la malla 1" y retenido en la malla N° 4, el método A nos indica que para cada pasante y cada retenido debemos tener cantidades iguales de material hasta que sumen $5000 \pm 10\text{g}$, pero en nuestra muestra no tenemos retenido en la malla 1" así que dividimos los $5000 \pm 10\text{g}$ en los pasantes y retenido que tenemos, es decir, en cada pasante y retenido 1666.6 g.



- Ya obtenido el material lavamos la muestra y dejamos secar en un horno a $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar la masa constante.
- También para este método la norma nos indica el tamaño de las esferas de carga y el peso que debe tener que son 12 esferas que sumen 5000g ± 25 g.
- Se introdujo la muestra seca y las esferas de carga en la máquina de los ángeles, tapamos bien y encendemos la máquina, programando a 100 revoluciones inicialmente (30-33 rev/min).
- Culminada las 100 revoluciones extraemos la muestra y la tamizamos por la malla N° 12 y pesamos el retenido, esto de acuerdo a la norma para obtener la uniformidad del material.
- Se introdujo todo el material nuevamente en la máquina de los ángeles y programamos 400 revoluciones.
- Ya terminada todas las revoluciones extraemos nuevamente la muestra y tamizamos en el tamiz N° 12 lavamos y dejamos secar en el horno a $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$
- Una vez obtenido el material seco se tomó registro de la masa de todo el material retenido en este tamiz.

Figura 27

Ensayo de desgaste por abrasión.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

- **Resultados**

Los resultados se muestran en la tabla 44:

Tabla 44

Resultados del ensayo de desgaste por abrasión e impacto.

Ensayo desgaste por abrasión	Resultados
Masa inicial lavada y seca	5000
Masa seca a las 100 revoluciones	4866
Masa final lavada y seca a las 500 revoluciones	4185
Uniformidad	0.16
Abrasión	16.3%
<i>Gradación de la muestra</i>	A
<i>TMN del agregado</i>	3/4 in

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 44 se obtuvo que el resultado de desgaste por abrasión fue de 16.30 %, el cual se encuentra dentro de los parámetros solicitados por la EG-2013 en la sección 423 (abrasión los Ángeles 35.00 % máximo).



3.6.1.2.3 *Ensayo de equivalente de arena*

Este ensayo se realizó con base en la ASTM D2419-14

- **Equipo Utilizado**

- Cilindro de plástico transparente graduado con tapón de goma, tubo irrigador, conjunto de sifón, conjunto de pie pesado.
- Medidor de estaño
- Embudo
- Botella de trabajo de 1 gln para almacenar solución de trabajo (solución stock)
- Bandeja plana para mezclar el material
- Cronómetro
- Tamiz N° 04
- Solución Stock
- Balanza de 500 g de capacidad y de 0.01g de precisión

- **Procedimiento**

- Se obtuvo 1500 g de agregado fino pasante de la malla N° 04, y la vertimos en una bandeja para su posterior uso.
- Se preparó el cilindro de plástico sobre una superficie estable libre de vibraciones.
- Montamos el conjunto de sifón desde la botella de trabajo que contiene la solución stock hasta el cilindro de plástico.
- Se sopló en el agujero libre del tapón de la botella que contiene la solución stock para iniciar el proceso del sifón, añadimos solución stock hasta una medida conocida en el cilindro de plástico.



- Sobre la bandeja de trabajo y con el medidor de estaño se sacó una muestra, y golpeamos suavemente la base, enrasamos ligeramente por encima del borde del medidor.
- Se tomó registro de la masa de la muestra más el medidor de estaño.
- Seguidamente con la ayuda de un embudo se introdujo la muestra en el cilindro de plástico dando golpes a la base para liberar las burbujas de aire.
- Se dejó vertical e intacto por 10 minutos.
- Culminado este tiempo se realizó el agitado manual, 90 ciclos por aproximadamente 30s, en una distancia de 23 ± 3 cm, (un ciclo es un movimiento completo de ida y vuelta).
- Se retiró la tapa de goma e insertamos el tubo irrigador y enjuagamos las paredes del cilindro con este tubo desde arriba hacia abajo hasta dejar todas las paredes libres de muestra.
- Se forzó el tubo irrigador a través de la muestra hasta el fondo del cilindro para evitar que el material fino quede en suspensión por encima de las partículas más gruesas.
- Se tapó el cilindro con la tapa de goma, y dejamos reposando por 25 minutos y verificamos si el material más fino quedó en suspensión.
- Se observó que el material más fino si se suspendió en la parte superior, así que tomamos la medida de la altura de este.
- Se introdujo el pie pesado (varilla para medir altura, con una base de disco) hasta que este toque la muestra y tomamos lectura de la altura a la que se encuentra en ensamblaje (indicador, ubicado exactamente de 10 cm de la base del pie pesado) del pie pesado.

Figura 28

Ensayo de equivalente arena.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

- **Resultados**

Los resultados se muestran en la tabla 45:

Tabla 45

Resultados del ensayo de equivalente de arena.

EQUIVALENTE DE ARENA ASTM D2419		
Ítem	Descripción	Ensayos
1	Tamaño Máximo	No. 4
2	Muestra N°	1
3	Hora de Entrada a saturación	11:55
4	Hora de Salida de saturación	12:05
Irrigación		
5	Hora de Entrada a reposo	12:07
6	Hora de Salida de reposo	12:27
7	Altura Máxima de Material Fino (cm)	10.88
8	Altura Máxima de la Arena (cm)	9.51
9	Equivalente de Arena (%)	88.0
10	Equivalente de Arena Promedio (%)	88.0

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.



Se tiene como resultado una equivalente arena del 88.00 %, el cual se interpreta como que el 88.00 % de la muestra ensayada corresponde a arena y el resto a materiales finos.

3.6.1.2.4 *Ensayo de partículas chatas y alargadas*

Este ensayo se realizó con base en la ASTM D4791 – 10

- **Equipo Utilizado**

- Dispositivo calibrador
- Balanza de 1000 g de capacidad y de 1g de precisión
- Recipientes para muestras resistentes a altas temperaturas.
- Horno de secado, ventilado y controlado por termostato capaz de mantener temperatura uniforme de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

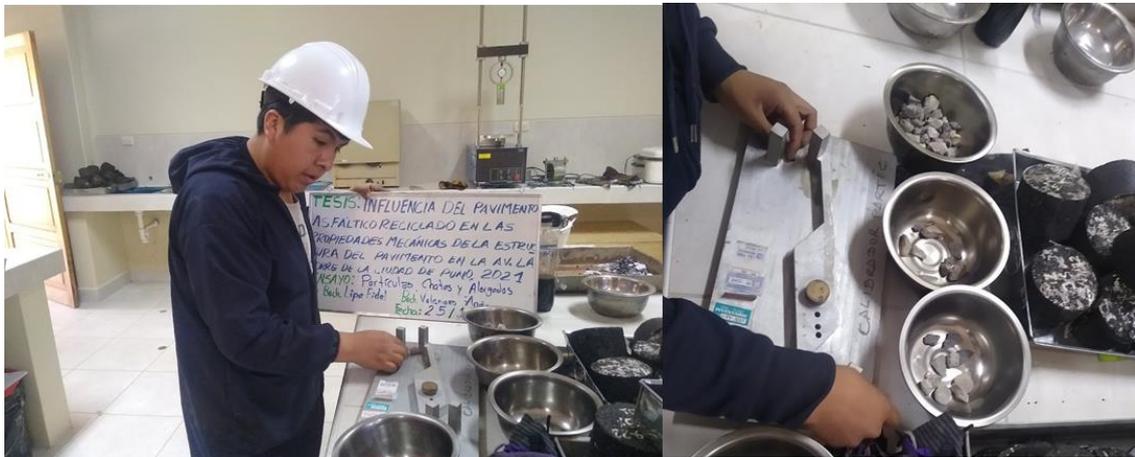
- **Procedimiento**

- Como indica la norma se seleccionó 4 kg de muestra.
- También nos indica el método por número de partículas y se obtuvo 100 partículas de agregados retenido en la malla N° 4.
- Para mayor precisión también se registró la masa de los agregados
- Con el aparato calibrador se sometió a cada partícula a dos tipos de ensayo para determinar si la partícula es chata, alargada o ninguna de las dos.
- Se tomó la partícula y definimos su longitud, ancho y espesor
- Ensayo de partículas chatas: se ajustó la abertura entre el brazo mayor y el poste, al ancho de las partículas. Se determinó que la partícula es chata si su espesor pasaba por la abertura menor

- Ensayo de partícula Alargada: Se ajustó la abertura mayor a la longitud de la partícula. Se determinó que la partícula es alargada si su ancho pasaba por la abertura menor,
- Se clasificó cada partícula y se separó en un recipiente.
- Se realizó el conteo del total de las partículas de cada tipo (chatas, alargada o ninguna de las dos), también en este caso registramos la masa.

Figura 29

Ensayo de partículas chatas y alargadas.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

- **Resultados**

Los resultados se muestran en la tabla 46:

Tabla 46

Resultados del ensayo de partículas chatas y alargadas por peso.

TAMIZ (Pulg.)	ABERTURA (mm)	AGREGADO GRUESO		Masa de partículas Chatas	Masa de partículas Alargadas	CHATAS y ALARGADAS (2:1)		
		Masa Retenida Grad. Original	% Retenido			Σ	(%)	(%) CORREGIDO
2"	50.800		0.0			0.00	-	



TAMIZ (Pulg.)	ABERTURA (mm)	AGREGADO GRUESO		Masa de partículas Chatas	Masa de partículas Alargadas	Masa de partículas Chatas y Alargadas	CHATAS y ALARGADAS (2:1)		
		Masa Retenida Grad. Original	% Retenido				Σ	(%)	(%) CORREGIDO
1 1/2"	38.100		0.0			0.00	-	-	
1"	25.400	412.37	10.0	56.40		56.40	13.7	1.4	
3/4"	19.000	771.20	18.6	23.00	12.60	35.60	4.6	0.9	
1/2"	12.700	602.60	14.6	36.40		36.40	6.0	0.9	
3/8"	9.500	927.27	22.4		5.20	5.20	0.6	0.1	
N° 4	4.750	1427.26	34.5			0.00	-	-	
PESO TOTAL DE LA MUESTRA:		4140.7							
PARTÍCULAS CHATAS Y ALARGADAS EN MASA (%)						3.2			

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 47

Resultados del ensayo de partículas chatas y alargadas por conteo.

TAMIZ (Pulg.)	ABERTURA (mm)	AGREGADO GRUESO		N° de partículas Chatas	N° de partículas Alargadas	N° de partículas Chatas y Alargadas	CHATAS y ALARGADAS (2:1)		
		Cantidad de partículas G. Or	% Retenido				Σ	(%)	(%) CORREGIDO
2"	50.800		0.0			0	-	-	
1 1/2"	38.100		0.0			0	-	-	
1"	25.400	24	0.6		1	1	4.2	0.0	
3/4"	19.000	125	3.0	6		6	12	9.6	
1/2"	12.700	215	5.2	12		12	5.6	0.3	
3/8"	9.500	784	18.9		3	3	0.4	0.1	



TAMIZ (Pulg.)	ABERTUR A (mm)	AGREGADO GRUESO		N° de partícu las Chata s	N° de partícu las Alarg adas	N° de partícu las Chatas y Alargad as	CHATAS y ALARGADAS (2:1)		
		Cantid ad de partícu las G. Or	% Reteni do				Σ	(%)	(%) CORRE GIDO
N° 4	4.750	452	10.9				0	-	-
PESO TOTAL DE LA MUESTRA:		1600							
PARTÍCULAS CHATAS Y ALARGADAS POR CONTEO (%)						0.7			

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Se obtiene como resultado del ensayo de partículas chatas y alargadas por masa 3.2 % y por conteo 0.7 %, el cual se encuentra dentro de los parámetros de la EG-2013 que solicita un máximo de 10.0 %.

3.6.1.2.5 Ensayo de Índice de plasticidad del material que pasa el tamiz No 200 y No 40

Este ensayo se realizó con base en la ASTM D4318-17

- **Equipo Utilizado**

- Tamiz N° 40 y 200.
- Balanza de 1000 g de capacidad con precisión de 0.01 g
- Recipientes resistentes a altas temperaturas.
- Horno de secado, ventilado y controlado por termostato capaz de mantener temperatura uniforme de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Kit completo de “Cuchara de Casagrande”.
- Platina lisa de vidrio que no absorbe humedad.
- Espátula metálica.



- **Procedimiento**

- Se tomó una muestra representativa del suelo de acuerdo a la ASTM 4220.
- Se tamizó esta muestra por el tamiz N° 200
- Seguidamente se le añadió agua y se revuelve con la espátula, dejando saturar durante por lo menos 8 horas (el contenedor fue cubierto por un material impermeable), esto con el fin que se consiga una saturación higroscópica total de la muestra.
- Para el límite líquido se removió la muestra de suelo, con una espátula colocamos una porción de muestra preparado en la cuchara del dispositivo de límite líquido en el punto donde la cuchara descansa, sobre la base, se presionó y extendió a una profundidad aproximadamente de 10 mm.
- Se formó una ranura en la superficie de la muestra utilizando el ranurador con el borde biselado hacia afuera, en una línea que une el punto más bajo con el punto más alto.
- Se giró la manija para hacer que la cuchara golpee la base a una velocidad de 1.9 a 2.1 golpes por segundo hasta que las dos mitades separadas por la ranura entren en contacto en la parte inferior a lo largo de una distancia de 13mm.
- En este caso la muestra ensayada no tuvo límite líquido debido a que la ranura se cerraba a menos de 5 golpes a pesar de que se intentó realizar con diferentes contenidos de humedad.
- Para el límite plástico se utilizó la misma muestra que en el límite líquido

- Se tomó una muestra entre 1.5g y 2g y se formó una masa elipsoidal.
- Se hizo pequeños rollos sobre la placa de vidrio con la palma de la mano hasta conseguir un diámetro uniforme de 3.2 mm en toda su longitud.
- A este diámetro se fracturó la muestra así que se registró su masa.
- Las muestras se dejaron secando en un horno a $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$ hasta alcanzar una masa constante.
- Se dejó enfriar a temperatura ambiente y se tomó lectura de su masa, para así obtener el contenido de humedad que tenía.

Figura 30

Ensayos para determinar el índice plástico.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

- **Resultados**

Los resultados se muestran en la tabla 48:

Tabla 48

Resultado del ensayo de límite líquido para pasante de la malla No 40 y No 200.

Límite Líquido					
Pasante	No 40	No 40	No 200	No 200	PROMEDIO
TARRO + SUELO HÚMEDO (G)					
TARRO + SUELO SECO (g)					
AGUA (g)					
PESO DEL TARRO (g)					
PESO DEL SUELO SECO (g)					
% DE HUMEDAD (g)					
Nº DE GOLPES	4	5	7	8	NO PRESENTA

LÍMITE PLÁSTICO					
PASANTE	No 40	No 40	No 200	No 200	PROMEDIO
TARRO + SUELO HÚMEDO	37.63		29.98		
TARRO + SUELO SECO	36.31		29.64		
AGUA	1.32		0.34		
PESO DEL TARRO	28.07		27.83		
PESO DEL SUELO SECO	8.24		1.81		
% DE HUMEDAD	16.02		18.785		

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Se obtuvo como límite plástico NP (no presenta), debido a que en ambos casos en la cuchara de Casagrande la ranura se cierra a los 8 golpes como máximo y como límite líquido para material pasante de la malla No 40 y retenido en la malla No 200 16.02 % y para el material pasante de la malla No 200 18.8 %. Por lo tanto, el índice plástico nos resulta NP (no presenta) debido a que se trata de un material grava arenosa.

3.6.1.2.6 Ensayo de partículas con caras fracturadas

Este ensayo se realizó con base en la ASTM D5821-13

- **Equipo Utilizado**

- Balanza de 1000 g de capacidad y de 0.01g de precisión
- Recipientes resistentes a altas temperaturas.
- Tamiz 1", 3/4", 1/2", 3/8" y N° 04.

- **Procedimiento**

- Se separó 3000 g de muestra retenida en la malla N° 04, para nuestro tamaño máximo nominal de 3/4" de acuerdo a la tabla de la ASTM D5821-13.
- Se lavó la muestra sobre el tamiz N° 04 y dejamos secar sobre una superficie limpia hasta obtener masa constante.
- Se registró la masa inicial.
- Se verifica cada partícula para ver si cumple con los criterios de fractura.
- Se separó en dos categorías, partículas que cumplen con los criterios de fractura y las que no, inicialmente tomamos el criterio de una cara fracturada, seguidamente con la misma muestra se repite en el ensayo con el criterio de dos caras fracturadas.
- Se registró las masas de cada categoría seleccionada.

Figura 31

Ensayo de partículas con 01 y 02 caras fracturadas.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

- **Resultados**

Los resultados se muestran en la tabla 49:

Tabla 49

Resultados del ensayo de caras fracturadas - una cara fracturada.

A- CON UNA CARA FRACTURADAS						
TAMAÑO DEL AGREGADO		A	B	C	D	E
PASA TAMIZ	RETENIDO EN TAMIZ	(g)	(g)	((B/A)*100)	% Retenido	C*D
1"	3/4"	1500.0	1497.2	99.8	6.6	658.8
3/4"	1/2"	1200.0	1198.6	99.9	59.5	5,943.1
1/2"	3/8"	300.0	299.1	99.7	23.0	2,293.1
TOTAL		3000.0	2994.9			
PORCENTAJE CON UNA CARA FRACTURADA		TOTAL, E		8895		%
				=		99.8
		TOTAL, D		89.10		

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Como resultado en la tabla 49 se obtuvo que el 99.8 % tienen al menos una cara fracturada.

Tabla 50

Resultados del ensayo de caras fracturadas - dos caras fracturadas.

B- CON DOS CARAS FRACTURADAS						
TAMAÑO DEL AGREGADO		A	B	C	D	E
PASA TAMIZ	RETENIDO EN TAMIZ	(g)	(g)	((B/A)*100)	% Retenido	C*D
1"	3/4"	1500.0	1364.9	91.0	6.6	600.6
3/4"	1/2"	1200.0	1162.4	96.9	59.5	5,763.6
1/2"	3/8"	300.0	264.9	88.3	23.0	2,030.9
TOTAL		3000.0	2792.2			
PORCENTAJE CON DOS CARAS FRACTURADAS		TOTAL, E		8395		%
				=		94.2
		TOTAL, D		89.10		

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.



Como resultado en la tabla 50 se obtuvo que el 94.0% tienen al menos dos caras fracturadas.

3.6.1.2.7 Ensayo de Revestimientos y desprendimiento de mezclas agregado - Bitumen

Este ensayo se realizó con base en la AASHTO T -182

- **Equipo Utilizado**

- Balanza de 1000 g de capacidad y de 0.01g de precisión
- Recipiente transparente de 500ml
- Agua destilada
- Horno de secado, ventilado y controlado por termostato capaz de mantener temperatura uniforme de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Recipientes resistentes a altas temperaturas.
- Espátula metálica

- **Procedimiento**

- Se obtuvo la muestra retenida entre los tamices 3/8" y 1/4", aproximadamente 100g.
- Se lavó con agua destilada y dejamos secar en el horno hasta alcanzar masa constante.
- Se calentó 5g de asfalto, y a 140°C mezclamos con nuestros agregados.
- Se dejó en el horno durante 2 horas a 60°C .
- Pasado este tiempo se introdujo la muestra en el recipiente transparente de 500ml e inmediatamente añadimos 400ml de agua destilada a 25°C .

- Se dejó reposando 18 horas y pasamos a realizar la inspección visual.
- Se verifico que no se desprendió ni una película de asfalto de las partículas.

- **Resultados**

Los resultados se muestran en la tabla 51:

Tabla 51

Resultados del ensayo de desprendimiento de cemento asfáltico.

ENSAYO DE DESPRENDIMIENTO DE ASFALTO	
PASANTE 3/8" y RETENIDO EN 1/4" (gr)	100
PEN 120/150 (gr)	5.00
Peso final (gr)	105.00
Peso desprendido (gr)	105.00
Desprendimiento visual	NO PRESENTA

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

3.6.1.2.8 *Ensayo de Valor Azul de Metileno*

Este ensayo se realizó con base en la AASHTO T -330

- **Equipo Utilizado**

- Balanza de 1000 g de capacidad y de 0.01g de precisión
- Agua destilada
- Recipientes resistentes altas temperaturas.
- Tamiz N° 200
- Probeta de medidas conocidas
- Pipeta
- Reactivo: Azul de metileno
- Papel filtro

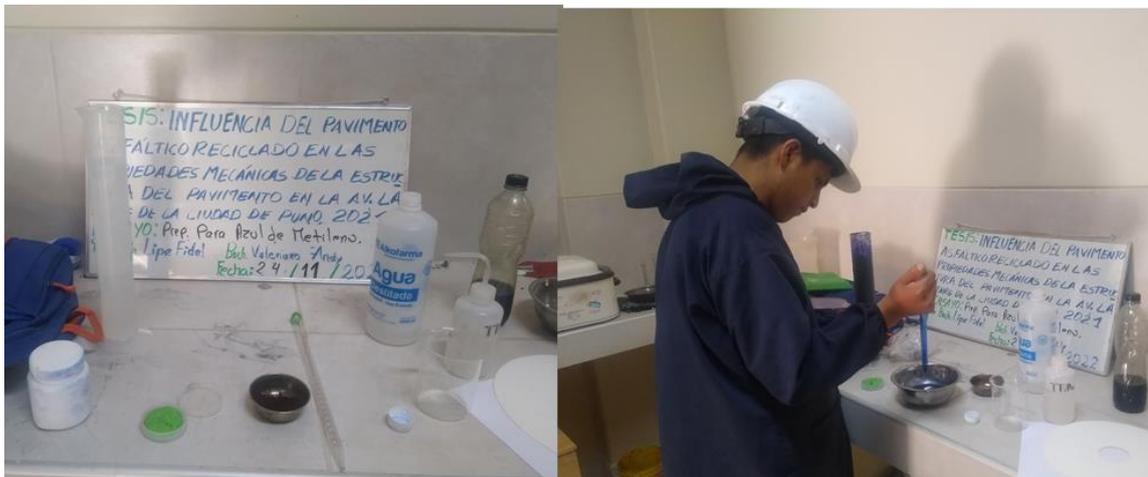
- **Procedimiento**

- Se obtuvo muestra pasante del tamiz N° 200, aproximadamente 100g.

- Se dejó saturando durante 18 horas con agua destilada en un envase con la capacidad requerida.
- Se preparó solución de azul de metileno en una proporción de 1 litro de agua destilada con 10 gramos de azul de metileno.
- En la pipeta se llenó cada 5 cm³ de reactivo y añadimos a la muestra,
- Se colocó la muestra sobre el vibrador eléctrico para que remueva.
- Con el pico de la pipeta se colocó una pequeña muestra y colocamos sobre el papel filtro Whatman y observamos la figura que forma.
- Así sucesivamente añadimos 5 cm³ de reactivo hasta que la muestra dejada en el papel filtro Whatman forme un círculo casi perfecto (sin derrames).
- Se tomó registro de la cantidad de reactivo que fue utilizado para llegar a esta forma.

Figura 32

Ensayo de azul de metileno.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

- **Resultados**

Los resultados se muestran en la tabla 52:

Tabla 52*Resultados del ensayo de azul de metileno.*

ENSAYO	Nº	1	2	ESPECIFICACIÓN
Cantidad de solución	g	14.1	14.2	FÓRMULA:
Peso del material fino	g	5.200	5.100	
VALOR AZUL DE METILENO	mg/g	2.7	2.8	
PROMEDIO	mg/g	2.7		$AM = C_{sol} / P_{finos}$ —

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Del ensayo realizado de azul de metileno se tuvo un promedio 2.7 mg/g, el cual se encuentra dentro de lo requerido por la EG-2013 que nos solicita un 10 mg/g de azul de metileno como máximo.

3.6.1.2.9 Ensayo de Densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregado grueso.

Este ensayo se realizó con base en la ASTM C127-15

- **Equipo Utilizado**

- Balanza de 5000 g de capacidad y de 0.01g de precisión
- Agua a 25°C
- Cesta de alambre que no retiene agua.
- Horno de secado, ventilado y controlado por termostato capaz de mantener temperatura uniforme de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

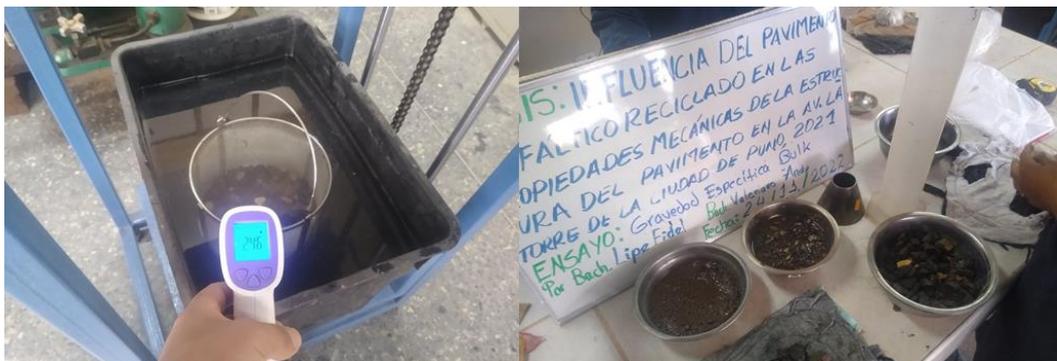
- **Procedimiento**

- Se obtuvo muestra 3 kg de muestra de acuerdo a la norma con el tamaño máximo nominal que tenemos (3/4")

- Se dejó saturando durante 24 horas con agua en un envase
- Pasado este tiempo se sacó las partículas con un paño hasta que tenga un color mate y no tenga brillo. Tomamos registro de su masa para calcular la masa Saturada superficialmente seco.
- Con ayuda de la balanza y la cesta de alambre se registró la masa sumergida a 25 °.
- Seguidamente se dejó secando en un horno a 110° hasta alcanzar masa constante y anotamos su masa.

Figura 33

Ensayo para determinar peso específico del agregado grueso.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

- **Resultados**

Los resultados se muestran en la tabla 53:

Tabla 53

Resultados del ensayo de gravedad específica y absorción de piedra chancada TMN 3/4".

DATOS		A	B
1	Peso de la muestra sss	1079.1	1080.0
2	Peso de la muestra sss sumergida	660.0	661.0
3	Peso de la muestra secada al horno	1051.1	1051.0

RESULTADOS	1	2	PROMEDIO
PESO ESPECIFICO DE MASA	2.508	2.508	2.508
PESO ESPECIFICO DE MASA S.S.S.	2.575	2.578	2.576
PESO ESPECIFICO APARENTE	2.687	2.695	2.691
PORCENTAJE DE ABSORCIÓN (%)	2.7	2.8	2.7

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Del ensayo realizado se obtiene que el peso específico es 2.508 gr/cm³ y la absorción es de 2.7 %, el cual se justifica que está dentro de los rangos de calidad debido a que tiene una alta durabilidad (ensayo de desgaste por abrasión es de 16.3 %).

3.6.1.2.10 Ensayo de Gravedad específica y absorción de agregado fino.

Este ensayo se realizó con base en la ASTM C128 - 15

- **Equipo Utilizado**

- Balanza de 5000 g de capacidad y de 0.01g de precisión
- Fiola.
- Cono de absorción y pisón
- Horno de secado, ventilado y controlado por termostato capaz de mantener temperatura uniforme de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Recipientes para muestras resistentes al cambio de temperatura.
- Paños limpios

- **Procedimiento**

- Se obtuvo 1 kg de muestra, la dejamos secando en un horno a 110°C hasta alcanzar masa constante.
- Se agregó agua y dejamos saturando por 24 h.
- Pasado este tiempo se quitó el agua excedente y colocamos sobre una placa de vidrio y dejamos secar ligeramente, aplicamos la prueba del cono de absorción.
- Se dejó secando hasta que la prueba del cono de absorción tenga un contenido de humedad deseado, para seguidamente registrar su masa.
- En una Fiola se llenó agua a 25° hasta una medida conocida y anotamos su masa.
- Seguidamente se introdujo la muestra en la Fiola con agua hasta la medida conocida y también registramos su masa.
- Este procedimiento se realizó tanto como para la arena chancada y la arena zarandeada.

Figura 34

Ensayo para determinar peso específico del agregado fino.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

- **Resultados**

Los resultados se muestran en las tablas 54 y 55:

Tabla 54*Resultados del peso específico y absorción de la arena chancada.*

IDENTIFICACIÓN		1	2	PROMEDIO
A	Peso Mat. Sat. Sup. Seca (SSS)	440.4	445.0	
B	Peso Frasco + agua	997.0	1002.0	
C	Peso Frasco + agua + muestra SSS	1268.0	1273.0	
D	Peso del Mat. Seco	431.0	443.0	
Pe Bulk (Base seca) o Peso específico de masa = $D/(B+A-C)$		2.544	2.546	2.545
Pe Bulk (Base Saturada) o Peso específico SSS = $A/(B+A-C)$		2.600	2.557	2.579
Pe Aparente (Base seca) o Peso específico aparente = $D/(B+D-C)$		2.694	2.576	2.635
% Absorción = $100*((A-D)/D)$		2.2	0.5	1.3

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

El peso específico de la arena chancada es de 2.545 gr/cm³ y la absorción es de 1.3 %.

Tabla 55*Resultados del peso específico y absorción de la arena zarandeada.*

IDENTIFICACIÓN		1	2	Promedio
A	Peso Mat. Sat. Sup. Seca (SSS)	389.2	390.3	
B	Peso Frasco + agua	994.0	995.1	
C	Peso Frasco + agua + muestra SSS	1230.0	1231.4	
D	Peso del Mat. Seco	384.7	386.7	
Pe Bulk (Base seca) o Peso específico de masa = $D/(B+A-C)$		2.511	2.511	2.511
Pe Bulk (Base Saturada) o Peso específico SSS = $A/(B+A-C)$		2.540	2.534	2.537
Pe Aparente (Base seca) o Peso específico aparente = $D/(B+D-C)$		2.587	2.571	2.579
% Absorción = $100*((A-D)/D)$		1.2	0.9	1.1

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

El peso específico de la arena zarandeada es de 2.511 gr/cm³ y la absorción es de 1.1 %.



3.6.1.2.11 Diseño de Mezcla asfáltica en Caliente por el método Marshall con materiales vírgenes

a) Elaboración de muestras de mezclas asfálticas utilizando aparato Marshall

Este ensayo se realizó con base en la ASTM D6926-20

- **Equipo Utilizado**

- Molde (cilindro de molde, placas base y collar de extensión)
- Extractor de muestras
- Martillo de compactación
- Pedestal de compactación
- Soporte para moldes de muestras
- Horno capaz de mantener temperatura a 150°C
- Aparato de mezcla (espátula de acero con mango de madera)
- Recipientes para calentar agregados
- Recipientes para calentar asfalto
- Termómetro electrónico
- Balanza de 5000 g de capacidad y 1g de precisión
- Guantes de cuero
- Marcadores
- Pala para dosificar las muestras
- Cuchara grande para colocar la muestra dentro de los moldes
- Cocina a gas.



- **Procedimiento**

- Se combinó los agregados de acuerdo a la dosificación hallada, entre piedra chancada, arena chancada y arena zarandeada y filler y dejamos secar a 110° C hasta alcanzar masa constate.
- Se calentó la mezcla de agregados y el asfalto de acuerdo a la temperatura indicada por el proveedor para alcanzar la viscosidad indicada, para nuestro caso 150°C.
- Alcanzada la temperatura de mezcla se removió los agregados por 5 segundos, formamos un cráter en el centro de la muestra y se vertió el asfalto requerido sobre ella, inmediatamente se pasó el recipiente sobre una cocina a gas para mantener la temperatura de mezclado, esto fue controlado en todo momento por un termómetro electrónico, se mezcló los agregados con el asfalto durante 60 segundos hasta que el asfalto cubrió por completo todos los agregados.
- Se montó el molde sobre el pedestal (previamente calentado a la temperatura de mezclado) y se limpió la base del molde y se introdujo un papel no absorbente cortado a medida.
- Se introdujo la muestra con un cucharón y esparcimos con una espátula caliente 15 veces por el perímetro y 10 veces por el interior.
- Se colocó otro pedazo de papel no absorbente por encima de la mezcla.
- Se comenzó con la compactación a 75 golpes, repitiendo esto para la otra cara de la briqueta.
- Se retiró el molde del pedestal y dejamos enfriar a una a temperatura ambiente, así evitar daños y extraemos la muestra del molde.

- Una vez extraída la muestra del molde, se dejó en una bandeja limpia y lisa para evitar daños.
- Este procedimiento se realizó para cada muestra a diferentes contenidos de asfalto, pero con la misma dosificación de los agregados. Esto para hallar el contenido óptimo de asfalto.

Figura 35

Elaboración de briquetas de 4 plg de diámetro por el método Marshall.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

b) Ensayo para la densidad y gravedad específica de mezclas bituminosas compactadas

Este ensayo se realizó con base en la ASTM D2726/D2726M-19

• Equipo Utilizado

- Balanza de 5000 g de capacidad y 1g de precisión
- Agua a 25 °C
- Termómetro de inmersión

• Procedimiento

- Se tomó la muestra elaborada en laboratorio a temperatura ambiente y registramos su masa (masa seca)

- Luego se sumergió la muestra en un recipiente a 25° C y registramos la masa sumergida.
- Inmediatamente después se extrajo la muestra y secamos superficialmente con un paño y registramos nuevamente su masa. (masa saturada superficialmente seca).

Figura 36

Determinación de gravedad Bulk de los especímenes de mezcla asfáltica en caliente compactados.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

c) Ensayo para la densidad y gravedad específica máxima teórica de mezclas bituminosa (RICE)

Este ensayo se realizó con base en la ASTM D2041/D2041M-19

• Equipo Utilizado

- Kit de equipo Rice (recipiente de vacío, Matraz de vacío, Bomba de vacío, vibrador).
- Termómetro
- Balanza de 5000 g de capacidad y 1g de precisión
- Baño de agua capaz de mantener la temperatura del agua a 25 °C.



- **Procedimiento**

- Se tomó una muestra elaborada para una briqueta tal como se indica líneas arriba en el ensayo de “Elaboración de muestras de mezclas asfálticas utilizando un aparato Marshall” pero esta vez sin compactar.
- Luego de mezclado los agregados con el asfalto se dejaron enfriar a temperatura ambiente, removiendo casualmente para que esta mezcla no se adhiriera entre sí.
- Se registró la masa del recipiente de vacío, seguidamente añadimos la muestra y tomamos registro del recipiente con la muestra.
- Se añadió agua a 25°C hasta cubrir por completo la muestra.
- Se colocó la tapa (matraz de vacío) al recipiente y aseguramos sobre el vibrador.
- Se ensambló el kit Rice, (manguera de un motor de vacío a la trampa y de ella a la tapa matraz de vacío).
- Se encendió los equipos y calibramos el motor de vacío para que alcance la presión de 30 mm de Hg en 2 minutos, y dejamos que se extraigan los vacíos durante 15 minutos.
- Terminado este tiempo, se retiró el recipiente y se completó con agua a 25°C hasta llegar a la marca del recipiente y registramos su masa.
- Esta misma muestra, la sumergimos en agua a 25°C durante 10 minutos y anotamos la masa sumergida.

Figura 37

Ensayo para determinación de peso específico máximo teórico (RICE).



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

- **Resultados**

Los resultados se muestran en la tabla 56:

Tabla 56

Resultados del peso específico máximo (RICE) para los diferentes porcentajes de cemento asfáltico.

Porcentaje de Cemento asfáltico		5.50%		6.00%		6.50%		7.00%		
Identificación muestra	Und	01	02	01	02	01	02	01	02	
1.-	Peso del frasco	gr.	1255	1271	1280	1290	1251	1272	1255.0	1256.0
2.-	Peso agua + frasco	gr.	1816	1816	1816	1816	1816	1816	1816.0	1816.0
3.-	Peso agua + frasco + material	gr.	2547	2555	2559	2567	2538	2552.5	2535.0	2536.0
4.-	Volumen	gr.	524	532	537	539	529	535.5	536.0	536.0
	Peso Específico Máximo MAC, g/cm³	gr./cm ³	2.395	2.389	2.384	2.393	2.365	2.375	2.341	2.343
	Promedio		2.392		2.388		2.370		2.342	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 56 se muestra los resultados de los pesos específicos máximos con los diferentes porcentajes de asfalto añadidos (al 5.5 %, 6.0 %, 6.5 % y 7.0 % en peso de los

agregados) a la combinación de agregados, para obtener un óptimo contenido de asfalto (diseño de mezcla asfáltica en caliente MAC-1).

Tabla 57

Resultado de peso específico máximo teórico para contenido óptimo de asfalto 5.9%.

Identificación muestra		Und	01	02
1.-	Peso del frasco	gr.	1215.0	1230.0
2.-	Peso agua + frasco	gr.	1816.0	1816.0
3.-	Peso agua + frasco + material	gr.	2522.0	2532.0
4.-	Volumen	gr.	509.0	514.0
Peso Específico Máximo MAC, g/cm³		gr./cm ³	2.387	2.393
		Promedio	2.390	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 57 se muestra que el peso específico máximo (RICE), para un contenido óptimo de asfalto al 5.9 % de peso de los agregados, es de 2.390 gr/cm³.

d) Ensayo de prueba estándar para la estabilidad y el flujo de Marshall

Este ensayo se realizó con base en la ASTM D6927-15

- **Equipo Utilizado**

- Cabezal de rotura Marshall
- Máquina de compresión Marshall
- Dispositivo de medición de carga
- Deformímetro
- Baño maría capaz de mantener temperatura de agua a 60°C
- Horno de secado, controlado por termostato capaz de mantener temperatura entre 20-40C°.



- **Procedimiento**

- Se registró las alturas de las muestras de sección circular.
- Las muestras anteriormente preparadas (compactadas) se sometieron a baño maría por un tiempo entre 40 minutos, a 60°C. Esto dentro de las 24h posteriores a su compactación.
- Los cabezales de rotura se calentaron en el horno entre 20-40°C.
- Preparamos la máquina de compresión.
- Se extrajo la muestra del baño maría y acomodamos en el cabezal de rotura, secando rápidamente con un paño la humedad excedente, todo esto en un tiempo no mayor a 30s.
- Se acomodó el cabezal de rotura con la muestra en la prensa y reiniciamos el dispositivo de medición de carga, así como el deformímetro sobre el cabezal de rotura.
- Se encendió la máquina de compresión a una velocidad de 50 mm/min hasta que el indicador de carga comience a disminuir o se detenga.
- Se tomó lectura del indicador del deformímetro.
- Este procedimiento se realizó para todas las muestras.

Figura 38

Ensayo de estabilidad y flujo Marshall.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

- **Resultados**

Los resultados se muestran en las tablas 58, 59, 60, 61 y 62:

Tabla 58

Resultado del diseño Marshall para 5.5% de cemento asfáltico en el MAC-1 patrón.

ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D6927-15 / MTC E 504						
PORCENTAJES DE DISEÑO		Lectura a dial	Lectura calibración	Flujo (0,01 mm)		
Piedra Chancada	39.3%					
Arena Chancada	45.0%	465	1545.18	350		
Arena Zarandeada	15.0%	400	1329.80	320		
Filler	0.7%	440	1462.42	370		
∑ Suma	100.0%					
C.A. (PEN)	120 - 150					
Número de Probetas		Nº	1	2	3	Promedio
1	% C.A. en peso de la Mezcla	%	5.50	5.50	5.50	
2	% de Piedra chancada en Peso de la Mezcla	%	37.14	37.14	37.14	
3	% de Arena Chancada en peso de la Mezcla	%	42.53	42.53	42.53	



**ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL
ASTM D6927-15 / MTC E 504**

4	% de Arena Zarandeada en peso de la Mezcla	%	14.18	14.18	14.18	
5	% de Filler en Peso de la Mezcla	%	0.66	0.66	0.66	
6	Peso Específico Aparente de C.A.	gr/cc.	1.015	1.015	1.015	
7	Peso Específico Piedra Chancada-Bullk	gr/cc.	2.508	2.508	2.508	
8	Peso Específico Arena Chancada-Bullk	gr/cc.	2.544	2.544	2.544	
9	Peso Específico Arena Zarandeada-Bullk	gr/cc.	2.511	2.511	2.511	
10	Peso Específico del filler-Aparente	gr/cc.	3.150	3.150	3.150	
11	Altura Promedio de la Probeta	cm.	6.57	6.40	6.55	
12	Peso de la briqueta en el Aire	gr.	1212.0	1208.0	1235.0	
13	Peso de la briqueta Saturada	gr.	1233.0	1241.0	1236.0	
14	Peso de la briqueta en el Agua	gr.	695.0	693.0	712.0	
15	Volumen de la briqueta por desplazamiento	c.c.	538.0	548.0	524.0	536.7
16	Peso Específico de la Probeta	gr/cc.	2.253	2.204	2.357	2.271
17	Peso Específico Máximo (Rice) ASTM D-2041	gr/cc.	2.392	2.392	2.392	
18	Peso Específico Máximo (Teórico)	gr/cc.	2.337	2.337	2.337	
19	% de Vacíos	%	5.8	7.8	1.5	5.0
20	Peso Específico Bullk del Agregado Total	gr/cc.	2.528	2.528	2.528	
21	% V.M.A. Vacíos del Agregado Mineral	%	15.8	17.6	11.9	15.1
22	% vacios llenados con C.A.	%	63.1	55.4	87.6	68.7
23	Peso Específico Efectivo del Agregado Total	gr/cc.	2.597	2.597	2.597	
24	C.A. Absorbido por el Peso del Agregado Total	%	1.07	1.07	1.07	
25	% de Asfalto Efectivo	%	4.43	4.43	4.43	
26	Flujo (0.01 pulg)	mm	8.89	8.13	9.40	8.81
27	Estabilidad sin corregir		1545	1330	1462	
28	Factor de Estabilidad		0.93	0.89	0.96	
29	Estabilidad corregida	kg.	1437	1184	1404	1341

**ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL
ASTM D6927-15 / MTC E 504**

30	Factor de Rigidez	kg/cm	4106	3699	3794	3870
31	Número de Golpes por Capa		75	75	75	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 59

Resultado del diseño Marshall para 6.0% de cemento asfáltico en el MAC-1 patrón.

**ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL
ASTM D6927-15 / MTC E 504**

PORCENTAJES DE DISEÑO		Lectura a dial	Lectura calibración	Flujo (0,01 mm)
Piedra Chancada	39.3%			
Arena Chancada	45.0%	275	913.73	350
Arena Zarandeada	15.0%	365	1213.55	390
Filler	0.7%	345	1147.03	390
∑ Suma	100.0%			
C.A. (PEN)	120 - 150			

Número de Probetas		Nº	1	2	3	Promedio
1	% C.A. en peso de la Mezcla	%	6.00	6.00	6.00	
2	% de Piedra chancada en Peso de la Mezcla	%	36.94	36.94	36.94	
3	% de Arena Chancada en peso de la Mezcla	%	42.30	42.30	42.30	
4	% de Arena Zarandeada en peso de la Mezcla	%	14.10	14.10	14.10	
5	% de Filler en Peso de la Mezcla	%	0.66	0.66	0.66	
6	Peso Específico Aparente de C.A.	gr/cc.	1.015	1.015	1.015	
7	Peso Específico Piedra Chancada-Bullk	gr/cc.	2.508	2.508	2.508	
8	Peso Específico Arena Chancada-Bullk	gr/cc.	2.544	2.544	2.544	
9	Peso Específico Arena Zarandeada-Bullk	gr/cc.	2.511	2.511	2.511	
10	Peso Especifico del filler-Aparente	gr/cc.	3.150	3.150	3.150	
11	Altura Promedio de la Probeta	cm.	6.42	6.54	6.42	
12	Peso de la briqueta en el Aire	gr.	1158.0	1172.0	1173.0	
13	Peso de la briqueta Saturada	gr.	1159.0	1172.0	1174.0	



**ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL
ASTM D6927-15 / MTC E 504**

14	Peso de la briqueta en el Agua	gr.	657.0	664.0	665.0	
15	Volumen de la briqueta por desplazamiento	c.c.	502.0	508.0	509.0	506.3
16	Peso Específico de la Probeta	gr/cc.	2.307	2.307	2.305	2.306
17	Peso Específico Máximo (Rice) ASTM D-2041	gr/cc.	2.388	2.388	2.388	
18	Peso Específico Máximo (Teórico)	gr/cc.	2.321	2.321	2.321	
19	% de Vacíos	%	3.4	3.4	3.5	3.4
20	Peso Específico Bulk del Agregado Total	gr/cc.	2.528	2.528	2.528	
21	% V.M.A. Vacíos del Agregado Mineral	%	14.2	14.2	14.3	14.3
22	% vacíos llenados con C.A.	%	76.0	76.0	75.4	75.8
23	Peso Específico Efectivo del Agregado Total	gr/cc.	2.614	2.614	2.614	
24	C.A. Absorbido por el Peso del Agregado Total	%	1.32	1.32	1.32	
25	% de Asfalto Efectivo	%	4.68	4.68	4.68	
26	Flujo (0.01 pulg)	mm	8.89	9.91	9.91	9.57
27	Estabilidad sin corregir		914	1214	1147	
28	Factor de Estabilidad		1.04	1.04	1.00	
29	Estabilidad corregida	kg.	950	1262	1147	1120
30	Factor de Rigidez	kg/cm	2715	3236	2941	2973
	Número de Golpes por Capa		75	75	75	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 60

Resultado del diseño Marshall para 6.5% de cemento asfáltico en el MAC-1 patrón.

**ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL
ASTM D6927-15 / MTC E 504**

PORCENTAJES DE DISEÑO		Lectura a dial	Lectura calibración	Flujo (0,01 mm)
Piedra Chancada	39.3%	350	1163.67	410
Arena Chancada	45.0%	380	1263.39	420
Arena Zarandeada	15.0%			



**ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL
ASTM D6927-15 / MTC E 504**

Filler	0.7%	350	1163.67	400		
∑ Suma	100.0%					
C.A. (PEN)	120 - 150					
Número de Probetas		Nº	1	2	3	Promedio
1	% C.A. en peso de la Mezcla	%	6.50	6.50	6.50	
2	% de Piedra chancada en Peso de la Mezcla	%	36.75	36.75	36.75	
3	% de Arena Chancada en peso de la Mezcla	%	42.08	42.08	42.08	
4	% de Arena Zarandeada en peso de la Mezcla	%	14.03	14.03	14.03	
5	% de Filler en Peso de la Mezcla	%	0.65	0.65	0.65	
6	Peso Específico Aparente de C.A.	gr/cc.	1.015	1.015	1.015	
7	Peso Específico Piedra Chancada-Bullk	gr/cc.	2.508	2.508	2.508	
8	Peso Específico Arena Chancada-Bullk	gr/cc.	2.544	2.544	2.544	
9	Peso Específico Arena Zarandeada-Bullk	gr/cc.	2.511	2.511	2.511	
10	Peso Específico del filler-Aparente	gr/cc.	3.150	3.150	3.150	
11	Altura Promedio de la Probeta	cm.	6.41	6.49	6.40	
12	Peso de la briqueta en el Aire	gr.	1236.0	1245.0	1241.0	
13	Peso de la briqueta Saturada	gr.	1237.0	1246.0	1242.0	
14	Peso de la briqueta en el Agua	gr.	702.0	707.0	705.0	
15	Volumen de la briqueta por desplazamiento	c.c.	535.0	539.0	537.0	537.0
16	Peso Específico de la Probeta	gr/cc.	2.310	2.310	2.311	2.310
17	Peso Específico Máximo (Rice) ASTM D-2041	gr/cc.	2.370	2.370	2.370	
18	Peso Específico Máximo (Teórico)	gr/cc.	2.305	2.305	2.305	
19	% de Vacíos	%	2.5	2.5	2.5	2.5
20	Peso Específico Bullk del Agregado Total	gr/cc.	2.528	2.528	2.528	
21	% V.M.A. Vacíos del Agregado Mineral	%	14.6	14.6	14.5	14.6
22	% vacios llenados con C.A.	%	82.7	82.6	82.8	82.7
23	Peso Específico Efectivo del Agregado Total	gr/cc.	2.613	2.613	2.613	



**ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL
ASTM D6927-15 / MTC E 504**

24	C.A. Absorbido por el Peso del Agregado Total	%	1.30	1.30	1.30	
25	% de Asfalto Efectivo	%	5.20	5.20	5.20	
26	Flujo (0.01 pulg)	mm	10.41	10.67	10.16	10.41
27	Estabilidad sin corregir		1164	1263	1164	
28	Factor de Estabilidad		0.96	0.93	0.93	
29	Estabilidad corregida	kg.	1117	1175	1082	1125
30	Factor de Rigidez	kg/cm	2725	2798	2706	2743
	Número de Golpes por Capa		75	75	75	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 61

Resultado del diseño Marshall para 7.0% de cemento asfáltico en el MAC-1 patrón.

**ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL
ASTM D6927-15 / MTC E 504**

PORCENTAJES DE DISEÑO		Lectura dial	Lectura calibración	Flujo (0,01 mm)
Piedra Chancada	39.3%			
Arena Chancada	45.0%	370	1230.17	450
Arena Zarandeada	15.0%	350	1163.67	450
Filler	0.7%	386	1283.32	380
∑ Suma	100.0%			
C.A. (PEN)	120 - 150			

Número de Probetas		Nº	1	2	3	Promedio
1	% C.A. en peso de la Mezcla	%	7.00	7.00	7.00	
2	% de Piedra chancada en Peso de la Mezcla	%	36.5 5	36.55	36.55	
3	% de Arena Chancada en peso de la Mezcla	%	41.8 5	41.85	41.85	
4	% de Arena Zarandeada en peso de la Mezcla	%	13.9 5	13.95	13.95	
5	% de Filler en Peso de la Mezcla	%	0.65	0.65	0.65	
6	Peso Específico Aparente de C.A.	gr/cc.	1.01 5	1.015	1.015	
7	Peso Específico Piedra Chancada-Bulk	gr/cc.	2.50 8	2.508	2.508	



**ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL
ASTM D6927-15 / MTC E 504**

8	Peso Específico Arena Chancada-Bullk	gr/cc.	2.54 4	2.544	2.544	
9	Peso Específico Arena Zarandeada-Bullk	gr/cc.	2.51 1	2.511	2.511	
10	Peso Específico del filler-Aparente	gr/cc.	3.15 0	3.150	3.150	
11	Altura Promedio de la Probeta	cm.	6.61	6.55	6.57	
12	Peso de la briqueta en el Aire	gr.	1253 .0	1252.0	1257. 0	
13	Peso de la briqueta Saturada	gr.	1254 .0	1254.0	1259. 0	
14	Peso de la briqueta en el Agua	gr.	715. 0	715.0	718.0	
15	Volumen de la briqueta por desplazamiento	c.c.	539. 0	539.0	541.0	539.7
16	Peso Específico de la Probeta	gr/cc.	2.32 5	2.323	2.323	2.324
17	Peso Específico Máximo (Rice) ASTM D-2041	gr/cc.	2.34 2	2.342	2.342	
18	Peso Específico Máximo (Teórico)	gr/cc.	2.28 9	2.289	2.289	
19	% de Vacíos	%	0.8	0.8	0.8	0.8
20	Peso Específico Bullk del Agregado Total	gr/cc.	2.52 8	2.528	2.528	
21	% V.M.A. Vacíos del Agregado Mineral	%	14.5	14.6	14.5	14.5
22	% vacíos llenados con C.A.	%	94.8	94.3	94.5	94.5
23	Peso Específico Efectivo del Agregado Total	gr/cc.	2.59 8	2.598	2.598	
24	C.A. Absorbido por el Peso del Agregado Total	%	1.08	1.08	1.08	
25	% de Asfalto Efectivo	%	5.92	5.92	5.92	
26	Flujo (0.01 pulg)	mm	11.4 3	11.43	9.65	10.84
27	Estabilidad sin corregir		1230	1164	1283	
28	Factor de Estabilidad		0.93	0.93	0.93	
29	Estabilidad corregida	kg.	1144	1082	1193	1140
30	Factor de Rigidez	kg/cm	2542	2405	3141	2672
	Número de Golpes por Capa		75	75	75	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En las tablas 58, 59, 60, 61 y 62 se obtuvieron resultados de vacíos de aire, vacíos de agregado mineral, vacíos llenados con cemento asfáltico, flujo, estabilidad, factor de rigidez y la relación entre estabilidad y fluencia, para los diferentes porcentajes de asfalto, dichos resultados se muestran a continuación:

Tabla 62

Resumen de los resultados y características del diseño Marshall.

CUADRO RESUMEN CON PORCENTAJE DE C.A.				
% Cemento Asfáltico en peso	5.50	6.00	6.50	7.00
Peso específico Probeta	2.271	2.306	2.310	2.324
Vacíos	5.0	3.4	2.5	0.8
Vacíos Agregado Mineral	15.10	14.26	14.55	14.52
Vacíos llenados con C. Asfáltico	68.73	75.82	82.69	94.51
Flujo	8.81	9.57	10.41	10.84
Estabilidad	1341	1120	1125	1140
Factor de rigidez	3870	2973	2743	2672
Estab./Fluencia	152	117	108	105

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Se procedió a calcular el contenido óptimo de asfalto de acuerdo a los parámetros establecidos por la EG-2013 en la sección 423-06 (tabla 63), para una mezcla asfáltica en caliente tipo MAC-1 y briquetas preparadas a 75 golpes por cada cara (carpeta asfáltica para tránsito pesado).

Tabla 63

Requisitos para diseño de mezclas asfálticas en caliente.

Parámetro de Diseño	Clase de Mezcla		
	A	B	C
Marshall MTC E 504			
1.Compactación, número de golpes por lado	75	50	35
2.Estabilidad (mín)	8,15 kN	5,44 kN	4,53 kN
3.Flujo 0,01" (0,25 mm)	8-14	8-16	8-20

Parámetro de Diseño	Clase de Mezcla		
	A	B	C
4. Porcentaje de vacíos con aire (MTC E 505)	35	35	35
5. Vacíos en el agregado mineral			
Inmersión - Compresión (MTC E 518)			
1. Resistencia a la compresión Mpa mfn.	2,1	2,1	1,4
2. Resistencia retenida % (mín.)	75	75	75
Relación Polvo - Asfalto	0,6 - 1,3	0,6 - 1,3	0,6 - 1,3
Relación Estabilidad/flujo (kg/cm)		1700 - 4000	
Resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta AASHTO T 283		80 Mín.	

Fuente: (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013).

Tabla 64

Resultados teóricos de características para 5.9% óptimo de asfalto.

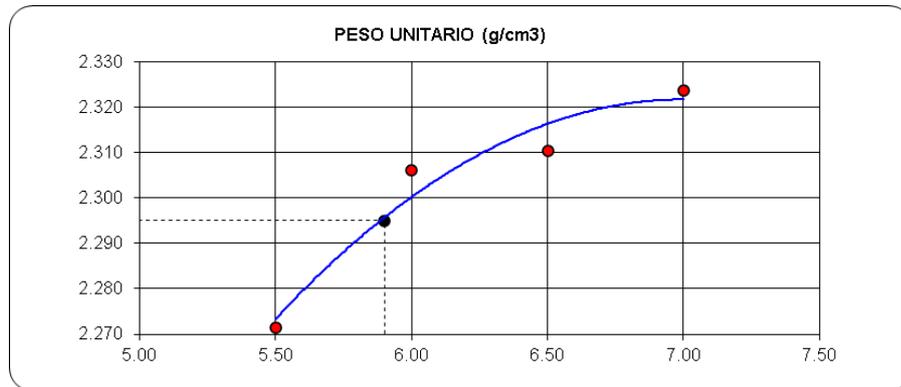
TABLA PARA CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO 5.9%		MIN	-	MAX
% Cemento Asfáltico en peso	5.90	REQUERIMIENTOS		
Peso específico Probeta	2.295			
Vacíos	4.00	3	-	5
Vacíos Agregado Mineral	14.58	12		
Vacíos llenados con C. Asfáltico	73.00	65	-	75
Flujo	9.50	8	-	14
Estabilidad	1175	850		
Factor de rigidez	3390	1700	-	4000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Por el método gráfico al 5.90 % de asfalto (% de asfalto vs peso unitario, % de asfalto vs % de vacíos, % de asfalto vs VAM, % de asfalto vs vacíos llenados con cemento asfáltico, % de asfalto vs flujo, % de asfalto vs estabilidad y % de asfalto vs factor de estabilidad de rigidez) se obtuvo los siguientes resultados mostrados en las figuras 39, 40, 41, 42, 43, 44 y 45:

Figura 39

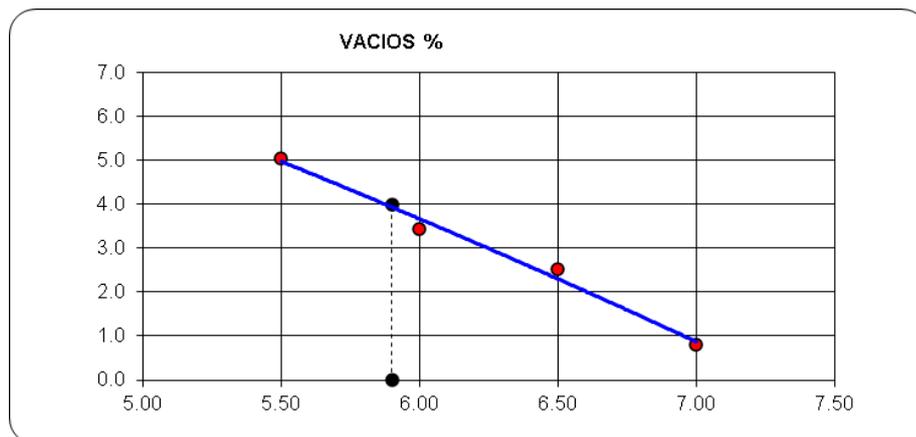
Comportamiento del peso unitario en relación al aumento de PEN en MAC-1.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 40

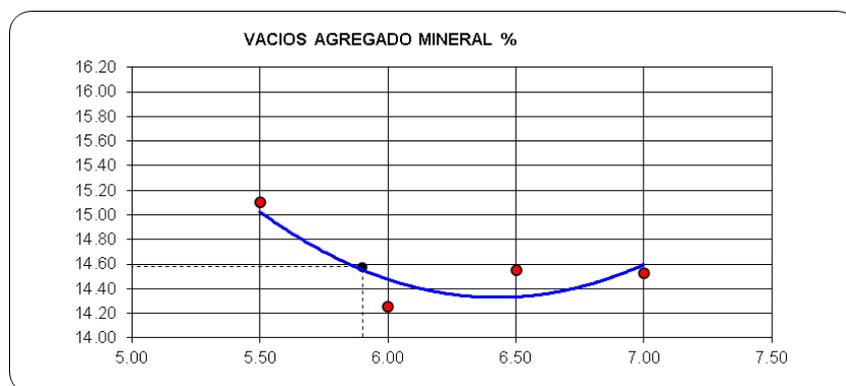
Comportamiento del % de vacíos a la adición de PEN en MAC-1.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 41

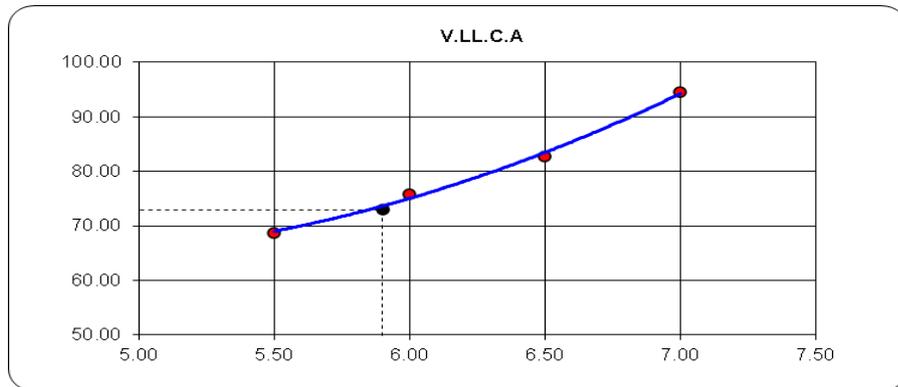
Evolución del % de VAM a la adición de PEN en MAC-1.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 42

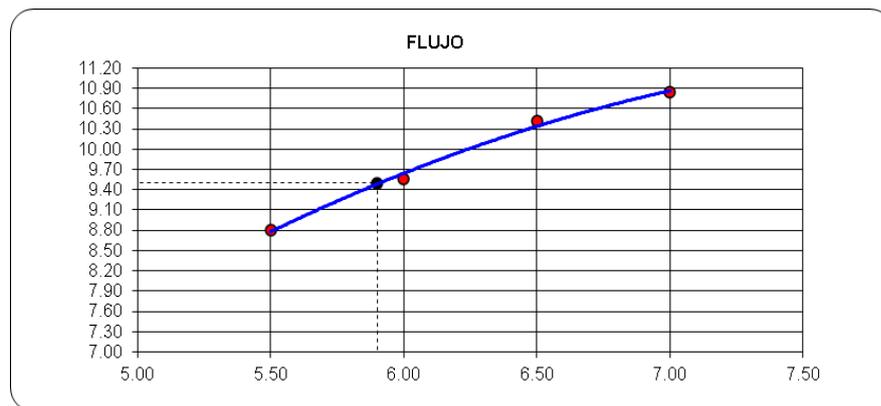
Evolución del % V.LL.C.A en relación a la adición de PEN en MAC-1.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 43

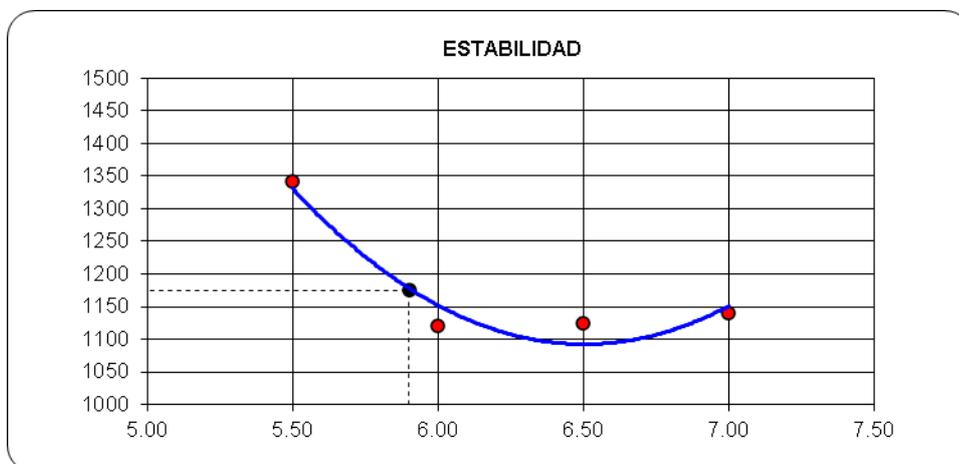
Evolución del flujo en relación a la adición de PEN en MAC-1.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 44

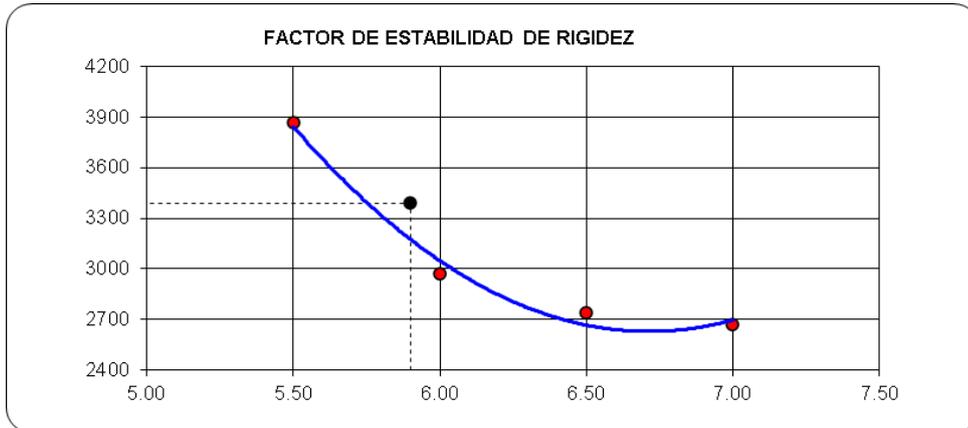
Evolución de la estabilidad en relación a la adición de PEN en MAC-1.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 45

Factor de rigidez del diseño de MAC-1 patrón.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

De las figuras 39, 40, 41, 42, 43, 44 y 45: % de asfalto vs peso unitario, % de asfalto vs % de vacíos, % de asfalto vs VAM, % de asfalto vs vacíos llenados con cemento asfáltico, % de asfalto vs flujo, % de asfalto vs estabilidad y % de asfalto vs factor de estabilidad de rigidez, se obtuvo que para el 5.9 % de asfalto los resultados se encuentran dentro de los parámetros requeridos por la EG-2013 y por lo tanto se trabajó con este contenido de asfalto para la muestra patrón, en la tabla 65 se muestra la comprobación de sus características realizada en laboratorio:

Tabla 65

Resultados de comprobación de diseño Marshall para 5.9% de cemento asfáltico.

ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D6927-15 / MTC E 504					
PORCENTAJES DE DISEÑO		Lectura a dial	Lectura calibración	Flujo (0,01 mm)	
Piedra Chancada	39.3%				
Arena Chancada	45.0%	300	997.14	350	
Arena Zarandeada	15.0%	350	1163.67	370	
Filler	0.7%	360	1196.92	390	
∑ Suma	100.0%				
C.A. (PEN)	60 -70				
Número de Probetas	N°	1	2	3	Promedio



**ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL
ASTM D6927-15 / MTC E 504**

1	% C.A. en peso de la Mezcla	%	5.90	5.90	5.90	
2	% de Piedra chancada en Peso de la Mezcla	%	36.98	36.98	36.98	
3	% de Arena Chancada en peso de la Mezcla	%	42.35	42.35	42.35	
4	% de Arena Zarandeada en peso de la Mezcla	%	14.12	14.12	14.12	
5	% de Filler en Peso de la Mezcla	%	0.66	0.66	0.66	
6	Peso Específico Aparente de C.A.	gr/cc.	1.015	1.015	1.015	
7	Peso Específico Piedra Chancada-Bullk	gr/cc.	2.508	2.508	2.508	
8	Peso Específico Arena Chancada-Bullk	gr/cc.	2.544	2.544	2.544	
9	Peso Específico Arena Zarandeada-Bullk	gr/cc.	2.511	2.511	2.511	
10	Peso Específico del filler-Aparente	gr/cc.	3.150	3.150	3.150	
11	Altura Promedio de la Probeta	cm.	6.41	6.39	6.38	
12	Peso de la briqueta en el Aire	gr.	1154.0	1170.0	1171.0	
13	Peso de la briqueta Saturada	gr.	1156.0	1172.0	1172.0	
14	Peso de la briqueta en el Agua	gr.	655.0	661.0	665.0	
15	Volumen de la briqueta por desplazamiento	c.c.	501.0	511.0	507.0	506.3
16	Peso Específico de la Probeta	gr/cc.	2.303	2.290	2.310	2.301
17	Peso Específico Máximo (Rice) ASTM D-2041	gr/cc.	2.387	2.387	2.387	
18	Peso Específico Máximo (Teórico)	gr/cc.	2.324	2.324	2.324	
19	% de Vacíos	%	3.5	4.1	3.2	3.6
20	Peso Específico Bullk del Agregado Total	gr/cc.	2.528	2.528	2.528	
21	% V.M.A. Vacíos del Agregado Mineral	%	14.3	14.8	14.0	14.4
22	% vacíos llenados con C.A.	%	75.4	72.4	76.9	74.9
23	Peso Específico Efectivo del Agregado Total	gr/cc.	2.608	2.608	2.608	
24	C.A. Absorbido por el Peso del Agregado Total	%	1.23	1.23	1.23	
25	% de Asfalto Efectivo	%	4.67	4.67	4.67	
26	Flujo (0.01 pulg)	mm	8.89	9.40	9.91	9.40

**ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL
ASTM D6927-15 / MTC E 504**

27	Estabilidad sin corregir		997	1164	1197	
28	Factor de Estabilidad		1.04	1.00	1.04	
29	Estabilidad corregida	kg.	1037	1164	1245	1148
30	Factor de Rigidez	kg/cm	2963	3145	3192	3104
	Número de Golpes por Capa		75	75	75	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

A continuación, se muestra un cuadro comparativo de resultados (tabla 66).

Tabla 66

Comparación de resultados de diseño Marshall (teórico - comprobación el laboratorio - parámetros mínimos requeridos).

**CUADRO RESUMEN DISEÑO MARSHALL
ASTM D6927-15 / AASHTO T245**

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN		VALORES DE DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE	
		MIN	MAX	Teórico	Verificación 5.9 % PEN
Piedra Chancada	%			39.3	39.3
Arena Chancada	%			45.0	45.0
Arena Zarandeada	%			15.0	15.0
Cemento Portland IP	%			0.7	0.7
Cemento Asfáltico	%			5.90	5.90
Peso Específico Probeta	Kg/cm³			2.295	2.301
Vacios	%	3	5	4.0	3.6
Vacios Agregado Mineral	%	12		14.6	14.4
Vacios Llenados con C.A.	%	65	75	73.0	74.9



**CUADRO RESUMEN DISEÑO MARSHALL
ASTM D6927-15 / AASHTO T245**

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN		VALORES DE DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE	
		MIN	MAX	Teórico	Verificación 5.9 % PEN
Flujo	mm.	8	14	9.5	9.4
Estabilidad	Kg.	815		1175	1148
Factor de rigidez	Kg/cm.	1750	4000	3390	3104

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

**3.6.1.2.12 Ensayo para determinar el efecto de la humedad en mezclas de
pavimento asfáltico**

Este ensayo se realizó con base en la ASTM D4867/ D4867M

• **Equipo Utilizado**

- Pedestal Marshal
- Martillo de compactación de 10 lb.
- Balanza de 1000g de capacidad y 0.01 g de precisión
- Equipo para baño María.
- Congelador con capacidad de hasta -20 °C.
- Equipo de compresión capaz de mantener una velocidad de compresión de 2plg/min.
- Acoplamiento para rotura de tracción indirecta.

• **Procedimiento**

- Se preparó briquetas de 4 pulgadas de diámetro de acuerdo a los lineamientos de la ASTM D6926-20.

- Se prepararon 03 especímenes en condiciones normales y 03 especímenes para someterlo a condiciones críticas.
- 03 especímenes se sometieron durante 15 horas a un congelamiento de 18 ± 2 °C, para después ser sometidos a baño maría a 60 ± 2 °C, durante 24 horas.
- Se calculó sus respectivos volúmenes iniciales y finales para poder hallar el porcentaje de hinchamiento de los especímenes sometidos a condiciones críticas.
- Finalmente se realizó la rotura por tracción indirecta de los 06 especímenes.

Figura 46

Ensayo para determinar el efecto de la humedad en MAC (Lottman modificado).



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

- **Resultados**

Los resultados se muestran en la tabla 67:

Tabla 67

Resultados de ensayo Lottman modificado para 5.9% de cemento asfáltico en Mac-1.

Porcentaje			5.9 % de PEN (óptimo - Diseño Marshall)					
Condiciones			Briqueta en Condición Normal			Briqueta sometida a Condiciones Críticas		
Identificación muestra	Und		01	02	03	01	02	03
1	Peso seco	gr.	1177.00	1167.00	1161.00	1135.00	1145.00	1139.00
2	Peso sumergido superficialmente y seco	gr.	1180.00	1170.00	1163.00	1138.00	1148.00	1142.00
3	Peso sumergido	gr.	674.00	665.00	679.00	649.00	653.00	649.00
4	volumen final (por desplazamiento de agua)	cm ³	506.00	505.00	484.00	489.00	495.00	493.00
5	Diámetro	cm	10.15	10.15	10.14	10.10	10.11	10.11
6	Altura	cm	6.32	6.39	6.37	6.34	6.30	6.31
7	Volumen inicial	cm ³	511.37	517.04	514.41	507.95	505.75	506.55
8	Variación de volumen	%	1.05	2.33	5.91	3.73	2.12	2.67
9	Peso específico de la briqueta	gr./cm ³	2.33	2.31	2.40	2.32	2.31	2.31
10	Lectura del dial	mm	680.00	690.00	670.00	550.00	540.00	535.00
11	Conversión lectura de dial	Kgf	2252.85	2285.59	2220.10	1825.83	1792.87	1776.39
12	Resistencia a la Tracción	Kpa	2.19	2.20	2.14	1.78	1.76	1.74
13	Promedio			2.18			1.76	
14	Relación de resistencia a la tracción	%			80.69			

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

La resistencia a la tracción en condiciones normales fue de 2.18 kpa y en condiciones críticas de congelamiento y calentamiento fue de 1.76 kpa para los especímenes sometido

a. Por lo tanto, una resistencia retenida de 80.69 %.



3.6.1.3 Propiedades del pavimento asfáltico reciclado

3.6.1.3.1 Ensayo de extracción cuantitativa de asfalto de mezclas bituminosas para pavimentos (lavado asfáltico)

Este ensayo se hizo bajo los lineamientos de la norma ASTM D2172

- **Equipo Utilizado**

- Extractor centrifugo
- Recipientes resistentes a altas temperatura.
- Papel filtro
- Material solvente (gasolina)
- Balanza de 1000g de capacidad y 0.01 g de precisión
- Horno de secado, ventilado y controlado por termostato capaz de mantener temperatura uniforme de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

- **Procedimiento**

- Se selecciono el material por cuarteo ASTM D702 y reducción de muestras de acuerdo a la norma ASTM D75.
- Se tomó 1400 g de pavimento asfáltico reciclado.
- Se tomó registro de la masa del papel filtro
- Se colocó la muestra en el recipiente del equipo centrifugador, el papel filtro y su tapa metálica, dejamos disolver por 50 minutos (menos de 1 hora, como indica la norma).
- Se procedió a encender el equipo a una velocidad aproximada de 3200 r/min – 3600 r/min hasta que el líquido solvente (gasolina) dejó de fluir por el dren.
- Se adicionó 200 ml del líquido solventes y se procedió a encender nuevamente el equipo centrifugador hasta que el líquido deje de fluir

por el dren, así sucesivamente hasta que liquido solvente efluente del aparato centrifugador sea los más parecido posible al color inicial antes de entrar en contacto con el pavimento asfáltico reciclado.

- Terminado el proceso procedimos a dejar secar el material y el papel filtro al aire libre para registrar la masa del papel filtro y el material que quedaba en el recipiente del centrifugador.
- El proceso se realizó 03 veces.
- Seguidamente se realizó la granulometría del material lavado según lo indica la ASTM C136/C136M-14.

Figura 47

Ensayo de extracción cuantitativa para extraer % de contenido de PEN del RAP.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

- **Resultados**

Los resultados se muestran en la tabla 68:

Tabla 68

Resultados del ensayo de extracción cuantitativa de cemento asfáltico del RAP.

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	M1	M2	M3
PESO INICIAL DE LA MUESTRA	gr.	1433	1480	1400
PESO DE MUESTRA LAVADA	gr.	1368	1414	1337



DESCRIPCIÓN	UNIDAD	M1	M2	M3
PESO INICIAL DE FILTRO	gr.	46.89	45.8	47.2
PESO FINAL DE FILTRO	gr.	56.02	54.8	57.8
PESO DE RESIDUO DE MEZCLA ASFÁLTICA	gr.	74.13	75	73.6
CEMENTO ASFÁLTICO	%	5.17	5.07	5.26
PROMEDIO DE CEMENTO ASFÁLTICO		5.17%		

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Se obtuvo como resultado del lavado asfáltico de las tres muestras de pavimento asfáltico reciclado un promedio de 5.17 % de asfalto.

3.6.1.3.2 *Ensayo de granulometría por tamizado de los agregados resultantes del lavado asfáltico del pavimento asfáltico reciclado*

Este ensayo se realizó con base en la ASTM C 136/D136 M-14

- **Equipo Utilizado**

- Balanza de 1000 g de capacidad con precisión de 0.01 g
- Recipientes resistentes a altas temperaturas.
- Juego de tamices de acuerdo de malla metálica de acuerdo a la norma E11, para los agregados grueso (piedra chancada) tamices: (2", 1 ½", 1", ¾", ½", ⅜", N°4, y base), para los agregados finos (arena chancada y arena zarandeada) tamices: (N° 4, N° 10, N° 20, N° 40, N° 60, N° 80, N° 100, N° 200 y base)

- **Procedimiento**

- Para el agregado resultante del lavado asfáltico, se procedió a secar en horno a 110 ± 5 °C, hasta obtener una masa constante.
- Se procedió a armar el juego de tamices, vertimos el material sobre el primer tamiz y agitamos por aproximadamente 10 minutos, percatando que no había exceso de material en los tamices.



- Terminado el proceso se tomó registro del peso retenido en cada tamiz.

- **Resultados**

Se muestra os datos iniciales para la granulometría de los agregados del pavimento asfáltico reciclado, tabla 69:

Tabla 69

Datos iniciales para granulometría de RAP.

Peso de Material	
Peso Inicial Total (kg)	1,341
Peso Fraccion Fina Para Lavar (gr)	0.0

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Los resultados se muestran en la tabla 70:

Tabla 70

Resultados de granulometría de los agregados del RAP.

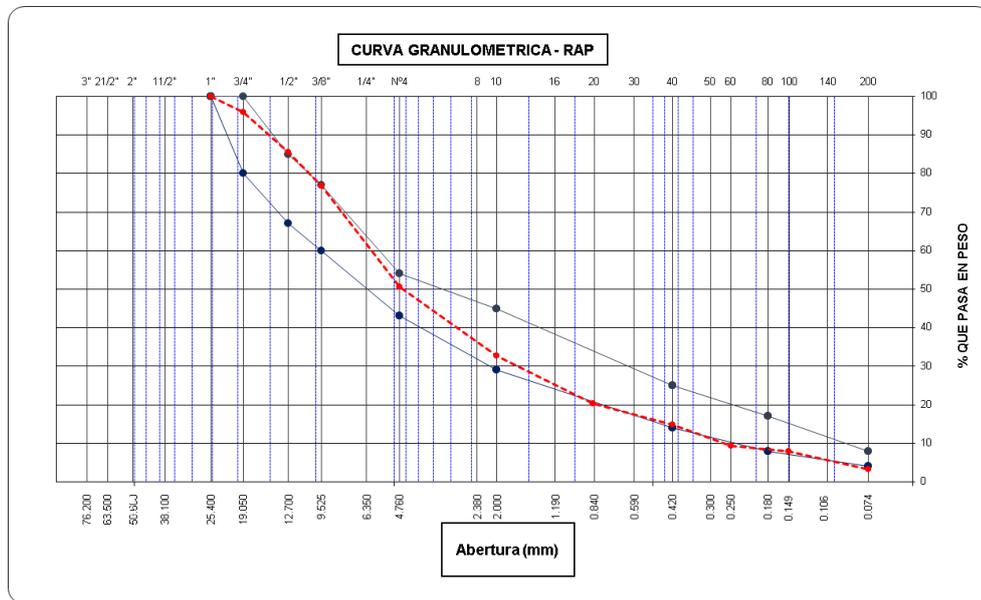
Tamices ASTM	Abertura (mm)	Peso Retenido	Retenido Parcial	Retenido Acumulado	Porcentaje que Pasa	HUSO MAC - 1	
5"	127.000						
4"	101.600						
3"	73.000						
2 1/2"	60.300						
2"	50.800						
1 1/2"	37.500						
1"	25.400	0.0			100.0	100	100
3/4"	19.000	55.6	4.2	4.2	95.9	80	100
1/2"	12.700	138.9	10.4	14.5	85.5	67	85
3/8"	9.520	115.7	8.6	23.1	76.9	60	77
1/4"	6.350						
N° 4	4.750	351.2	26.2	49.3	50.7	43	54
N° 8	2.360						
N° 10	2.000	241.2	18.0	67.3	32.7	29	45
N° 16	1.190						
N° 20	0.850	166.0	12.4	79.7	20.3		
N° 30	0.600						
N° 40	0.420	72.8	5.4	85.1	14.9	14	25
N° 50	0.300						
N° 60	0.250	75.4	5.6	90.8	9.3		

Tamices ASTM	Abertura (mm)	Peso Retenido	Retenido Parcial	Retenido Acumulado	Porcentaje que Pasa	HUSO MAC - 1	
N° 80	0.180				100.0	8	17
N° 100	0.150	18.8	1.4	92.2	7.8		
N° 140	0.106						
N° 200	0.074	60.3	4.5	96.7	3.3	4	8
Pasante		45.0	3.4	100.0			

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 48

Granulometría del material de RAP.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

De la granulometría realizada a los agregados resultantes del lavado asfáltico (figura 48), se observó que se encuentra dentro de la gradación tipo MAC-1.

3.6.1.3.3 *Elaboración de muestras de mezclas asfálticas utilizando aparato Marshall para determinar % cemento asfáltico a añadir al RAP*

Este ensayo se realizó con base en la ASTM D6926-20.

Se elaboró muestras de pavimento asfáltico reciclado añadido con asfalto PEN 120-150 en diferentes porcentajes, para posteriormente evaluar la estabilidad y flujo de esta combinación y así encontrar el porcentaje óptimo de asfalto a añadir al RAP.

3.6.1.3.4 *Ensayo para la densidad y gravedad específica de mezclas bituminosas compactadas para RAP*

Una vez realizada las briquetas y habiendo estas llegado a una temperatura ambiente, se registra su masa seca, masa sumergida y masa superficialmente seca.

3.6.1.3.5 *Ensayo para la densidad y gravedad específica máxima teórica (RICE) para RAP*

Se realiza para cada evento de RAP añadido con PEN. Se extrae los vacíos a la mezcla de consistencia granular a temperatura ambiente, para finalmente registrar: masa sumergida sin aire y masa seco.

- **Resultados**

Los resultados se muestran en la tabla 71:

Tabla 71

Resultados del peso específico máximo teórico de RAP adicionado con cemento asfáltico.

Porcentaje de Cemento asfáltico			0.00%		0.50%		1.00%		1.50%	
Identificación muestra	Un d	01	02	01	02	01	02	01	02	
1.-	Peso del frasco	gr.	1210	1225	1230	1215	1251	1272	1228. 0	1220.0
2.-	Peso agua + frasco	gr.	1816	1816	1816	1816	1816	1816	1816. 0	1816.0
3.-	Peso agua + frasco + material	gr.	2520	2528	2526	2521	2534	2549	2521. 0	2514.0
4.-	Volumen	gr.	506	513	520	510	533	539	523.0	522.0

Porcentaje de Cemento asfáltico	0.00%		0.50%		1.00%		1.50%		
Peso Específico Máximo MAC, g/cm ³	gr./ cm ³	2.391	2.388	2.365	2.382	2.347	2.360	2.348	2.337
Promedio		2.390		2.374		2.354		2.343	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Se tiene los pesos específicos máximos teóricos para los porcentajes de PEN (0.0 %, 0.5 %, 1.0 % y 1.5 % de peso del RAP). Los cuales varían 2.390 a 2.343 gr/cm³.

3.6.1.3.6 Ensayo de prueba estándar para la estabilidad y el flujo de Marshall para pavimento asfáltico reciclado (RAP)

Se someten las briquetas a un baño maría a 60°C durante 40 min, para posteriormente someterlo a la prensa Marshall y registrar las lecturas de la estabilidad y el flujo. (figura 49).

Figura 49

Rotura de briquetas (RAP + PEN 120-150) en prensa Marshall.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

- **Resultados**

Los resultados se muestran en las tablas 72, 73, 74, 75 y 76 (RAP adicionado con cemento asfáltico PEN 120-150 al 0.0 %, 0.5 %, 1.0 % y al 1.5 % de peso de RAP):

Tabla 72

Resultados de diseño Marshall del RAP con 0.0% de cemento asfáltico.

ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL PAVIMENTOS ASFÁLTICO RECICLADO + CEMENTO ASFÁLTICO (PEN 120-150)						
PORCENTAJES DE DISEÑO						
	Pavimentos Asfáltico Reciclado	100.0%	Lectura a dial	Lectura calibración	Flujo (0,01 mm)	
	Filler	0.0%	592	1964.08	220	
	∑ Suma	100.0%	515	1710.41	250	
	C.A. (PEN)	120 - 150	540	1792.87	230	
	Número de Probetas	N°	1	2	3	Promedio
1	% C.A. en peso de la Mezcla	%	0.00	0.00	0.00	
2	% de Pavimento Asfáltico Reciclado	%	100.00	100.00	100.00	
3	% de Arena Chancada en peso de la Mezcla	%	0.00	0.00	0.00	
4	% de Arena Zarandeada en peso de la Mezcla	%	0.00	0.00	0.00	
5	% de Filler en Peso de la Mezcla	%	0.00	0.00	0.00	
6	Peso Específico Aparente de C.A.	gr/cc.	1.015	1.015	1.015	
7	Peso Específico Pavimento Asfáltico Reciclado	gr/cc.	2.390	2.390	2.390	
8	Peso Específico Arena Chancada-Bullk	gr/cc.	2.544	2.544	2.544	
9	Peso Específico Arena Zarandeada-Bullk	gr/cc.	2.511	2.511	2.511	
10	Peso Específico del filler-Aparente	gr/cc.	3.150	3.150	3.150	
11	Altura Promedio de la Probeta	cm.	6.75	6.78	7.05	
12	Peso de la briqueta en el Aire	gr.	1205.0	1220.0	1202.0	
13	Peso de la briqueta Saturada	gr.	1206.0	1221.0	1203.0	
14	Peso de la briqueta en el Agua	gr.	665.0	672.0	659.0	
15	Volumen de la briqueta por desplazamiento	c.c.	541.0	549.0	544.0	544.7
16	Peso Específico de la Probeta	gr/cc.	2.227	2.222	2.210	2.220
17	Peso Específico Máximo (Rice) ASTM D-2041	gr/cc.	2.390	2.390	2.390	
18	Peso Específico Máximo (Teórico)	gr/cc.	2.390	2.390	2.390	



ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL PAVIMENTOS ASFÁLTICO RECICLADO + CEMENTO ASFÁLTICO (PEN 120-150)						
19	% de Vacíos	%	6.8	7.0	7.5	7.1
20	Peso Específico Bulk del Agregado Total	gr/cc.	2.390	2.390	2.390	
21	% V.M.A. Vacíos del Agregado Mineral	%	6.8	7.0	7.5	7.1
22	% vacíos llenados con C.A.	%	0.2	0.2	0.2	0.2
23	Peso Específico Efectivo del Agregado Total	gr/cc.	2.390	2.390	2.390	
24	C.A. Absorbido por el Peso del Agregado Total	%	-0.01	-0.01	-0.01	
25	% de Asfalto Efectivo	%	0.01	0.01	0.01	
26	Flujo (0.01 pulg)	mm	5.59	6.35	5.84	5.93
27	Estabilidad sin corregir		1964	1710	1793	
28	Factor de Estabilidad		0.93	0.89	0.93	
29	Estabilidad corregida	kg.	1827	1522	1667	1672
30	Factor de Rigidez	kg/cm	8303	6089	7249	7166
31	Número de Golpes por Capa		75	75	75	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 73

Resultados de diseño Marshall del RAP con 0.5% de cemento asfáltico.

ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL PAVIMENTOS ASFÁLTICO RECICLADO + CEMENTO ASFÁLTICO (PEN 120-150)						
PORCENTAJES DE DISEÑO						
	Pavimentos Asfáltico Reciclado	100.0%	Lectura dial	Lectura calibración	Flujo (0,01 mm)	
		0.0%	572	1898.28	265	
	Σ Suma	100.0%	499	1657.58	300	
	C.A. (PEN)	120 - 150	640	2121.74	300	
	Número de Probetas	Nº	1	2	3	Promedio



ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL PAVIMENTOS ASFÁLTICO RECICLADO + CEMENTO ASFÁLTICO (PEN 120-150)						
1	% C.A. en peso de la Mezcla	%	0.50	0.50	0.50	
2	% de Pavimento Asfáltico Reciclado	%	99.50	99.50	99.50	
3	% de Arena Chancada en peso de la Mezcla	%	0.00	0.00	0.00	
4	% de Arena Zarandeada en peso de la Mezcla	%	0.00	0.00	0.00	
5	% de Filler en Peso de la Mezcla	%	0.00	0.00	0.00	
6	Peso Específico Aparente de C.A.	gr/cc.	1.015	1.015	1.015	
7	Peso Específico Pavimento Asfáltico Reciclado	gr/cc.	2.390	2.390	2.390	
8	Peso Específico Arena Chancada-Bulk	gr/cc.	2.544	2.544	2.544	
9	Peso Específico Arena Zarandeada-Bulk	gr/cc.	2.511	2.511	2.511	
10	Peso Específico del filler-Aparente	gr/cc.	3.150	3.150	3.150	
11	Altura Promedio de la Probeta	cm.	7.06	6.30	6.70	
12	Peso de la briqueta en el Aire	gr.	1229.0	1117.0	1204.0	
13	Peso de la briqueta Saturada	gr.	1230.0	1118.0	1204.0	
14	Peso de la briqueta en el Agua	gr.	684.0	613.0	665.0	
15	Volumen de la briqueta por desplazamiento	c.c.	546.0	505.0	539.0	530.0
16	Peso Específico de la Probeta	gr/cc.	2.251	2.212	2.234	2.232
17	Peso Específico Máximo (Rice) ASTM D-2041	gr/cc.	2.374	2.374	2.374	
18	Peso Específico Máximo (Teórico)	gr/cc.	2.374	2.374	2.374	
19	% de Vacíos	%	5.2	6.8	5.9	6.0
20	Peso Específico Bulk del Agregado Total	gr/cc.	2.390	2.390	2.390	
21	% V.M.A. Vacíos del Agregado Mineral	%	6.3	7.9	7.0	7.1
22	% vacios llenados con C.A.	%	17.7	13.8	15.7	15.7
23	Peso Específico Efectivo del Agregado Total	gr/cc.	2.390	2.390	2.390	
24	C.A. Absorbido por el Peso del Agregado Total	%	0.00	0.00	0.00	
25	% de Asfalto Efectivo	%	0.50	0.50	0.50	
26	Flujo (0.01 pulg)	mm	6.73	7.62	7.62	7.32



ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL PAVIMENTOS ASFÁLTICO RECICLADO + CEMENTO ASFÁLTICO (PEN 120-150)						
27	Estabilidad sin corregir		1898	1658	2122	
28	Factor de Estabilidad		0.93	1.04	0.93	
29	Estabilidad corregida	kg.	1765	1724	1973	1821
30	Factor de Rigidez	kg/cm	6662	5746	6577	6315
Número de Golpes por Capa			75	75	75	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 74

Resultados de diseño Marshall del RAP con 1.0% de cemento asfáltico.

ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL PAVIMENTOS ASFÁLTICO RECICLADO + CEMENTO ASFÁLTICO (PEN 120-150)						
PORCENTAJES DE DISEÑO			Lectura a dial	Lectura calibración	Flujo (0,01 mm)	
Pavimentos Asfáltico Reciclado	100.0%					
Σ Suma	100.0%		567	1881.82	300	
C.A. (PEN)	120 - 150		579	1921.32	300	
	0.0%		400	1329.80	210	
Número de Probetas		Nº	1	2	3	Promedio
1	% C.A. en peso de la Mezcla	%	1.00	1.00	1.00	
2	% de Piedra chancada en Peso de la Mezcla	%	99.00	99.00	99.00	
3	% de Arena Chancada en peso de la Mezcla	%	0.00	0.00	0.00	
4	% de Arena Zarandeada en peso de la Mezcla	%	0.00	0.00	0.00	
5	% de Filler en Peso de la Mezcla	%	0.00	0.00	0.00	
6	Peso Específico Aparente de C.A.	gr/cc.	1.015	1.015	1.015	
7	Peso Específico Pavimento Asfáltico Reciclado	gr/cc.	2.390	2.390	2.390	
8	Peso Específico Arena Chancada-Bulk	gr/cc.	2.544	2.544	2.544	
9	Peso Específico Arena Zarandeada-Bulk	gr/cc.	2.511	2.511	2.511	
10	Peso Específico del filler-Aparente	gr/cc.	3.150	3.150	3.150	



ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL PAVIMENTOS ASFÁLTICO RECICLADO + CEMENTO ASFÁLTICO (PEN 120-150)						
11	Altura Promedio de la Probeta	cm.	6.73	6.87	6.72	
12	Peso de la briqueta en el Aire	gr.	1204.0	1208.0	1230.0	
13	Peso de la briqueta Saturada	gr.	1204.0	1209.0	1232.0	
14	Peso de la briqueta en el Agua	gr.	665.0	666.0	691.0	
15	Volumen de la briqueta por desplazamiento	c.c.	539.0	543.0	541.0	541.0
16	Peso Específico de la Probeta	gr/cc.	2.234	2.225	2.274	2.244
17	Peso Específico Máximo (Rice) ASTM D-2041	gr/cc.	2.354	2.354	2.354	
18	Peso Específico Máximo (Teórico)	gr/cc.	2.358	2.358	2.358	
19	% de Vacíos	%	5.1	5.5	3.4	4.7
20	Peso Específico Bulk del Agregado Total	gr/cc.	2.390	2.390	2.390	
21	% V.M.A. Vacíos del Agregado Mineral	%	7.5	7.8	5.8	7.0
22	% vacíos llenados con C.A.	%	31.9	30.3	41.7	34.6
23	Peso Específico Efectivo del Agregado Total	gr/cc.	2.385	2.385	2.385	
24	C.A. Absorbido por el Peso del Agregado Total	%	0.08	0.08	0.08	
25	% de Asfalto Efectivo	%	1.08	1.08	1.08	
26	Flujo (0.01 pulg)	mm	7.62	7.62	5.33	6.86
27	Estabilidad sin corregir		1882	1921	1330	
28	Factor de Estabilidad		0.93	0.93	0.93	
29	Estabilidad corregida	kg.	1750	1787	1237	1591
30	Factor de Rigidez	kg/cm	5834	5956	5889	5893
	Número de Golpes por Capa		75	75	75	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 75

Resultados de diseño Marshall del RAP con 1.5% de cemento asfáltico.

ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL PAVIMENTOS ASFÁLTICO RECICLADO + CEMENTO ASFÁLTICO (PEN 120-150)						
--	--	--	--	--	--	--



ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL PAVIMENTOS ASFÁLTICO RECICLADO + CEMENTO ASFÁLTICO (PEN 120-150)						
PORCENTAJES DE DISEÑO			Lectura a dial	Lectura calibración	Flujo (0,01 mm)	
Pavimentos Asfáltico Reciclado	100.0%					
	0.0%		370	1230.17	350	
Σ Suma	100.0%		350	1163.67	360	
C.A. (PEN)	120 - 150		386	1283.32	340	
Número de Probetas		N°	1	2	3	Promedio
1	% C.A. en peso de la Mezcla	%	1.50	1.50	1.50	
2	% de Piedra chancada en Peso de la Mezcla	%	98.50	98.50	98.50	
3	% de Arena Chancada en peso de la Mezcla	%	0.00	0.00	0.00	
4	% de Arena Zarandeada en peso de la Mezcla	%	0.00	0.00	0.00	
5	% de Filler en Peso de la Mezcla	%	0.00	0.00	0.00	
6	Peso Específico Aparente de C.A.	gr/cc.	1.015	1.015	1.015	
7	Peso Específico Pavimento Asfáltico Reciclado	gr/cc.	2.390	2.390	2.390	
8	Peso Específico Arena Chancada-Bullk	gr/cc.	2.544	2.544	2.544	
9	Peso Específico Arena Zarandeada-Bullk	gr/cc.	2.511	2.511	2.511	
10	Peso Específico del filler-Aparente	gr/cc.	3.150	3.150	3.150	
11	Altura Promedio de la Probeta	cm.	6.73	6.70	6.85	
12	Peso de la briqueta en el Aire	gr.	1228.0	1219.0	1228.0	
13	Peso de la briqueta Saturada	gr.	1229.0	1220.0	1229.0	
14	Peso de la briqueta en el Agua	gr.	691.0	682.0	686.0	
15	Volumen de la briqueta por desplazamiento	c.c.	538.0	538.0	543.0	539.7
16	Peso Específico de la Probeta	gr/cc.	2.283	2.266	2.262	2.270
17	Peso Específico Máximo (Rice) ASTM D-2041	gr/cc.	2.343	2.343	2.343	
18	Peso Específico Máximo (Teórico)	gr/cc.	2.342	2.342	2.342	
19	% de Vacíos	%	2.6	3.3	3.5	3.1
20	Peso Específico Bullk del Agregado Total	gr/cc.	2.390	2.390	2.390	

ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL PAVIMENTOS ASFÁLTICO RECICLADO + CEMENTO ASFÁLTICO (PEN 120-150)						
21	% V.M.A. Vacíos del Agregado Mineral	%	5.9	6.6	6.8	6.4
22	% vacíos llenados con C.A.	%	56.8	50.5	49.1	52.1
23	Peso Específico Efectivo del Agregado Total	gr/cc.	2.390	2.390	2.390	
24	C.A. Absorbido por el Peso del Agregado Total	%	0.00	0.00	0.00	
25	% de Asfalto Efectivo	%	1.50	1.50	1.50	
26	Flujo (0.01 pulg)	mm	8.89	9.14	8.64	8.89
27	Estabilidad sin corregir		1230	1164	1283	
28	Factor de Estabilidad		0.93	0.93	0.93	
29	Estabilidad corregida	kg.	1144	1082	1193	1140
30	Factor de Rigidez	kg/cm	3269	3006	3510	3257
	Número de Golpes por Capa		75	75	75	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

A continuación, se muestra el resumen de los resultados de pavimentos asfáltico reciclado adicionado con cemento asfáltico PEN 120-150:

Tabla 76

Resumen de diseño Marshall de RAP adicionado con PEN 120-150.

CUADRO RESUMEN CON PORCENTAJE DE C.A.				
% Cemento Asfáltico en peso	0.00	0.50	1.00	1.50
Peso específico Probeta	2.220	2.232	2.244	2.270
Vacíos	7.1	6.0	4.7	3.1
Vacíos Agregado Mineral	7.12	7.07	7.05	6.45
Vacíos llenados con C. Asfáltico	0.21	15.73	34.61	52.11
Flujo	5.93	7.32	6.86	8.89
Estabilidad	1672	1821	1591	1140
Factor de rigidez	7166	6315	5893	3257
Estab./Fluencia	282	249	232	128

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 77

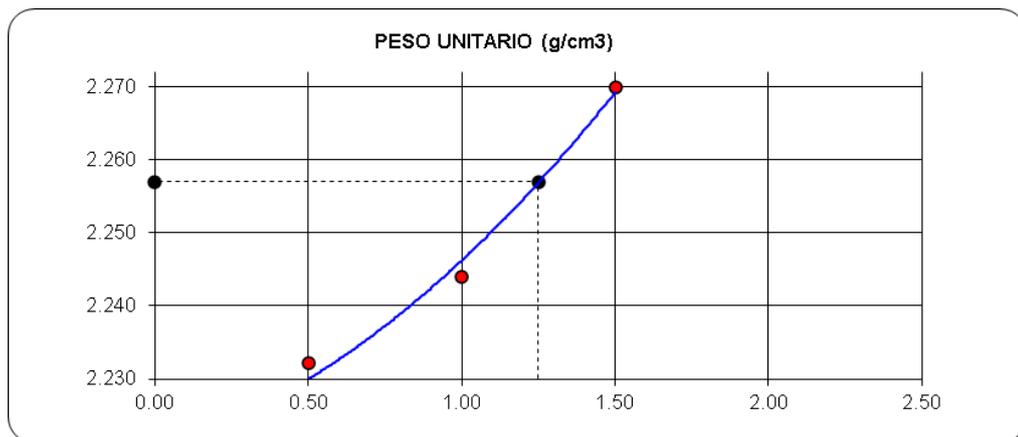
Resultados del 1.25% de cemento asfáltico añadido al RAP y comparación con parámetros de diseño Marshall.

	OPTIMO DE PEN 120-150	MIN	-	MAX
% Cemento Asfáltico en peso	1.25	REQUERIMIENTOS		
Peso específico Probeta	2.257			
Vacíos	4.000	3	-	5
Vacíos Agregado Mineral	6.800	12		
Vacíos llenados con C. Asfáltico	43.000	65	-	75
Flujo	8.000	8	-	14
Estabilidad	1400.000	850		
Factor de rigidez	4500.000	1700	-	4000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 50

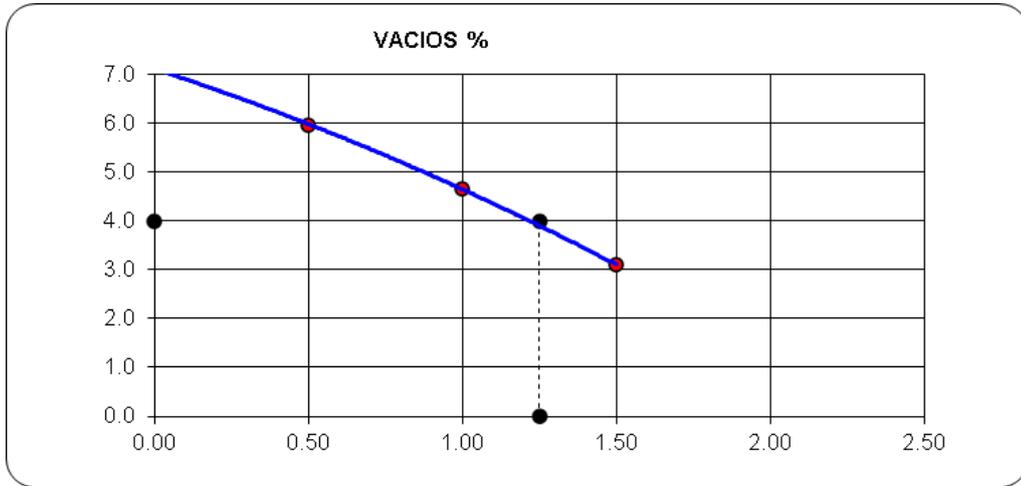
Evolución del peso específico de la combinación de RAP + PEN 120-150.



Fuente: Elaborada por el equipo de trabajo.

Figura 51

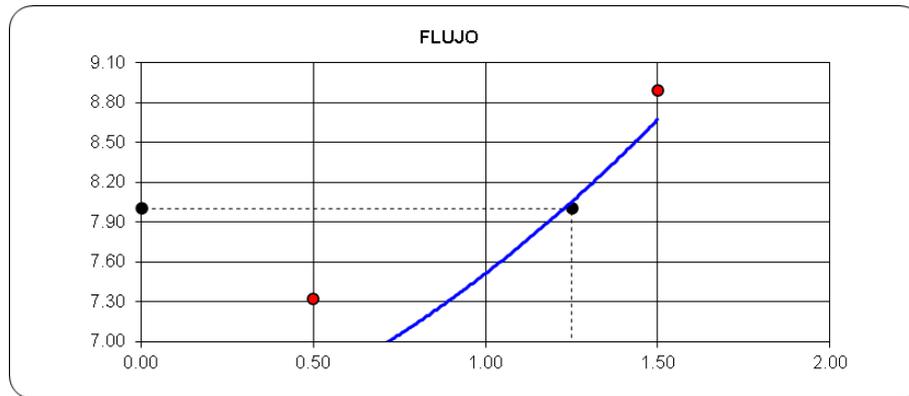
Evolución del % de vacíos de la combinación RAP + PEN 120-150.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 52

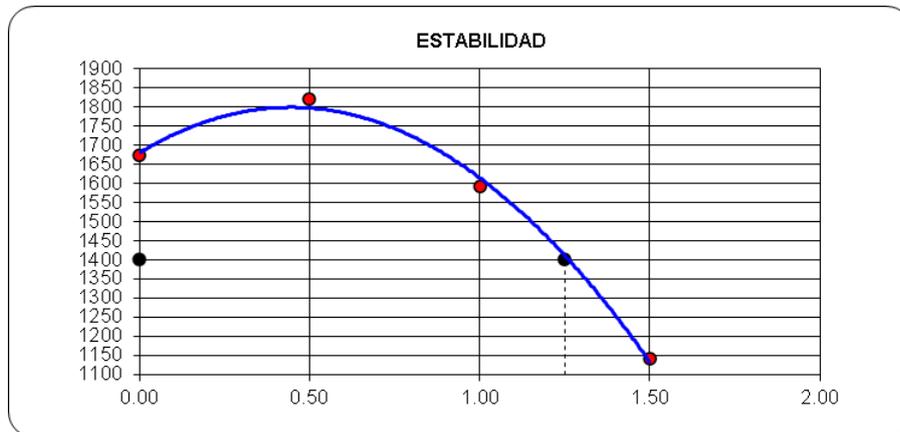
Evolución de flujo de la combinación RAP + PEN 120-150.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 53

Evolución de la estabilidad de la combinación de RAP + PEN 120-150.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

De acuerdo a la tabla 77 y figuras 50, 51, 52 y 53, se tiene como asfalto óptimo a adicionar al pavimento asfáltico reciclado es de 1.25 % del peso total de la mezcla de RAP + PEN, se eligió este porcentaje de acuerdo al contenido de vacíos óptimo que es de 4.0 % y al flujo que debe ser mayor a 8mm.

3.6.1.4 Elección de cantidades de pavimento asfáltico reciclado

3.6.1.4.1 Ensayo de estabilidad y flujo Marshall del material para carpeta asfáltica adicionando pavimento asfáltico reciclado a diferentes proporciones

Este ensayo se hizo bajo los lineamientos de la norma ASTM D6927-15 para estabilidad y flujo Marshall. Los ensayos adicionales como: elaboración de muestras de mezclas asfálticas utilizando aparato Marshall se hicieron de acuerdo ASTM D6926-20, Ensayo para la densidad y gravedad específica de mezclas bituminosas compactadas de acuerdo a ASTM D2726/D2726M-19 y Ensayo para la densidad y gravedad específica máxima teórica de mezclas bituminosa (RICE) de acuerdo a ASTM D2041/D2041M-19. Siguiendo los lineamientos de los ensayos mencionado se realizaron pruebas en diferentes especímenes añadiendo a la mezcla asfáltica en caliente tipo MAC-1, pavimento asfáltico reciclado (RAP), al 15%, 25%, 35% y 45%. de acuerdo a los antecedentes (Aguilar & Infanzón, 2020).

- **Resultados**

Los resultados se muestran en las tablas 78, 79, 80, 81, 82 y 83:

Tabla 78

Resultados del peso específico máximo teórico de MAC-1 adicionado con RAP.

Porcentaje de RAP			15.00%		25.00%		35.00%		45.00%	
Identificación muestra	Und		01	02	01	02	01	02	01	02
1. -	Peso del frasco	gr.	118 3	120 1	119 2	120 0	117 8	120 0	1180	120 5
2. -	Peso agua + frasco	gr.	181 6	181 6	181 6	181 6	181 6	181 6	1816	181 6



Porcentaje de RAP		15.00%		25.00%		35.00%		45.00%	
Identificación muestra	Und	01	02	01	02	01	02	01	02
3.	Peso agua + frasco + material	gr.	250 3	251 3	250 7	251 2	249 9	251 2	2499 4
4.	Volumen	gr.	496	504	501	504	495	504	497. 0
	Peso Específico Máximo MAC, g/cm ³	gr./c m3	2.38 5	2.38 3	2.37 9	2.38 1	2.38 0	2.38 1	2.37 4
	Promedio		2.384	2.380	2.380	2.380	2.375		

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 79

Diseño Marshall para MAC-1 adicionado con 15% de RAP.

ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D6927-15 / MTC E 504					
PORCENTAJES DE DISEÑO		Lectura a dial	Lectura calibración	Flujo (0,01 mm)	
Piedra Chancada	36.88%				
Arena Chancada	42.22%	290	963.78	360	
Arena Zarandeada	14.07%	300	997.14	380	
Filler	0.66%	300	997.14	400	
C.A. (PEN)	6.17%				
Σ Suma	100.0%				
C.A. (PEN)	120 - 150				
Número de Probetas	N°	1	2	3	Promedio
% Pavimento Asfáltico Reciclado	%	15.00	15.00	15.00	
1 % C.A. en peso de la Mezcla	%	5.24	5.24	5.24	
2 % de Piedra chancada en Peso de la Mezcla	%	31.34	31.34	31.34	
3 % de Arena Chancada en peso de la Mezcla	%	35.89	35.89	35.89	
4 % de Arena Zarandeada en peso de la Mezcla	%	11.96	11.96	11.96	
5 % de Filler en Peso de la Mezcla	%	0.56	0.56	0.56	
Peso Específico Pavimento Asfáltico Reciclado	gr/cc.	2.390	2.390	2.390	
6 Peso Específico Aparente de C.A.	gr/cc.	1.015	1.015	1.015	



**ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL
ASTM D6927-15 / MTC E 504**

7	Peso Específico Piedra Chancada-Bullk	gr/cc.	2.508	2.508	2.508	
8	Peso Específico Arena Chancada-Bullk	gr/cc.	2.544	2.544	2.544	
9	Peso Específico Arena Zarandeada-Bullk	gr/cc.	2.511	2.511	2.511	
10	Peso Específico del filler-Aparente	gr/cc.	3.150	3.150	3.150	
11	Altura Promedio de la Probeta	cm.	6.57	6.40	6.55	6.51
12	Peso de la briqueta en el Aire	gr.	1171.0	1161.0	1176.0	
13	Peso de la briqueta Saturada	gr.	1172.0	1162.0	1176.0	
14	Peso de la briqueta en el Agua	gr.	663.0	657.0	666.0	
15	Volumen de la briqueta por desplazamiento	c.c.	509.0	505.0	510.0	508.0
16	Peso Específico de la Probeta	gr/cc.	2.301	2.299	2.306	2.302
17	Peso Específico Máximo (Rice) ASTM D-2041	gr/cc.	2.384	2.384	2.384	
18	Peso Específico Máximo (Teórico)	gr/cc.	2.326	2.326	2.326	
19	% de Vacíos	%	3.5	3.6	3.3	3.4
20	Peso Específico Bullk del Agregado Total	gr/cc.	2.505	2.505	2.505	
21	% V.M.A. Vacíos del Agregado Mineral	%	13.0	13.0	12.8	12.9
22	% vacíos llenados con C.A.	%	73.1	72.7	74.4	73.4
23	Peso Específico Efectivo del Agregado Total	gr/cc.	2.576	2.576	2.576	
24	C.A. Absorbido por el Peso del Agregado Total	%	1.12	1.12	1.12	
25	% de Asfalto Efectivo	%	4.13	4.13	4.13	
26	Flujo (0.01 pulg)	mm	9.14	9.65	10.16	9.65
27	Estabilidad sin corregir		964	997	997	
28	Factor de Estabilidad		1.00	1.04	1.00	
29	Estabilidad corregida	kg.	964	1037	997	999
30	Factor de Rigidez	kg/cm	2677	2729	2493	2630
31	Número de Golpes por Capa		75	75	75	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 80

Resultado del diseño Marshall de MAC-1 adicionado con 25.0% RAP.

ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D6927-15 / MTC E 504						
PORCENTAJES DE DISEÑO		Lectura a dial	Lectura calibración	Flujo (0,01 mm)		
Piedra Chancada	36.88%					
Arena Chancada	42.22%	310	1726.91	360		
Arena Zarandeada	14.07%	320	1230.17	342		
Filler	0.66%	350	1303.25	350		
C.A. (PEN)	6.17%					
∑ Suma	100.0%					
C.A. (PEN)	120 - 150					
Número de Probetas		N°	1	2	3	Promedio
			25.00	25.00	25.00	
1	% C.A. en peso de la Mezcla	%	4.63	4.63	4.63	
2	% de Piedra chancada en Peso de la Mezcla	%	27.66	27.66	27.66	
3	% de Arena Chancada en peso de la Mezcla	%	31.67	31.67	31.67	
4	% de Arena Zarandeada en peso de la Mezcla	%	10.56	10.56	10.56	
5	% de Filler en Peso de la Mezcla	%	0.49	0.49	0.49	
	Peso Específico Pavimento Asfáltico Reciclado	gr/cc.	2.390	2.390	2.390	
6	Peso Específico Aparente de C.A.	gr/cc.	1.015	1.015	1.015	
7	Peso Específico Piedra Chancada-Bulk	gr/cc.	2.508	2.508	2.508	
8	Peso Específico Arena Chancada-Bulk	gr/cc.	2.544	2.544	2.544	
9	Peso Específico Arena Zarandeada-Bulk	gr/cc.	2.511	2.511	2.511	
10	Peso Específico del filler-Aparente	gr/cc.	3.150	3.150	3.150	
11	Altura Promedio de la Probeta	cm.	6.42	6.54	6.42	
12	Peso de la briqueta en el Aire	gr.	1158.0	1141.0	1164.0	
13	Peso de la briqueta Saturada	gr.	1159.0	1142.0	1166.0	
14	Peso de la briqueta en el Agua	gr.	658.0	644.0	658.0	
15	Volumen de la briqueta por desplazamiento	c.c.	501.0	498.0	508.0	502.3



**ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL
ASTM D6927-15 / MTC E 504**

16	Peso Específico de la Probeta	gr/cc.	2.311	2.291	2.291	2.298
17	Peso Específico Máximo (Rice) ASTM D-2041	gr/cc.	2.380	2.380	2.380	
18	Peso Específico Máximo (Teórico)	gr/cc.	2.333	2.333	2.333	
19	% de Vacíos	%	2.9	3.7	3.7	3.5
20	Peso Específico Bullk del Agregado Total	gr/cc.	2.490	2.490	2.490	
21	% V.M.A. Vacíos del Agregado Mineral	%	11.5	12.3	12.3	12.0
22	% vacíos llenados con C.A.	%	74.9	69.5	69.6	71.3
23	Peso Específico Efectivo del Agregado Total	gr/cc.	2.546	2.546	2.546	
24	C.A. Absorbido por el Peso del Agregado Total	%	0.89	0.89	0.89	
25	% de Asfalto Efectivo	%	3.73	3.73	3.73	
26	Flujo (0.01 pulg)	mm	9.14	8.69	8.89	8.91
27	Estabilidad sin corregir		1030	1064	1164	
28	Factor de Estabilidad		1.04	1.04	1.04	
29	Estabilidad corregida	kg.	1072	1106	1210	1129
30	Factor de Rigidez	kg/cm	2977	3235	3458	3221
	Número de Golpes por Capa		75	75	75	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 81

Resultados del diseño Marshall de MAC-1 adicionado con 35.0% de RAP.

**ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL
ASTM D6927-15 / MTC E 504**

PORCENTAJES DE DISEÑO		Lectura a dial	Lectura calibración	Flujo (0,01 mm)
Piedra Chancada	36.88%			
Arena Chancada	42.22%	340	1594.79	320
Arena Zarandeada	14.07%	360	1660.88	325
Filler	0.66%	370	1660.88	335
C.A. (PEN)	6.17%			
∑ Suma	100.0%			



**ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL
ASTM D6927-15 / MTC E 504**

C.A. (PEN)		120 - 150				
Número de Probetas		N°	1	2	3	Promedio
			35.00	35.00	35.00	
1	% C.A. en peso de la Mezcla	%	4.01	4.01	4.01	
2	% de Piedra chancada en Peso de la Mezcla	%	23.97	23.97	23.97	
3	% de Arena Chancada en peso de la Mezcla	%	27.45	27.45	27.45	
4	% de Arena Zarandeada en peso de la Mezcla	%	9.15	9.15	9.15	
5	% de Filler en Peso de la Mezcla	%	0.43	0.43	0.43	
			2.390	2.390	2.390	
6	Peso Específico Aparente de C.A.	gr/cc.	1.015	1.015	1.015	
7	Peso Específico Piedra Chancada-Bullk	gr/cc.	2.508	2.508	2.508	
8	Peso Específico Arena Chancada-Bullk	gr/cc.	2.544	2.544	2.544	
9	Peso Específico Arena Zarandeada-Bullk	gr/cc.	2.511	2.511	2.511	
10	Peso Específico del filler-Aparente	gr/cc.	3.150	3.150	3.150	
11	Altura Promedio de la Probeta	cm.	6.41	6.49	6.40	6.43
12	Peso de la briqueta en el Aire	gr.	1301.0	1158.0	1184.0	
13	Peso de la briqueta Saturada	gr.	1306.0	1159.0	1185.0	
14	Peso de la briqueta en el Agua	gr.	740.0	655.0	669.0	
15	Volumen de la briqueta por desplazamiento	c.c.	566.0	504.0	516.0	528.7
16	Peso Específico de la Probeta	gr/cc.	2.299	2.298	2.295	2.297
17	Peso Específico Máximo (Rice) ASTM D-2041	gr/cc.	2.380	2.380	2.380	
18	Peso Específico Máximo (Teórico)	gr/cc.	2.341	2.341	2.341	
19	% de Vacíos	%	3.4	3.5	3.6	3.5
20	Peso Específico Bullk del Agregado Total	gr/cc.	2.476	2.476	2.476	
21	% V.M.A. Vacíos del Agregado Mineral	%	10.9	10.9	11.0	11.0
22	% vacios llenados con C.A.	%	68.4	68.2	67.4	68.0

**ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL
ASTM D6927-15 / MTC E 504**

23	Peso Específico Efectivo del Agregado Total	gr/cc.	2.522	2.522	2.522	
24	C.A. Absorbido por el Peso del Agregado Total	%	0.75	0.75	0.75	
25	% de Asfalto Efectivo	%	3.26	3.26	3.26	
26	Flujo (0.01 pulg)	mm	8.13	8.26	8.51	8.30
27	Estabilidad sin corregir		1130	1197	1230	
28	Factor de Estabilidad		0.86	1.04	1.00	
29	Estabilidad corregida	kg.	972	1245	1230	1149
30	Factor de Rigidez	kg/cm	3038	3830	3672	3517
	Número de Golpes por Capa		75	75	75	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 82

Resultados del diseño Marshall de MAC-1 adicionado con 45.0% de RAP.

**ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL
ASTM D6927-15 / MTC E 504**

PORCENTAJES DE DISEÑO		Lectura a dial	Lectura calibración	Flujo (0,01 mm)
Piedra Chancada	36.88%			
Arena Chancada	42.22%	400	1650.97	290
Arena Zarandeada	14.07%	390	2269.22	300
Filler	0.66%	380	1753.30	300
C.A. (PEN)	6.17%			
∑ Suma	100.0%			
C.A. (PEN)	120 - 150			

Número de Probetas		Nº	1	2	3	Promedio
			45.00	45.00	45.00	
1	% C.A. en peso de la Mezcla	%	3.39	3.39	3.39	
2	% de Piedra chancada en Peso de la Mezcla	%	20.28	20.28	20.28	
3	% de Arena Chancada en peso de la Mezcla	%	23.22	23.22	23.22	
4	% de Arena Zarandeada en peso de la Mezcla	%	7.74	7.74	7.74	



**ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL
ASTM D6927-15 / MTC E 504**

5	% de Filler en Peso de la Mezcla	%	0.36	0.36	0.36	
			2.390	2.390	2.390	
6	Peso Específico Aparente de C.A.	gr/cc.	1.015	1.015	1.015	
7	Peso Específico Piedra Chancada-Bullk	gr/cc.	2.508	2.508	2.508	
8	Peso Específico Arena Chancada-Bullk	gr/cc.	2.544	2.544	2.544	
9	Peso Específico Arena Zarandeada-Bullk	gr/cc.	2.511	2.511	2.511	
10	Peso Específico del filler-Aparente	gr/cc.	3.150	3.150	3.150	
11	Altura Promedio de la Probeta	cm.	6.61	6.55	6.57	6.58
12	Peso de la briqueta en el Aire	gr.	1174.0	1165.0	1145.0	
13	Peso de la briqueta Saturada	gr.	1175.0	1166.0	1146.0	
14	Peso de la briqueta en el Agua	gr.	664.0	658.0	646.0	
15	Volumen de la briqueta por desplazamiento	c.c.	511.0	508.0	500.0	506.3
16	Peso Específico de la Probeta	gr/cc.	2.297	2.293	2.290	2.294
17	Peso Específico Máximo (Rice) ASTM D-2041	gr/cc.	2.375	2.375	2.375	
18	Peso Específico Máximo (Teórico)	gr/cc.	2.348	2.348	2.348	
19	% de Vacíos	%	3.3	3.5	3.6	3.4
20	Peso Específico Bullk del Agregado Total	gr/cc.	2.462	2.462	2.462	
21	% V.M.A. Vacíos del Agregado Mineral	%	9.8	10.0	10.1	10.0
22	% vacíos llenados con C.A.	%	66.6	65.4	64.5	65.5
23	Peso Específico Efectivo del Agregado Total	gr/cc.	2.493	2.493	2.493	
24	C.A. Absorbido por el Peso del Agregado Total	%	0.51	0.51	0.51	
25	% de Asfalto Efectivo	%	2.88	2.88	2.88	
26	Flujo (0.01 pulg)	mm	7.37	7.62	7.62	7.54
27	Estabilidad sin corregir		1330	1297	1263	
28	Factor de Estabilidad		1.00	1.04	1.04	
29	Estabilidad corregida	kg.	1330	1348	1314	1331

**ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL
ASTM D6927-15 / MTC E 504**

30	Factor de Rigidez	kg/cm	4586	4495	4380	4486
	Número de Golpes por Capa		75	75	75	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 83

Resumen del diseño Marshall para MAC-1 adicionado con diferentes porcentajes de RAP.

CUADRO RESUMEN CON PORCENTAJE DE RAP				
% Cemento Asfáltico en peso	15.00	25.00	35.00	45.00
Peso específico Probeta	2.302	2.298	2.297	2.294
Vacios	3.4	3.5	3.5	3.4
Vacios Agregado Mineral	12.94	12.00	10.95	10.00
Vacios llenados con C. Asfáltico	73.36	71.31	67.99	65.52
Flujo	9.65	8.91	8.30	7.54
Estabilidad	999	1129	1149	1331
Factor de rigidez	2630	3221	3517	4486
Estab./Fluencia	104	127	138	177

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 83 se muestra un resumen de los resultados de MAC-1 añadido con diferentes porcentajes de pavimento asfáltico reciclado. Para hallar la influencia del pavimento asfáltico reciclado (RAP) hasta mantener los parámetros de estabilidad, flujo y vacíos respecto a la mezcla asfáltica virgen y respecto a un óptimo diseño que conserve estas características con la mayor cantidad de pavimento asfáltico añadido, se procedió a elegir dicha cantidad de acuerdo a la tabla 84 y figuras 54, 55, 56, 57, 58, 59 y 60:

Tabla 84

Resultados del 39.0% óptimo de RAP adicionado al MAC-1 - comparación de parámetro mínimos.

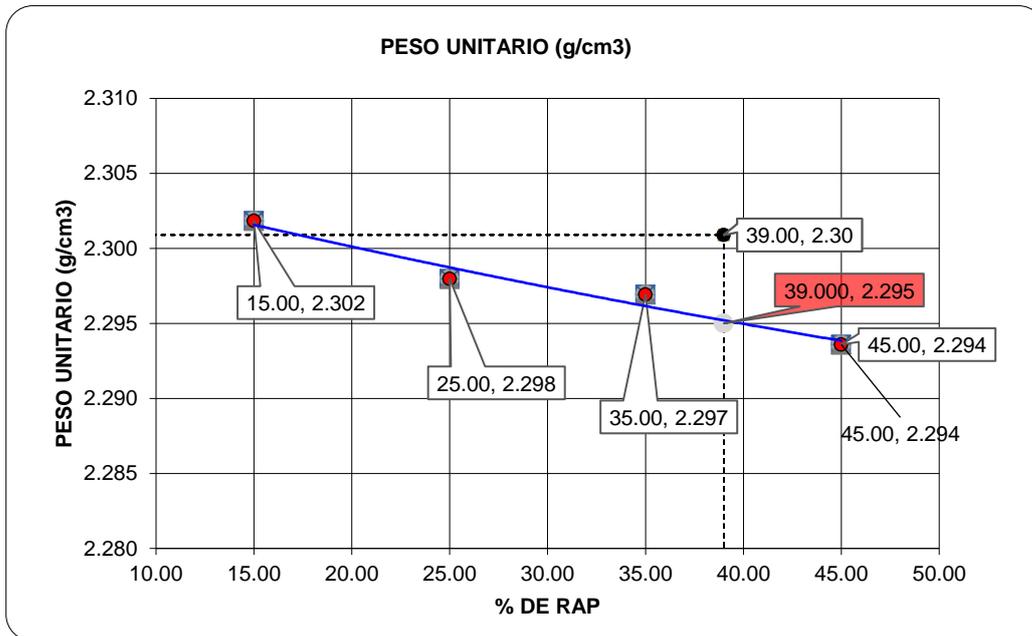
PORCENTAJE ÓPTIMO DE RAP		MIN	-	MAX
% cemento asfáltico	5.90			
% pavimento asfáltico reciclado	39.00			
Peso específico Probeta	2.295	2.301		

PORCENTAJE ÓPTIMO DE RAP		MIN	-	MAX	
Vacíos	3.600	3.609	3	-	5
Vacíos Agregado Mineral	10.800	14.359	12		
Vacíos llenados con C. Asfáltico	68.000	74.910	65	-	75
Flujo	8.000	9.398	8	-	14
Estabilidad	1240.000	1148.497	850		
Factor de rigidez	4000.000	3104.046	1700	-	4000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 54

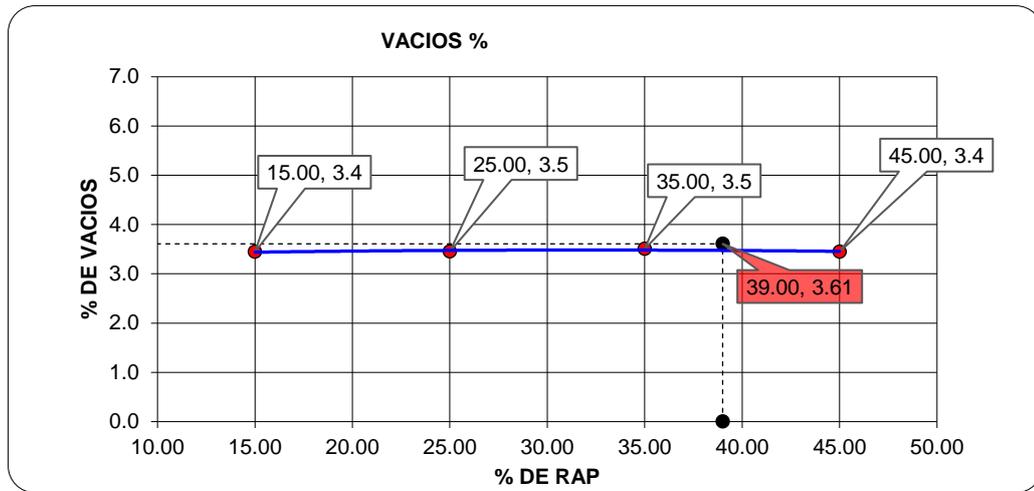
Evolución del peso específico de la combinación MAC-1 + RAP.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 55

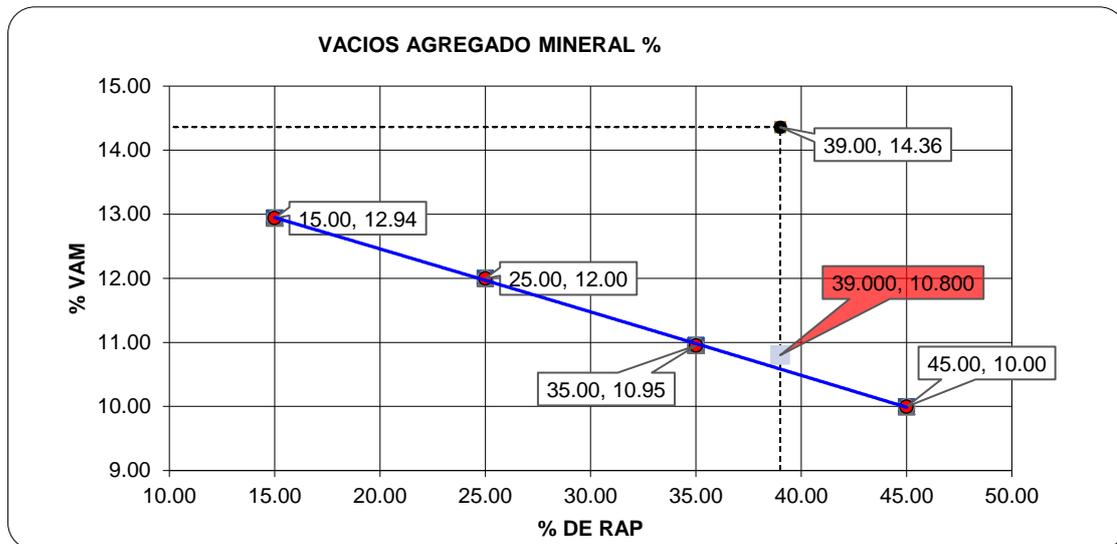
Evolución del % de vacíos de la combinación MAC-1 + RAP.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 56

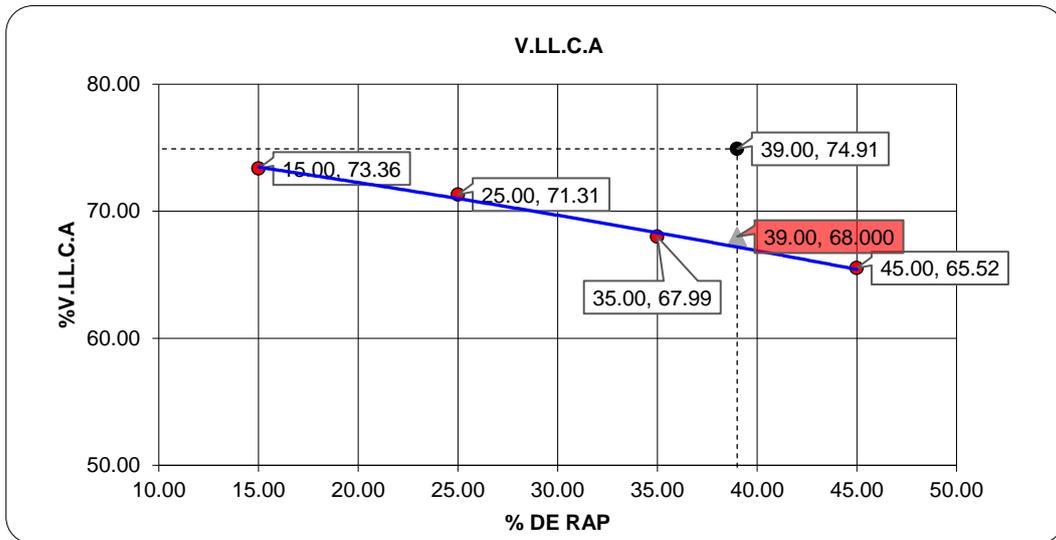
Evolución de % de VAM de la combinación MAC-1 + RAP.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 57

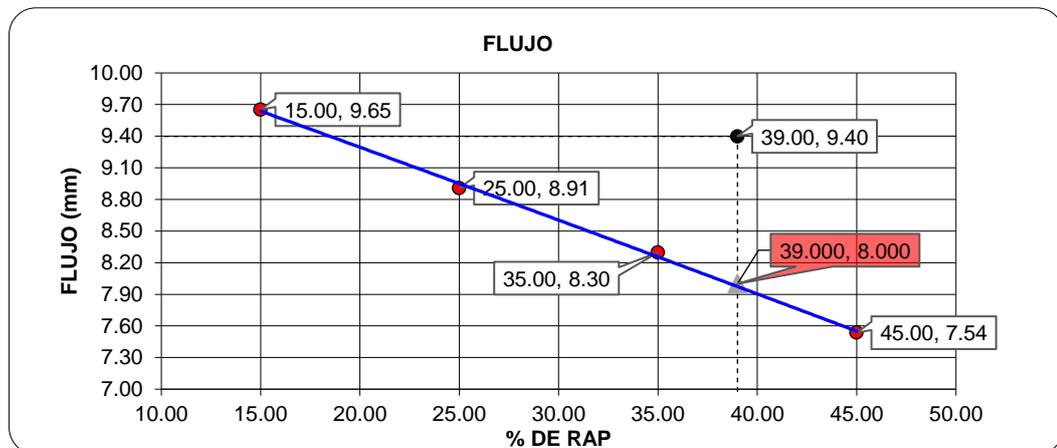
Evolución del % V.L.L.C.A. de la combinación MAC-1 + RAP.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 58

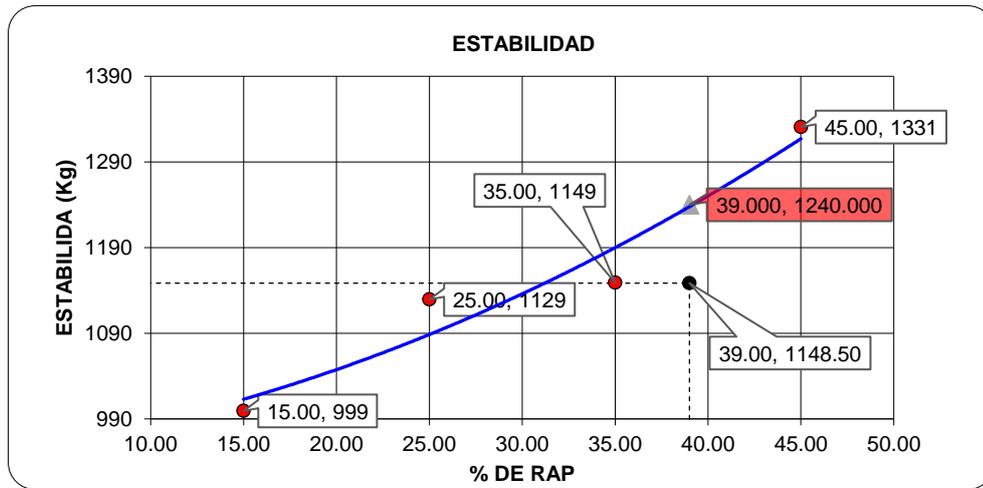
Evolución del flujo de la combinación de MAC-1 + RAP.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 59

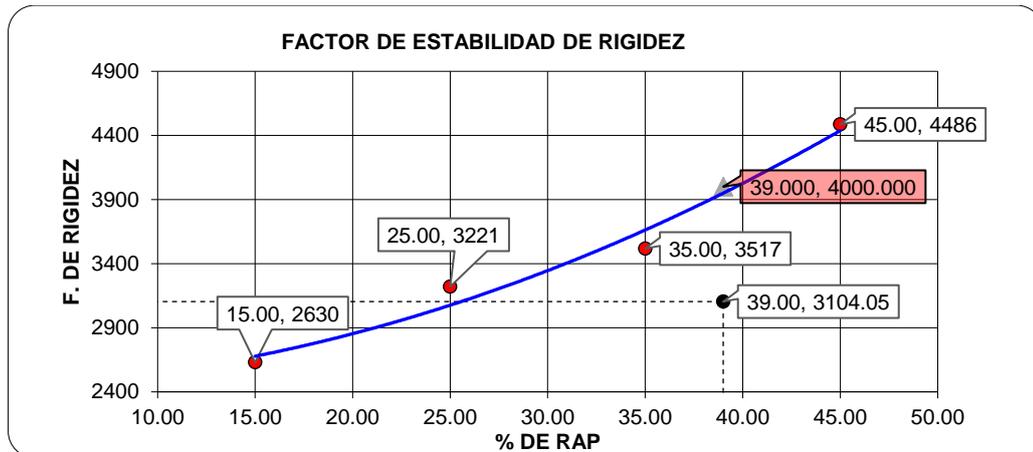
Evolución de la estabilidad de la combinación MAC-1 + RAP.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 60

Evolución del factor de rigidez de la combinación MAC-1 + RAP.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

De los resultados que se muestran en la tabla 84 y figuras 54, 55, 56, 57, 58, 59 y 60: se obtuvo como resultado (ver tabla 85):

Tabla 85*Resultados de las propiedades de la adición de RAP a MAC-1.*

% de RAP adicionado a MAC-1	Propiedad	Resultado	Observaciones
39%	Peso específico	2.295g/cm ³	
	Vacíos de aire	3.60%	
	Vacío de agregado mineral	10.80%	
	Vacíos llenados con cemento asfáltico	68.00%	
	Flujo	8mm	Este parámetro limita la adición de RAP, debido a que la estabilidad mínima requerida para un correcto diseño de mezclas es de 8mm.
	Estabilidad	1790.0 kg	este valor nos indica que está en el límite de rigidez esta combinación de MAC-1 + RAP.
	Límite de Rigidez	4000 kg/mm	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

3.6.1.5 Ensayo de Valor relativo de soporte (CBR) del material para base

adicionando pavimento asfáltico reciclado a diferentes proporciones

Este ensayo se hizo bajo los lineamientos de la norma ASTM D1883-16, pero al material para base se le añadió proporciones de pavimento asfáltico reciclado (RAP), al 15%, 30%, 45% y 60%.

Figura 61

Ensayo de CBR base granular adicionado con RAP.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

- **Resultados**

Los resultados se muestran en las tablas 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92 y 93:

Tabla 86

Resultados del ensayo de CBR de base granular adicionado con 15.0% de RAP.

CALCULO DE LA RELACIÓN DE SOPORTE CALIFORNIA (C.B.R.), BASE GRANULAR + RAP AL 15%						
Molde N°	1		2		3	
Número de capas	5		5		5	
Número de golpes	56		56		56	
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO
Peso suelo + molde (gr.)	13,635	13,698	13,317	13,421	13,258	13,372
Peso molde (gr.)	8,760	8,760	8,457	8,457	8,347	8,347
Peso suelo compactado (gr.)	4,875	4,938	4,860	4,964	4,911	5,025
Volumen del molde (cm³)	2,130	2,130	2,123	2,123	2,151	2,151
Densidad húmeda (gr./cm³)	2.289	2.318	2.289	2.338	2.283	2.336
Densidad Seca (gr./cm³)	2.133	2.136	2.131	2.135	2.133	2.089
CONTENIDO DE HUMEDAD						
Peso de tara (gr.)	38.2	38.2	39.1	39.1	28.1	28.1
Tara + suelo húmedo (gr.)	111.7	303.7	137.8	354.9	133.6	302.2



CALCULO DE LA RELACIÓN DE SOPORTE CALIFORNIA (C.B.R.), BASE GRANULAR + RAP AL 15%

Tara + suelo seco (gr.)	106.7	282.8	131.0	327.5	126.7	273.2
Peso de agua (gr.)	5.0	20.9	6.8	27.4	6.9	29.0
Peso de suelo seco (gr.)	68.5	244.6	92.0	288.4	98.6	245.2
Humedad (%)	7.3	8.5	7.4	9.5	7.0	11.8

EXPANSIÓN

Fecha	Hora	Tiempo Hr	Dial 0.01 mm	Expansión		Dial	Expansión		Dial	Expansión	
				mm	%		mm	%		mm	%
11-Nov	10:30	0	15.085	0.0 0	0.0 0	10.320	0.0 0	0.0 0	11.735	0.0 0	0.0 0
12-Nov	10:30	24	15.100	0.0 1	0.0 1	10.349	0.0 3	0.0 2	11.768	0.0 3	0.0 3
13-Nov	10:30	48	15.123	0.0 4	0.0 3	10.360	0.0 4	0.0 3	11.792	0.0 6	0.0 5
14-Nov	10:30	72	15.145	0.0 6	0.0 5	10.391	0.0 7	0.0 6	11.811	0.0 8	0.0 7
15-Nov	10:30	96	15.190	0.1 0	0.0 9	10.450	0.1 3	0.1 1	11.889	0.1 5	0.1 3

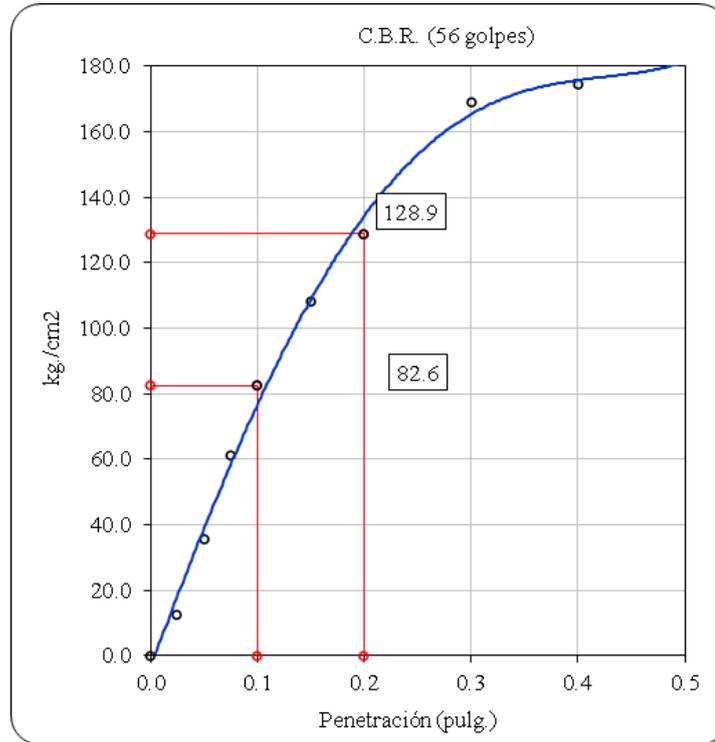
PENETRACIÓN

Penetración (pulg.)	Carga Standard (kg/cm ²)	Molde N° 1				Molde N° 2				Molde N° 3			
		Carga		Corrección		Carga		Corrección		Carga		Corrección	
		kg	kg/cm ²	kg/cm ²	CB R %	kg	kg/cm ²	kg/cm ²	CB R %	kg	kg/cm ²	kg/cm ²	CB R %
0.025		246.95	12.7			240	12.3			254	13.0		
0.050		692.56	35.6			670	34.4			680	34.9		
0.075		119.18	61.2			117.9	60.5			117.2	60.2		
0.100	70.307	160.812	82.6	82.6	11 7.4	157.6	80.9	80.9	11 5.1	164.2	84.3	84.3	11 9.9
0.150		210.609	108.1			208.4	107.0			207.3	106.4		
0.200	105.460	251.131	128.9	128.9	12 2.3	253.9	130.4	130.4	12 3.6	250.6	128.7	128.7	12 2.0
0.300		329.366	169.1			331.6	170.2			330.8	169.8		
0.400		339.507	174.3			339.8	174.4			341.4	175.3		
0.500		353.702	181.6			355.9	182.7			344.1	176.6		

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 62

Curva de esfuerzo vs penetración para base granular + RAP al 15%.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 87

Resumen de CBR de base granular + RAP al 15%.

Porcentaje de CBR (Base granulas + RAP al 15%)				Promedio
CBR (0.1")	117.4%	115.1%	119.9%	117.5%
CBR (0.2")	122.3%	123.6%	122.0%	122.6%
Den. (g/cc)	2.133	2.131	2.133	2.132

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 88

Resultado del ensayo de CBR de la base granular adicionado con RAP al 30%.

CALCULO DE LA RELACIÓN DE SOPORTE CALIFORNIA (C.B.R.), BASE GRANULAR + RAP AL 30%						
Molde N°	1		2		3	
Número de capas	5		5		5	
Número de golpes	56		56		56	
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO



CALCULO DE LA RELACIÓN DE SOPORTE CALIFORNIA (C.B.R.), BASE GRANULAR + RAP AL 30%

Peso suelo + molde (gr.)	12,929	13,070	12,489	12,555	13,311	13,450
Peso molde (gr.)	8,359	8,359	7,881	7,881	8,740	8,740
Peso suelo compactado (gr.)	4,570	4,711	4,608	4,674	4,571	4,710
Volumen del molde (cm³)	2,106	2,106	2,122	2,122	2,110	2,110
Densidad húmeda (gr./cm³)	2.170	2.237	2.172	2.203	2.166	2.232
Densidad Seca (gr./cm³)	2.024	2.069	2.030	2.012	2.019	2.002

CONTENIDO DE HUMEDAD

Peso de tara (gr.)	72.3	72.3	39.1	39.1	37.4	37.4
Tara + suelo húmedo (gr.)	293.1	522.1	236.2	342.6	196.6	360.3
Tara + suelo seco (gr.)	278.2	488.4	223.3	316.3	185.8	327.0
Peso de agua (gr.)	14.9	33.7	12.9	26.3	10.8	33.3
Peso de suelo seco (gr.)	205.9	416.1	184.2	277.2	148.4	289.6
Humedad (%)	7.2	8.1	7.0	9.5	7.3	11.5

EXPANSIÓN

Fecha	Hora	Tie mpo Hr	Dial 0.01 mm	Expansió n		Dial	Expansió n		Dial	Expansió n	
				mm	%		mm	%		mm	%
11-Nov	10:30	0	7.060	0.0 0	0. 00	10.595	0.0 0	0. 00	10.740	0.0 0	0. 00
12-Nov	10:30	24	7.070	0.0 1	0. 01	10.597	0.0 0	0. 00	10.755	0.0 2	0. 01
13-Nov	10:30	48	7.085	0.0 3	0. 02	10.610	0.0 1	0. 01	10.799	0.0 6	0. 05
14-Nov	10:30	72	7.092	0.0 3	0. 03	10.648	0.0 5	0. 05	10.821	0.0 8	0. 07
15-Nov	10:30	96	7.108	0.0 5	0. 04	10.666	0.0 7	0. 06	10.867	0.1 3	0. 11

PENETRACIÓN

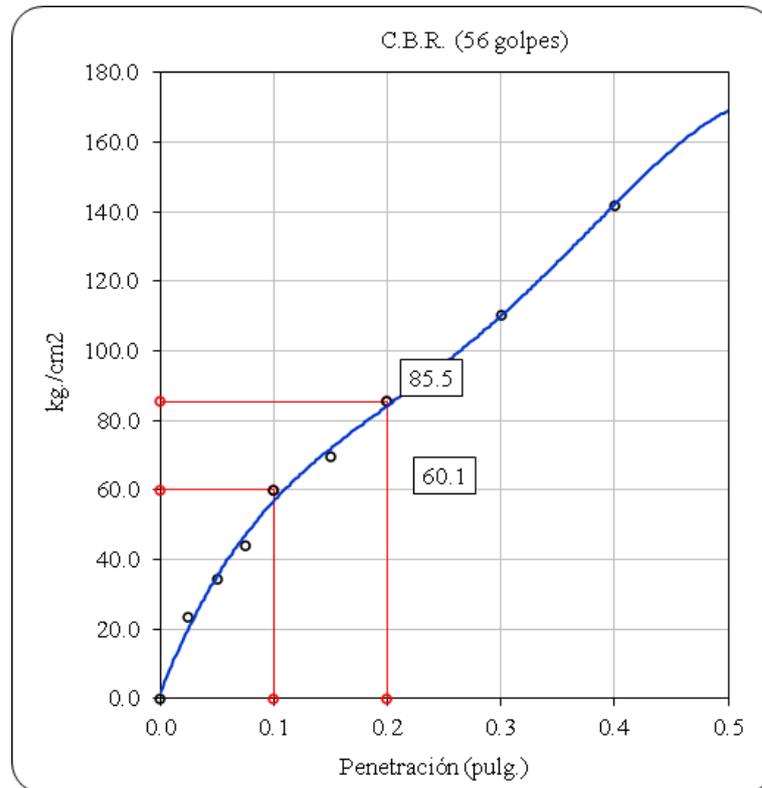
Penetración (pulg.)	Carga Standard (kg/cm ²)	Molde N° 1				Molde N° 2				Molde N° 3			
		Carga		Corrección		Carga		Corrección		Carga		Corrección	
		kg	kg/cm ²	kg/cm ²	C B R %	kg	kg/cm ²	kg/cm ²	C B R %	kg	kg/cm ²	kg/cm ²	C B R %
0.025		460. 83	23. 7			463	23.8			457	23.5		
0.050		670. 16	34. 4			671	34.4			626	32.1		
0.075		859. 48	44. 1			822	42.2			904	46.4		

CALCULO DE LA RELACIÓN DE SOPORTE CALIFORNIA (C.B.R.), BASE GRANULAR + RAP AL 30%													
0.100	70.307	117	60.	60.	85	117	60.0	60.	85	119	61.1	61.	86
		0.84	1	1	.5	0		0	.4	0		1	.9
0.150		135	69.			139	71.6			140	72.1		
		3.92	5			4				4			
0.200	105.460	166	85.	85.	81	167	85.8	85.	81	167	85.9	85.	81
		5.05	5	5	.1	1		8	.4	3		9	.5
0.300		214	110			218	112.			218	112.		
		6.72	.2			1	0			7	3		
0.400		276	141			276	141.			274	140.		
		3.06	.9			3	9			2	8		
0.500		329	169			335	172.			327	168.		
		3.66	.1			0	0			3	0		

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 63

Curva esfuerzo vs penetración para base granular + RAP al 30%.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 89

Resumen del CBR de base granular +RAP 30%.

Porcentaje de CBR (Base granular + RAP al 30%)				Promedio
CBR (0.1")	85.5%	85.4%	86.9%	85.9%
CBR (0.2")	81.1%	81.4%	81.5%	81.3%
Den. (g/cc)	2.024	2.030	2.019	2.024

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 90

Resultado del CBR de base granular adicionado con RAP al 45%.

CALCULO DE LA RELACIÓN DE SOPORTE CALIFORNIA (C.B.R.), BASE GRANULAR + RAP AL 45%											
Molde N°	1		2		3						
Número de capas	5		5		5						
Número de golpes	56		56		56						
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO					
Peso suelo + molde (gr.)	12,645	12,768	12,341	12,397	13,312	13,454					
Peso molde (gr.)	8,255	8,255	7,935	7,935	8,825	8,825					
Peso suelo compactado (gr.)	4,390	4,513	4,406	4,462	4,487	4,629					
Volumen del molde (cm ³)	2,119	2,119	2,123	2,123	2,177	2,177					
Densidad húmeda (gr./cm ³)	2.072	2.130	2.076	2.102	2.061	2.126					
Densidad Seca (gr./cm ³)	1.933	1.969	1.935	1.905	1.928	1.931					
CONTENIDO DE HUMEDAD											
Peso de tara (gr.)	36.5	36.5	35.1	35.1	40.0	40.0					
Tara + suelo húmedo (gr.)	220.9	319.1	161.8	385.2	198.5	373.3					
Tara + suelo seco (gr.)	208.5	297.7	153.3	352.4	188.3	342.7					
Peso de agua (gr.)	12.4	21.4	8.6	32.8	10.2	30.6					
Peso de suelo seco (gr.)	172.1	261.3	118.2	317.4	148.3	302.7					
Humedad (%)	7.2	8.2	7.3	10.3	6.9	10.1					
EXPANSIÓN											
Fecha	Hora	Tiempo Hr	Dial 0.01 mm	Expansión		Dial	Expansión		Dial	Expansión	
				mm	%		mm	%		mm	%
11-Nov	10:30	0	3.645	0.0	0.00	8.825	0.0	0.00	9.633	0.0	0.00
12-Nov	10:30	24	3.680	0.0	0.03	8.849	0.0	0.02	9.651	0.0	0.02
13-Nov	10:30	48	3.700	0.0	0.05	8.885	0.0	0.05	9.684	0.0	0.04
14-Nov	10:30	72	3.725	0.0	0.07	8.898	0.0	0.06	9.700	0.0	0.06
15-Nov	10:30	96	3.725	0.0	0.07	8.928	0.1	0.09	9.725	0.0	0.08
PENETRACIÓN											
			Molde N° 1		Molde N° 2		Molde N° 3				

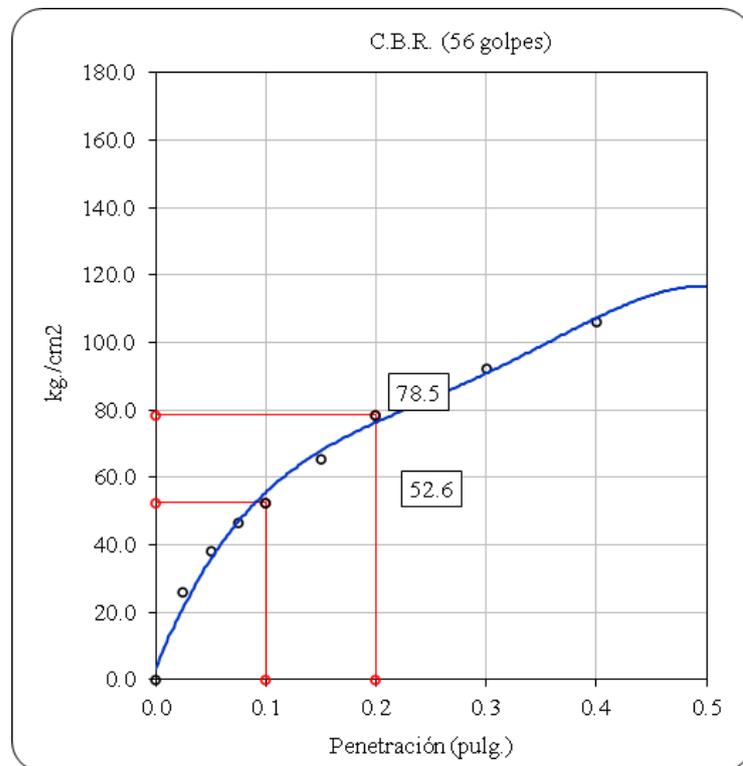
CALCULO DE LA RELACIÓN DE SOPORTE CALIFORNIA (C.B.R.), BASE GRANULAR + RAP AL 45%

Penetración (pulg.)	Carga Standard (kg/cm ²)	Carga		Corrección		Carga		Corrección		Carga		Corrección	
		kg	kg/cm ²	kg/cm ²	C B R %	kg	kg/cm ²	kg/cm ²	C B R %	kg	kg/cm ²	kg/cm ²	C B R %
0.025		505.63	26.0			438	22.5			494	25.3		
0.050		744.47	38.2			749	38.5			785	40.3		
0.075		908.33	46.6			866	44.4			847	43.5		
0.100	70.307	102.434	52.6	52.6	74.8	103.5	53.1	53.1	75.6	101.8	52.2	52.2	74.3
0.150		127.561	65.5			131.4	67.5			125.9	64.7		
0.200	105.460	152.984	78.5	78.5	74.5	152.8	78.4	78.4	74.4	154.0	79.1	79.1	75.0
0.300		179.312	92.1			175.0	89.8			180.5	92.7		
0.400		206.748	106.1			203.9	104.7			208.5	107.1		
0.500		227.775	116.9			230.5	118.3			232.5	119.4		

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 64

Curva de esfuerzo vs penetración para base granular + RAP al 45%.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 91

Resumen del CBR de granular + RAP al 45%.

Porcentaje de CBR (Base granulas + RAP al 45%)				Promedio
CBR (0.1")	74.8%	75.6%	74.3%	74.9%
CBR (0.2")	74.5%	74.4%	75.0%	74.6%
Den. (g/cc)	1.933	1.935	1.928	1.932

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 92

Resultados del CBR de base granular adicionado con RAP al 60%.

CALCULO DE LA RELACIÓN DE SOPORTE CALIFORNIA (C.B.R.), BASE GRANULAR + RAP AL 60%						
Molde Nº	1		2		3	
Número de capas	5		5		5	
Número de golpes	56		56		56	
Condición de la muestra	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO	NO SATURADO	SATURADO
Peso suelo + molde (gr.)	13,580	13,701	12,650	12,828	13,305	13,498
Peso molde (gr.)	9,225	9,225	8,276	8,276	8,946	8,946
Peso suelo compactado (gr.)	4,355	4,476	4,374	4,552	4,359	4,552
Volumen del molde (cm ³)	2,116	2,116	2,126	2,126	2,119	2,119
Densidad húmeda (gr./cm ³)	2.058	2.115	2.057	2.141	2.057	2.148
Densidad Seca (gr./cm ³)	1.921	1.947	1.917	1.945	1.923	1.952
CONTENIDO DE HUMEDAD						
Peso de tara (gr.)	16.3	16.3	87.9	87.9	85.3	85.3
Tara + suelo húmedo (gr.)	127.0	129.3	351.4	595.1	305.5	471.2
Tara + suelo seco (gr.)	119.6	120.3	333.5	548.7	291.1	435.9
Peso de agua (gr.)	7.4	9.0	17.9	46.4	14.3	35.3
Peso de suelo seco (gr.)	103.4	104.0	245.6	460.8	205.9	350.6
Humedad (%)	7.1	8.7	7.3	10.1	7.0	10.1
EXPANSIÓN						
Fecha	Hora	Tiempo Hr	Dial 0.01 mm	Expansión mm %	Dial	Expansión mm %



CALCULO DE LA RELACIÓN DE SOPORTE CALIFORNIA (C.B.R.), BASE GRANULAR + RAP AL 60%

11-Nov	10: 30	0	1.990	0.0 0	0. 00	1.980	0.0 0	0. 00	0.921	0.0 0	0. 00
12-Nov	10: 30	24	2.015	0.0 3	0. 02	1.998	0.0 2	0. 02	0.945	0.0 2	0. 02
13-Nov	10: 30	48	2.021	0.0 3	0. 03	2.035	0.0 6	0. 05	0.989	0.0 7	0. 06
14-Nov	10: 30	72	2.029	0.0 4	0. 03	2.035	0.0 6	0. 05	1.000	0.0 8	0. 07
15-Nov	10: 30	96	2.039	0.0 5	0. 04	2.045	0.0 6	0. 06	1.005	0.0 8	0. 07

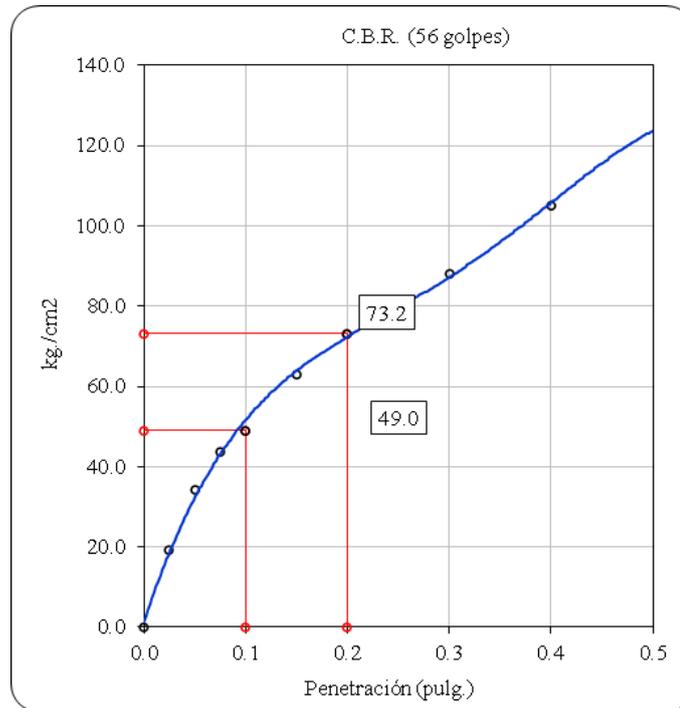
PENETRACIÓN

Penetración (pulg.)	Carga Standard (kg/cm ²)	Molde N° 1				Molde N° 2				Molde N° 3							
		Carga		Corrección		Carga		Corrección		Carga		Corrección					
		kg	kg/cm ²	kg/cm ²	C B R %	kg	kg/c m ²	kg/cm ²	C B R %	kg	kg/c m ²	kg/cm ²	C B R %				
0.025		377. 32	19. 4							341	17.5			362	18.6		
0.050		668. 13	34. 3							617	31.7			637	32.7		
0.075		853. 38	43. 8							817	41.9			837	43.0		
0.100	70.307	955. 14	49. 0	49. 0	69 .7	943	48.4	48. 4	68 .9	961	49.3	49. 3	70 .1				
0.150		122 8.82	63. 1			125 4	64.4			122 3	62.8						
0.200	105.460	142 5.11	73. 2	73. 2	69 .4	142 3	73.0	73. 0	69 .2	143 8	73.8	73. 8	70 .0				
0.300		171 3.84	88. 0			172 3	88.5			168 3	86.4						
0.400		204 7.16	105 .1			203 9	104. 7			219	11.3						
0.500		241 0.79	123 .8			238 6	122. 5			240 2	123. 3						

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 65

Curva de esfuerzo vs penetración para base granular + RAP al 60%.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 93

Resumen del CBR de base granular + RAP al 60%.

Porcentaje de CBR (Base granular + RAP al 60%)				Promedio
CBR (0.1")	69.7%	68.9%	70.1%	69.6%
CBR (0.2")	69.4%	69.2%	70.0%	69.5%
Den. (g/cc)	1.921	1.917	1.923	1.921

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

A continuación, se muestra el resumen de los resultados para la base granular añadida con pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 0%, 15%, 30%, 45% y 60%.

Tabla 94

Resumen de características de base granular añadida con RAP a diferentes porcentajes.

RESUMEN DE RESULTADOS CON ADICIÓN DE RAP A LA BASE GRANULAR												
% de pavimento asfáltico reciclado	0% de RAP		15% DE RAP		30% DE RAP		45% DE RAP		60% DE RAP			
No Golpes	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56

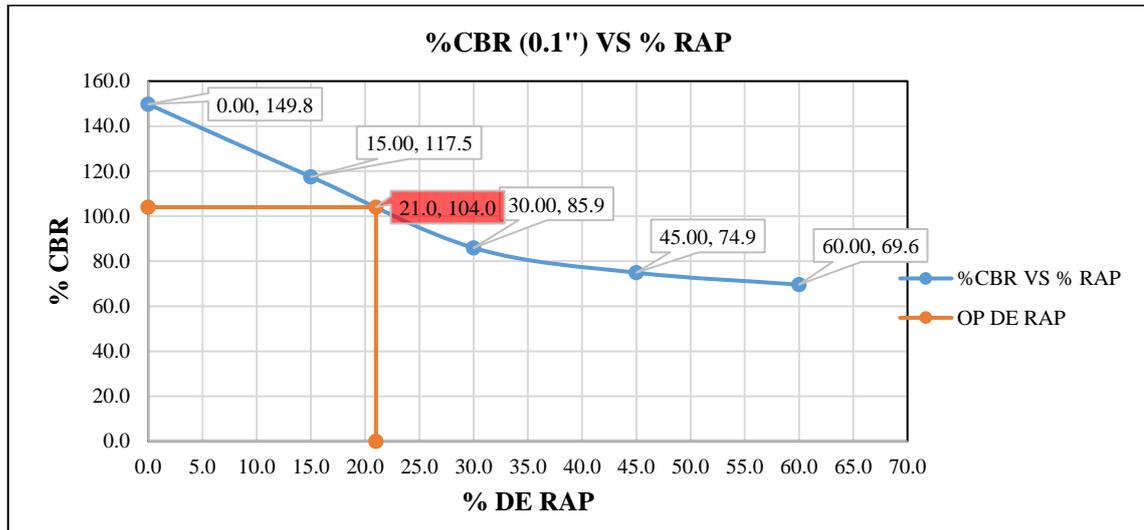
RESUMEN DE RESULTADOS CON ADICIÓN DE RAP A LA BASE GRANULAR															
% de pavimento asfáltico reciclado	0% de RAP			15% DE RAP			30% DE RAP			45% DE RAP			60% DE RAP		
CBR (0.1")	15	14	14	11	11	11	85	85	86	74	75	74	69	68	70
	0.	9.	9.	7.	5.	9.	.5	.4	.9	.8	.6	.3	.7	.9	.1
	5	8	0	4	1	9									
Promedio CBR (0.1")	149.8			117.5			85.9			74.9			69.6		
CBR (0.2")	15	15	15	12	12	12	81	81	81	74	74	75	69	69	70
	3.	4.	8.	2.	3.	2.	.1	.4	.5	.5	.4	.0	.4	.2	.0
	9	5	2	3	6	0									
Promedio CBR (0.2")	155.5			122.6			81.3			74.6			69.5		
Máxima Densidad seca (g/cm3)	2.	2.	2.	2.	2.	2.	2.	2.	2.	1.	1.	1.	1.	1.	1.
	14	14	14	13	13	13	02	03	01	93	93	92	92	91	92
	0	1	2	3	1	3	4	0	9	3	5	8	1	7	3
Promedio Máxima Densidad seca (g/cm3)	2.141			2.132			2.024			1.932			1.921		
% Contenido de humedad	7.	7.	7.	7.	7.	7.	7.	7.	7.	7.	7.	6.	7.	7.	7.
	30	05	04	30	40	00	20	00	30	20	30	90	10	30	00
	2	1	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% de expansión	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	10	12	18	09	11	13	04	06	11	07	09	08	04	06	07
	3	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Para realizar la elección del contenido óptimo de pavimento asfáltico reciclado añadido a la base granular, se realiza de acuerdo a las figuras 66, 67 y 68.

Figura 66

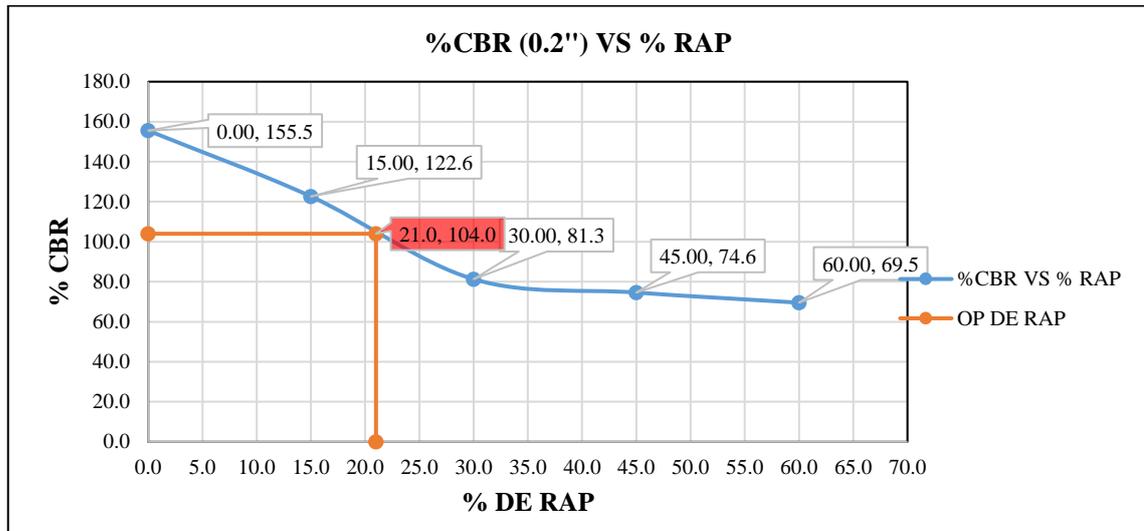
Evolución de % de CBR (0.1") para base granular + RAP.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 67

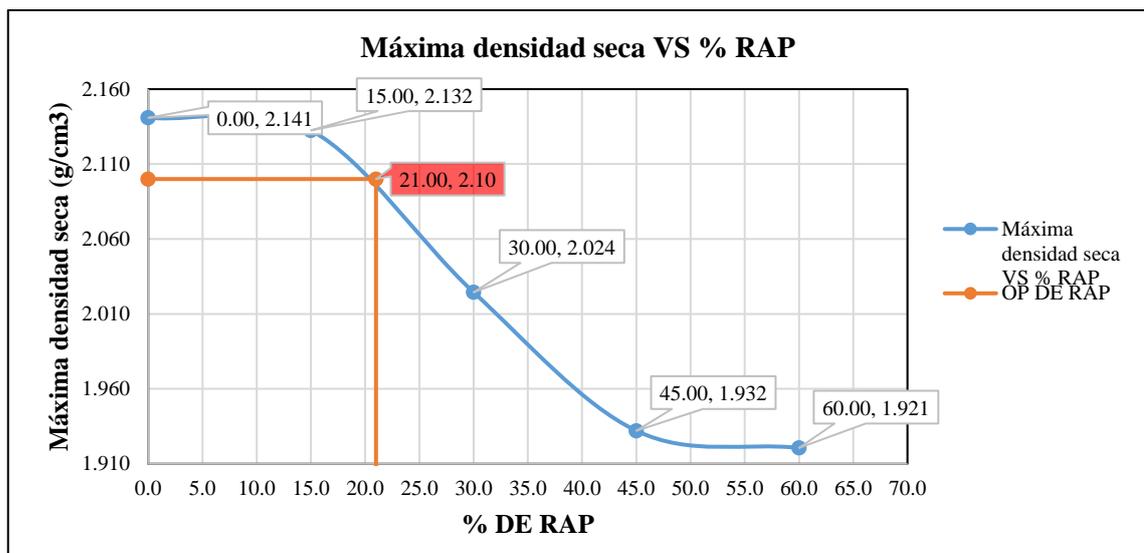
Evolución de % de CBR (0.2'') para base granular + RAP.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 68

Evolución de la máxima densidad seca para la base granular + RAP.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

De las figuras 66, 67 y 68. se tiene que con una adición de pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 21% en peso de la mezcla total, el CBR a una penetración de 0.1'' es de 104%, a una penetración de 0.2'' es de 104% y la máxima densidad seca es de 2.100 gr/cm³. Por lo tanto, para mantener el CBR mayor o igual al 100% de la combinación de base granular adicionado con RAP es de 21.0%.



3.7 DISEÑO ESTADÍSTICO Y PRUEBA DE HIPÓTESIS

3.7.1 Análisis estadístico

Es de gran importancia en la evaluación y análisis de los resultados obtenidos ya que nos permite tener una certeza de la confiabilidad de los valores obtenidos de las pruebas, el cual seguirá el siguiente procedimiento. (Córdova, 2003, pág. 49).

a) Rango de datos (R_x)

Es la diferencia entre el máximo y el mínimo valor de un conjunto de datos.

$$R_x = X_{max} - X_{min}$$

b) Numero de intervalos de clase (K)

Este valor se calcula con una regla de Sturges que está relacionado con la cantidad de datos (N).

$$K = 1 + 3.3 \times \log N$$

c) Tamaño de intervalos de clase

Se calculó con la siguiente relación:

$$C = \frac{R_x}{K}$$

d) Medidas de tendencia central

Las tres medidas que más comúnmente se emplean son la media, mediana y moda.

- La media aritmética (u)

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n f_i * X_i}{n}$$

Donde:

u = media aritmética

X= variable estadística discreta

n= número de elementos.

- Mediana(u_m)

Se calculó con la siguiente formula.

$$u_m = L_m + \left[\frac{\frac{n}{2} - F_{m-1}}{f_m} \right] * C_m$$

Donde:

Lm: Límite inferior del intervalo de clase de la Mediana.

n: Número total de datos.

Fm-1: Frecuencia acumulada del intervalo de clase que antecede al intervalo de la Mediana.

fm: Frecuencia absoluta del intervalo de clase de la Mediana.

Cm: Ancho del intervalo de clase de la mediana.

- Moda (u_0)

Se calculó con la siguiente fórmula.

$$u_0 = L_0 + \left[\frac{f_0 - f_{0-1}}{(f_0 - f_{0-1}) + (f_0 - f_{0+1})} \right] * C_0$$

Donde:

Lo : Extremo inferior del intervalo modal (intervalo que tiene mayor frecuencia absoluta).

fo : Frecuencia absoluta del intervalo modal.

fo-1 : Frecuencia absoluta del intervalo anterior al modal.

fo+1 : Frecuencia absoluta del intervalo posterior al modal.

Co : Ancho del intervalo de clase de la moda.

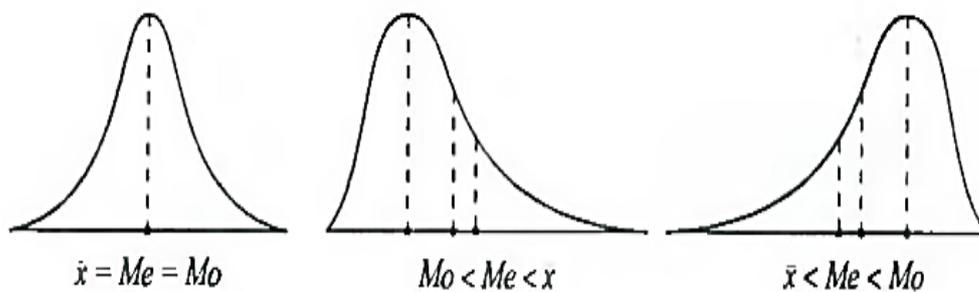
Relación entre la media, mediana y moda, tal como se muestra en la figura 69.

- ✓ Si media=moda=mediana, distribución simétrica perfecta.
- ✓ Si media>mediana, distribución asimétrica con cola a la derecha.
- ✓ Si media<mediana, distribución asimétrica con cola a la izquierda.

Fuente: Adaptado de (Cordova, 2003)- pág. 51

Figura 69

Distribución campana de Gauss.



Fuente: (Cordova, 2003)- pág. 51.

e) Medidas de dispersión central

- La varianza (σ^2)

$$\rho^2 = \frac{\sum_{i=1}^n f_i (X_i - u)^2}{n - 1}$$

- Desviación estándar (σ)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_i (X_i - u)^2}{n - 1}}$$

- Coeficiente de variación (C_v)

$$C_v = \frac{\sigma}{u} \times 100$$

3.7.2 Prueba de hipótesis

El esquema para realizar la prueba de hipótesis es la siguiente:



a) Identificar el parámetro de interés:

b) Establecer la hipótesis nula (H_0)

En la presente investigación se plantea la siguiente hipótesis nula $H_0: u_1 \geq u_2$.

c) Especificar una apropiada hipótesis alternativa (H_a):

- Si $H_a: u_1 > u_2$, significa que la región crítica se encuentra en la cola superior de la distribución normal del estadístico de prueba
- Si $H_a: u_1 < u_2$, significa que la región crítica se encuentra en la cola inferior de la distribución normal del estadístico de prueba

Para fines de esta investigación se plantea, $H_a: u_1 < u_2$.

d) Seleccionar el nivel de significancia

- $\alpha = 0.10$ con 90% de probabilidad de certeza.
- $\alpha = 0.05$ con 95% de probabilidad de certeza.
- $\alpha = 0.01$ con 99% de probabilidad de certeza.

e) **Establecer el estadístico de prueba**

El estadístico de prueba permite rechazar o aceptar la hipótesis propuesta según al valor que se obtenga y al nivel de significancia.

Si se tienen dos muestras en estudio y se quieren comparar una con la otra, el estadístico de prueba será: Prueba Z (z Test_2 Samp)

- Procedimiento de cálculo

$$Z_0 = \frac{u_1 - u_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\rho_2^2}{n_2}}}$$

Donde:

Z_0 : Estadístico de prueba. (Normal).

u_1, u_2 : Resistencia promedio de los dos grupo.

σ_1, σ_2 : Desviación estándar de los dos grupo.

n_1, n_2 : Cantidad especímenes de los dos grupo

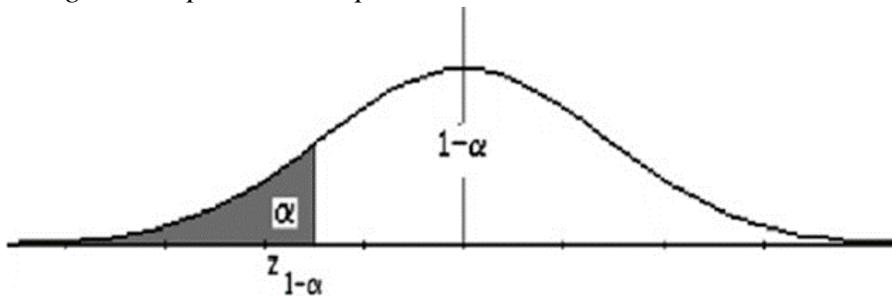
Donde se considera que, si ambas poblaciones presentan una distribución Normal, entonces la distribución de $X_1 - X_2$, también será una distribución Normal con media $u_1 - u_2$ y varianza $\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}$

Las puntuaciones Z nos indican la dirección y el grado en que un valor individual obtenido se aleja de la media (u) en una escala de unidades de desviación estándar.

f) Establecer la región de rechazo para el estadístico

Figura 70

Rango de aceptación de hipótesis nula.



Fuente: (Cordova, 2003)-

Entonces se rechaza la hipótesis nula, si $Z_0 < Z$ (Z adquiere valores negativos, por tratarse de una hipótesis alternativa unilateral con cola inferior de la distribución normal).



CAPITULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo presentamos los resultados de estabilidad, flujo, pesos específicos, resistencia a la tracción directa de la mezcla asfáltica en caliente virgen con el contenido óptimo de cemento asfáltico al 5.9% con respecto al peso total de la mezcla. También se presentan resultado se estabilidad, flujo, peso específico de la mezcla asfáltica reciclada con una adición de cemento asfáltico al 1.25% en peso de la mezcla total. También se presentan los resultados para la mezcla asfáltica virgen adicionada con pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 15%, 25%, 35% y 45%.

Se presentan los resultados de % de CBR a una penetración de 0.1" y 0.2" para la muestra patrón base granulas y para los especímenes de muestra de base granular añadido con pavimento asfáltico reciclado al 15%, 30%, 45% y al 60% de peso de la combinación total.

4.1 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE PARA CARPETA ASFÁLTICA (MUESTRA PATRÓN)

Se realizó el diseño de mezcla asfáltica en caliente (método Marshall) con gradación granulométrica tipo MAC-1, con tamaño máximo nominal de agregados de 3/4" y tamaño máximo de 1", se utilizó como material llenante (filler) cemento portland tipo IP y cemento asfáltico PEN 120-150. Se realizaron ensayos para conocer las propiedades mecánicas variando la cantidad de cemento asfáltico a un 5.5%, 6.0%, 6.5% y 7.0% en peso de la mezcla total.

4.1.1 Resultados de ensayo de Flujo Marshall de la muestra patrón (Mezcla asfáltica en caliente tipo MAC-1)

En la tabla 95 se muestra los resultados del ensayo de flujo Marshall de la mezcla asfáltica tipo MAC-1 adicionado con cemento asfáltico al 5.5%, 6.0% 6.5 % y 7.0%. Con un 5.9% de cemento asfáltico de peso total de la mezcla se tiene un 9.4 mm de flujo (flujo comprobado en laboratorio) el cual está dentro de los parámetros requeridos por (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013) en la sección 423, de ser como mínimo debe ser 8.0 mm y máximo 14mm de acuerdo. También se muestra los resultados de comprobación realizados en laboratorio para un contenido de 5.9% de cemento asfáltico.

Tabla 95

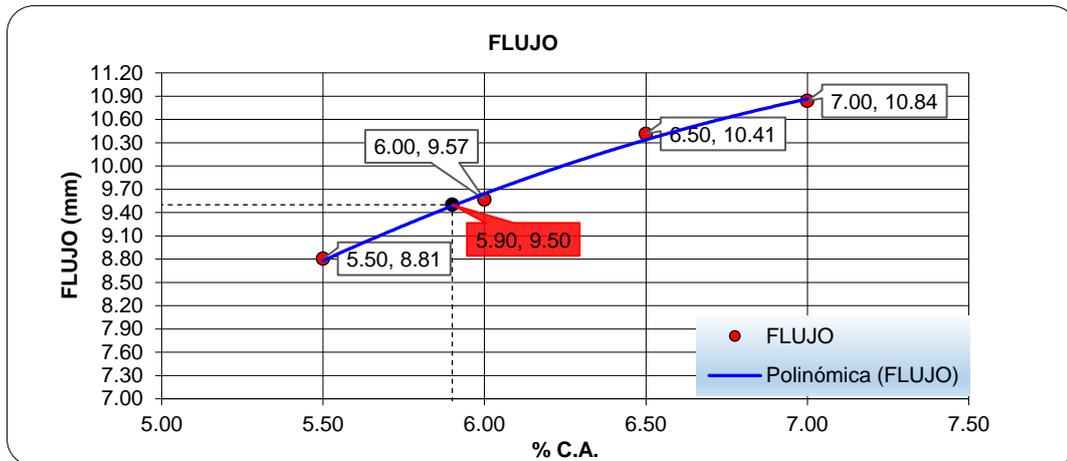
Valores de flujo del diseño Marshall para MAC-1.

Ensayo de Flujo Marshall (MAC-1)				
Probeta No	% de Cemento Asfáltico	Lectura del dial (0.01 plg)	Flujo (mm)	Flujo Promedio (mm)
1		350	8.89	
2	5.5%	320	8.13	8.81
3		370	9.40	
1		350	8.89	
2	5.9%	370	9.40	9.40
3		390	9.91	
1		350	8.89	
2	6.0%	390	9.91	9.57
3		390	9.91	
1		410	10.41	
2	6.5%	420	10.67	10.41
3		400	10.16	
1		450	11.43	
2	7.0%	450	11.43	10.84
3		380	9.65	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 71

Resultados para el flujo de la combinación MAC-1 + PEN 120-150.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación

De la curva mostrada en la figura 71 se puede deducir que el flujo aumenta si el porcentaje de cemento asfáltico aumenta, para el contenido óptimo de cemento asfáltico 5.9% se tiene un flujo de 9.4mm, este contenido óptimo se toma, debido a que, mientras mayor flujo se tenga disminuye la cantidad de vacíos (mínimo 3% y máximo 5%).

4.1.2 Resultados de ensayo de estabilidad Marshall de la muestra patrón (Mezcla asfáltica en caliente tipo MAC-1)

En la tabla 96 se muestra los resultados del ensayo de estabilidad Marshall para las diferentes combinaciones de cemento asfáltico, que nos da como resultado óptimo un contenido de asfalto de 5.9% de peso total de la mezcla asfáltica en caliente, para el cual su estabilidad teórica promedio es de 1175 kg (de acuerdo a la figura 72) y su estabilidad promedio comprobada en laboratorio es de 1148kg (se muestra en la tabla).

Tabla 96

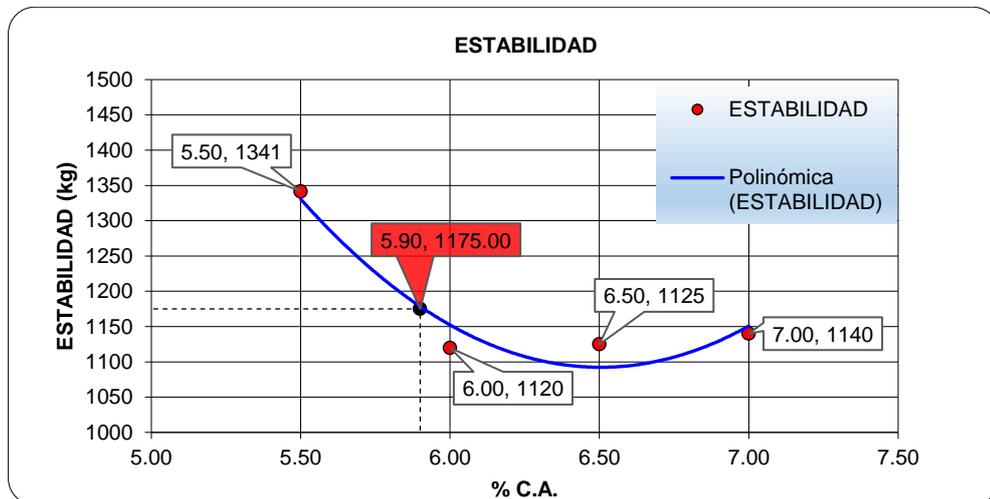
Valores de estabilidad del diseño Marshall para MAC-1.

Ensayo de Estabilidad Marshall (MAC-1)						
Probeta No	% de Cemento Asfáltico	Lectura del dial	Lectura de calibración (kg)	Volumen de la probeta (cm ³)	Estabilidad (kg)	Estabilidad Promedio (kg)
1	5.5%	465	1545.18	538.00	1437.0	1341
2		400	1329.80	548.00	1183.5	
3		440	1462.42	524.00	1403.9	
1	5.9%	300	997.14	501.00	1037.0	1148
2		350	1163.67	511.00	1163.7	
3		360	1196.92	507.00	1244.8	
1	6.0%	275	913.73	502.00	950.3	1120
2		365	1213.55	508.00	1262.1	
3		345	1147.03	509.00	1147.0	
1	6.5%	350	1163.67	535.00	1117.1	1125
2		380	1263.39	539.00	1175.0	
3		350	1163.67	537.00	1082.2	
1	7.0%	370	1230.17	539.00	1144.1	1140
2		350	1163.67	539.00	1082.2	
3		386	1283.32	541.00	1193.5	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 72

Resultados de estabilidad para MAC-1 + PEN 120-150.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación

De la curva que se muestra en la figura 72, en cuanto se da un incremento en el contenido de cemento asfáltico, la estabilidad de la mezcla asfáltica en caliente tiende a

disminuir, de acuerdo a (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013) en la tabla 423-06 se requiere una estabilidad mínima de 850 kg, por lo tanto la estabilidad teórica de 1175 kg y la estabilidad comprobada en laboratorio de 1145 kg se encuentran dentro del rango permisible requerido.

4.1.3 Resultados de peso específico a diferentes % de cemento asfáltico de la muestra patrón (Mezcla asfáltica en caliente tipo MAC-1)

En la tabla 97 se muestra los resultados de peso específico para las diferentes cantidades de cemento asfáltico añadido y para el contenido óptimo de cemento asfáltico 5.9%, para este último mencionado el peso específico promedio comprobado en laboratorio es de 2.301 gr/cm³.

Tabla 97

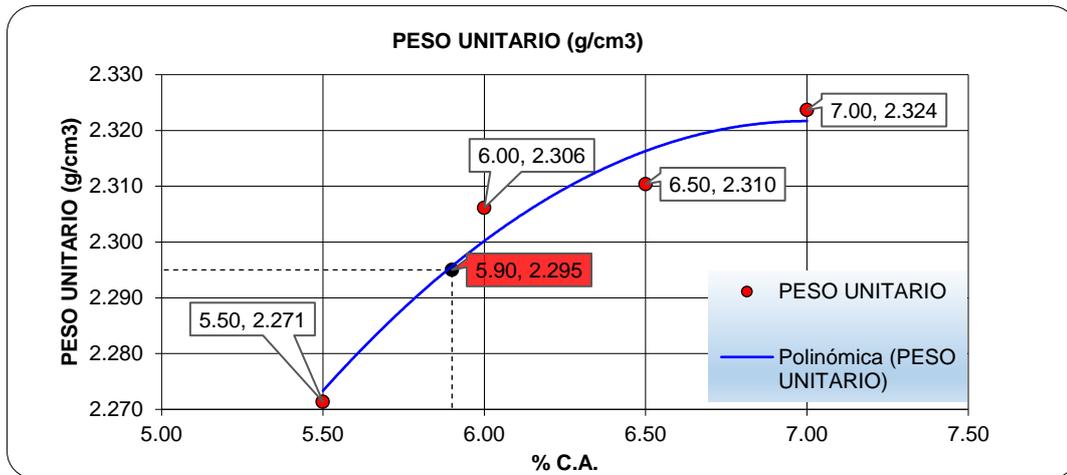
Valores de peso específico para MAC-1 a diferentes porcentajes de PEN 120-150.

Peso específico MAC-1			
Probeta No	% de Cemento Asfáltico	Peso específico (gr/cm ³)	Flujo Promedio (mm)
1		2.253	
2	5.5%	2.204	2.271
3		2.357	
1		2.303	
2	5.9%	2.290	2.301
3		2.310	
1		2.307	
2	6.0%	2.307	2.306
3		2.305	
1		2.310	
2	6.5%	2.310	2.310
3		2.311	
1		2.325	
2	7.0%	2.323	2.324
3		2.323	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 73

Resultados del peso unitario para MAC-1 + PEN 120-150.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación

De acuerdo la figura 73 podemos deducir que a medida que incrementa la cantidad de cemento asfáltico en la mezcla aumenta el peso unitario de las probetas, esto es debido a que al incrementar la cantidad de cemento asfáltico estos llenan los vacíos de aire en la probeta. Por lo tanto, para un contenido de óptimo de 5.9% tenemos 2.301 gr/cm³, con el cual el contenido de vacíos se encuentra dentro de los parámetros permisibles.

4.1.4 Resultados del % de vacíos de la Mezcla asfáltica en caliente tipo MAC-1

En la tabla 98 se presentan los resultados del contenido de vacíos para los diferentes porcentajes de cemento asfáltico y para el contenido óptimo de cemento asfáltico (5.9%) en la mezcla asfáltica en caliente tipo MAC-1, el cual tiene un % de vacío comprobado en laboratorio promedio de 3.61 %.

Tabla 98

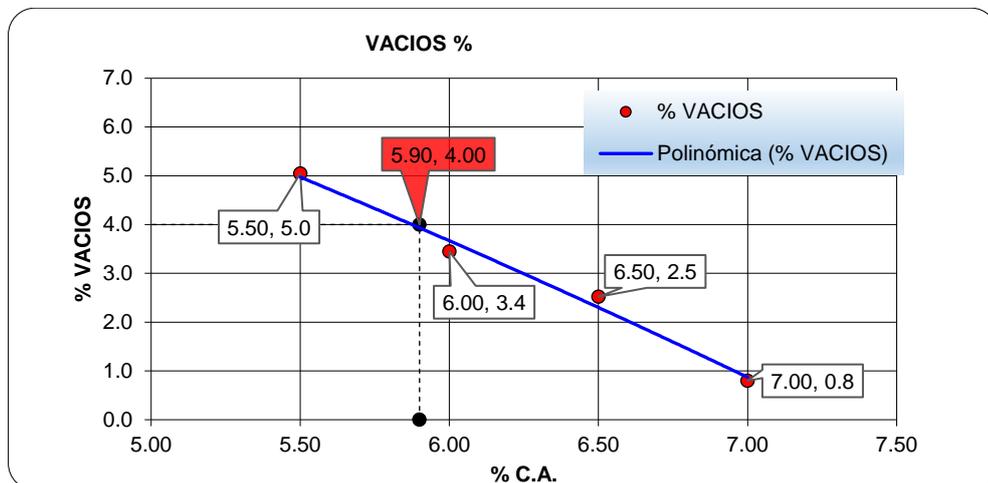
Valores de % de vacíos para MAC-1 a diferentes porcentajes de PEN 120-150.

% de vacíos (MAC-1)			
Probeta No	% de Cemento Asfáltico	% de vacíos	% de Vacíos Promedio
1		5.82	
2	5.5%	7.85	5.05
3		1.47	
1		3.50	
2	5.9%	4.08	3.61
3		3.24	
1		3.42	
2	6.0%	3.41	3.45
3		3.51	
1		2.52	
2	6.5%	2.54	2.52
3		2.49	
1		0.75	
2	7.0%	0.83	0.80
3		0.81	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 74

Resultados de % de vacíos para MAC-1 + PEN 120-150.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación

De la recta mostrada en la figura 74, deducimos que mientras aumenta la cantidad de asfalto en la mezcla asfáltica en caliente decrece la cantidad de vacíos de aire, esto es

debido a que el ligante asfáltico mientras mayor sea, mayor será la capacidad para llenar los espacios con aire de las probetas.

4.1.5 Resultados del ensayo de efecto de la humedad en mezclas asfálticas

(Lottman Modificado) de la muestra patrón (Mezcla asfáltica en caliente tipo MAC-1)

El contenido de cemento asfáltico para la mezcla asfáltica en caliente tipo MAC-1 es de 5.9% del peso total de la mezcla, en gráficos y tablas anteriores se muestran los resultados y los criterios por el cual se toma este porcentaje óptimo. Una vez obtenido dicha cantidad óptima se sometió al ensayo del efecto de la humedad en mezclas asfálticas (Lottman modificado), cuyos resultados se muestran en la tabla 99:

Tabla 99

Valores de resistencia a la tracción de MAC-1 a 5.9% de PEN.

Condiciones		Porcentaje	5.9 % de PEN (óptimo - Diseño Marshall)					
			Briqueta en Condición Normal			Briqueta sometida a Condiciones Críticas		
Identificación muestra	Und		01	02	03	01	02	03
1	Peso seco	gr.	1177.0	1167.0	1161.0	1135.0	1145.0	1139.0
2	Peso sumergido superficialmente seco	gr.	1180.0	1170.0	1163.0	1138.0	1148.0	1142.0
3	Peso sumergido	gr.	674.0	665.0	679.0	649.0	653.0	649.0
4	volumen final (por desplazamiento de agua)	cm ³	506.00	505.00	484.0	489.0	495.00	493.00
5	Diámetro	cm	10.15	10.15	10.14	10.10	10.11	10.11
6	Altura	cm	6.32	6.39	6.37	6.34	6.30	6.31
7	Volumen inicial	cm ³	511.37	517.04	514.41	507.95	505.75	506.55

Porcentaje

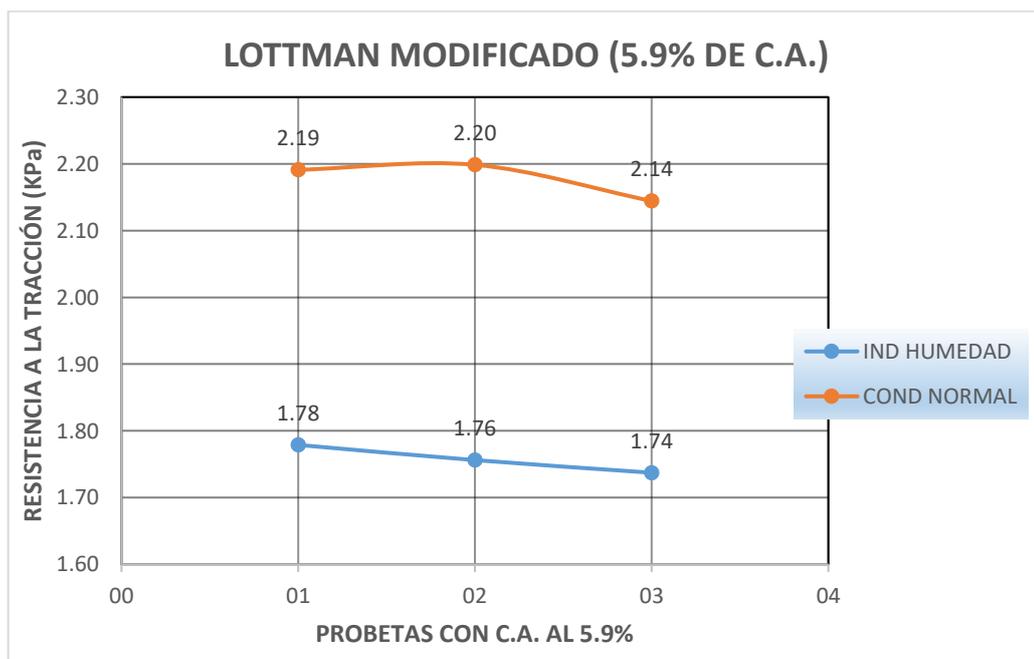
5.9 % de PEN (óptimo - Diseño Marshall)

Condiciones		Briqueta en Condición Normal			Briqueta sometida a Condiciones Críticas			
Identificación muestra	Und	01	02	03	01	02	03	
8	Variación de volumen	%	1.05	2.33	5.91	3.73	2.12	2.67
9	Peso específico de la briqueta	gr./cm ³	2.33	2.31	2.40	2.32	2.31	2.31
10	Lectura del dial	mm	680.00	690.00	670.00	550.00	540.00	535.00
11	Conversión lectura de dial	Kgf	2252.85	2285.59	2220.10	1825.8 ₃	1792.8 ₇	1776.3 ₉
12	Resistencia a la Tracción	Kpa	2.19	2.20	2.14	1.78	1.76	1.74
13	Promedio			2.18		1.76		
14	Relación de resistencia a la tracción	%			80.69			

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 75

Resultado de resistencia a la tracción para MAC-1 + 5.9% de PEN.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.



Interpretación

Las probetas en estado crítico fueron sometidos a congelamiento y calentamiento con baño maría (figura 75), se optó por esta opción debido a que en nuestra zona (Región Puno) durante la madrugada, las temperaturas pueden descender a $-14.0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Los resultados obtenidos de las probetas con contenido asfáltico óptimo sometidos al daño inducido por humedad, nos muestran que la relación de la resistencia a la tracción es del 80.69% (figura 75), esto es debido a que al someter a situaciones críticas a las probetas estas tienden a comprimirse durante la etapa de congelamiento y a expandirse o hincharse durante la etapa de calentamiento en baño maría, lo cual provoca y cambio de volumen brusco en sus primeras etapas, y por lo tanto, a reducir la resistencia a la tracción, así como se muestra en la tabla 99.

4.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (RAP)

Para el pavimento asfáltico reciclado (RAP) se realizaron los ensayos de extracción cuantitativa de cemento asfáltico, granulometría, ensayo de estabilidad y flujo Marshall, ensayo de daño inducido por humedad (Lottman modificado). Estos ensayos se realizaron para conocer las propiedades mecánicas iniciales del pavimento asfáltico reciclado (RAP).

4.2.1 Resultados de ensayo extracción cuantitativa de cemento asfáltico del pavimento asfáltico reciclado (RAP)

Se realizó el ensayo de extracción cuantitativa de cemento asfáltico de 03 muestras de pavimento asfáltico reciclado (RAP) de la Av. La Torre – Puno. En la tabla 100 se presentan como resultado un contenido de cemento asfáltico promedio de 5.17 %.

Tabla 100*Valores de contenido de asfalto en el RAP.*

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	M1	M2	M3
PESO INICIAL DE LA MUESTRA	gr.	1433	1480	1400
PESO DE MUESTRA LAVADA	gr.	1368	1414	1337
PESO INICIAL DE FILTRO	gr.	46.89	45.8	47.2
PESO FINAL DE FILTRO	gr.	56.02	54.8	57.8
PESO DE RESIDUO DE MEZCLA ASFÁLTICA	gr.	74.13	75	73.6
CEMENTO ASFÁLTICO	%	5.17	5.07	5.26
PROMEDIO DE CEMENTO ASFÁLTICO		5.17%		

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación

El promedio de % de contenido de cemento asfáltico es de 5.17%, de acuerdo a los antecedentes las mezclas asfálticas en caliente tienen un promedio de contenido de asfalto óptimo entre 5.5% y 7% de peso de la mezcla total. Por lo cual, este resultado nos indica que, por el envejecimiento, daño por carga (grietas y fisuras en la carpeta de rodadura) y daño de la intemperie que sufrió el pavimento asfáltico reciclado durante su tiempo de vida útil perdió cierto porcentaje de su cemento asfáltico óptimo con el que fue diseñado.

4.2.2 Resultados de ensayo de granulometría de los agregados del pavimento asfáltico reciclado (RAP)

Una vez realizada la extracción cuantitativa de cemento asfáltico del pavimento asfáltico reciclado (RAP), se realizó el ensayo de granulometría de los agregados resultantes del lavado asfáltico, el cual se asemeja a huso granulométrico para mezclas asfálticas en caliente tipo MAC-1, teniendo como tamaño máximo nominal 3/4" y como tamaño máximo 1". Dichos porcentajes retenidos en los tamices se muestran en tabla 101:

Tabla 101

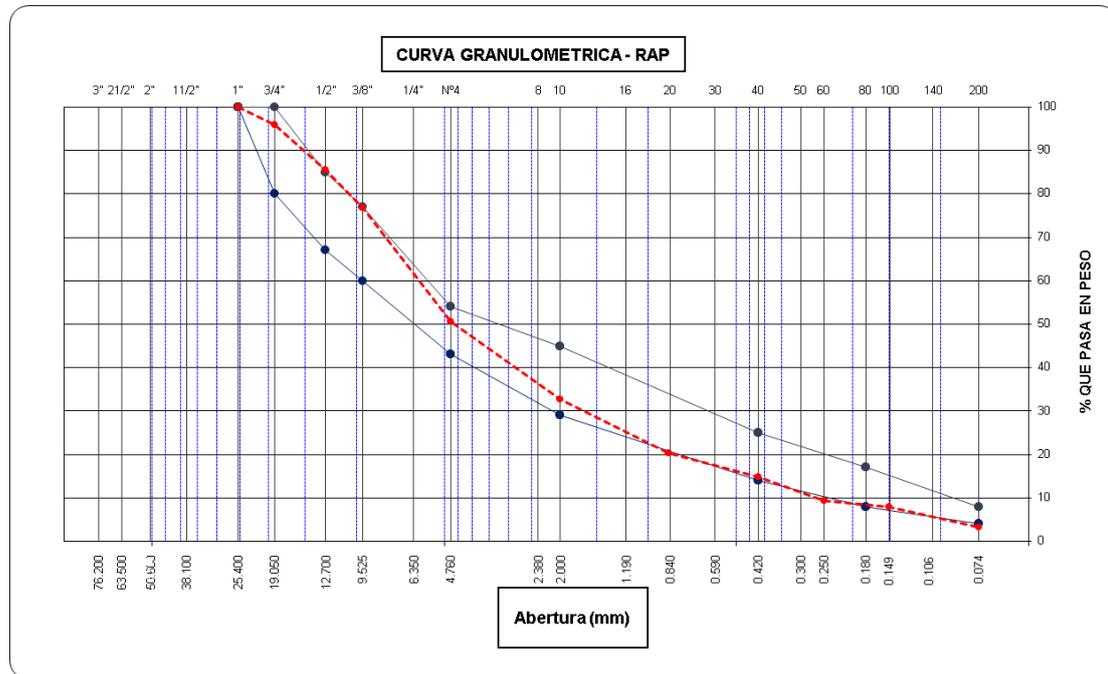
Clasificación de los resultados de granulometría de los agregados contenidos en el RAP.

Tamices ASTM	Abertura (mm)	Peso Retenido	Retenido Parcial	Retenido Acumulado	Porcentaje que Pasa	HUSO MAC - 1	
1 1/2"	37.500	0.0	0.0	0.0			
1"	25.400	0.0	0.0	0.0	100.0	100	100
3/4"	19.000	55.6	4.2	4.2	95.9	80	100
1/2"	12.700	138.9	10.4	14.5	85.5	67	85
3/8"	9.520	115.7	8.6	23.1	76.9	60	77
1/4"	6.350		0.0	0.0		0	0
N° 4	4.750	351.2	26.2	49.3	50.7	43	54
N° 8	2.360		0.0	0.0		0	0
N° 10	2.000	241.2	18.0	67.3	32.7	29	45
N° 16	1.190		0.0	0.0		0	0
N° 20	0.850	166.0	12.4	79.7	20.3	0	0
N° 30	0.600		0.0	0.0		0	0
N° 40	0.420	72.8	5.4	85.1	14.9	14	25
N° 50	0.300		0.0	0.0		0	0
N° 60	0.250	75.4	5.6	90.8	9.3	0	0
N° 80	0.180		0.0	0.0	100.0	8	17
N° 100	0.150	18.8	1.4	92.2	7.8	0	0
N° 140	0.106		0.0	0.0		0	0
N° 200	0.074	60.3	4.5	96.7	3.3	4	8
Pasante		45.0	3.4	100.0			

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 76

Curva granulométrica para el RAP.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación

La curva granulométrica resultante se asemeja a los parámetros dados para el huso granulométricos de mezclas asfálticas en calientes tipo MAC-1 de acuerdo a (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013) en la sección 423. Por lo cual, se deduce que el pavimento asfáltico reciclado de la Av. La Torre – Puno para cumplir con su vida útil, fue diseñado con los parámetros de mezcla asfáltica en caliente tipo MAC-1.

4.2.3 Resultados de ensayo de Flujo Marshall del pavimento asfáltico reciclado (RAP)

En la tabla 102 se muestra los resultados del ensayo de flujo Marshall del pavimento asfáltico reciclado adicionado con cemento asfáltico para recuperar su propiedad de flujo, el cual como mínimo debe ser 8.0 mm y máximo 14mm de acuerdo a

(Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013) en la sección 423. Para lo cual con una adición del 1.5% de cemento asfáltico tiene un flujo de 8.89 mm. De acuerdo al gráfico para un porcentaje de asfalto de 1.25% (óptimo) del peso de RAP, se alcanza un flujo de 8.0 mm. El porcentaje óptimo de 1.25% de cemento asfáltico será sustentado de acuerdo a los vacíos promedio de cada una de las probetas.

Tabla 102

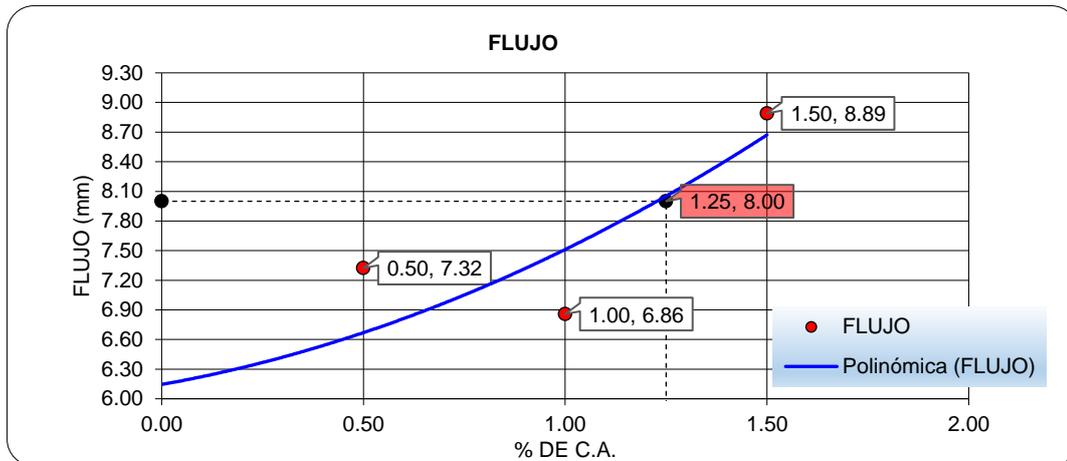
Valores de flujo para RAP añadido con PEN 120-150.

Ensayo de Flujo Marshall (RAP + cemento asfáltico)				
Probeta No	% de Cemento Asfáltico	Lectura del dial (0.01 plg)	Flujo (mm)	Flujo Promedio (mm)
1	0.0%	220	5.59	5.93
2		250	6.35	
3		230	5.84	
1	0.5%	265	6.73	7.32
2		300	7.62	
3		300	7.62	
1	1.0%	300	7.62	6.86
2		300	7.62	
3		210	5.33	
1	1.5%	350	8.89	8.89
2		360	9.14	
3		340	8.64	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 77

Resultados de flujo para RAP + PEN 120-150.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación

Como se muestra en la figura 77 el flujo del pavimento asfáltico reciclado aumenta directamente proporcional a porcentaje de cemento asfáltico añadido, por lo cual mientras mayor sea la cantidad de cemento asfáltico añadido al RAP aumentará la propiedad del flujo. Un flujo de 8 mm es lo mínimo requerido para poder adicionar el pavimento asfáltico reciclado a la una mezcla asfáltica en caliente virgen, de acuerdo al grafico a un 1.25% de cemento asfáltico se tiene 8.0 mm de flujo.

4.2.4 Resultados de ensayo de estabilidad Marshall del pavimento asfáltico reciclado (RAP)

En la tabla 103 se muestran los resultados del ensayo de estabilidad Marshall para el pavimento asfáltico reciclado (RAP) adicionado con cemento asfáltico al 0%, 0.5%, 1.0 % y 1.5% del peso del RAP, de acuerdo a la figura 78 un 1.25% de cemento asfáltico se tiene una estabilidad de 1400.0 kg el cual es mayor a lo requerido por la (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013) en la tabla 423-06 (requisitos para concreto bituminoso).

Tabla 103

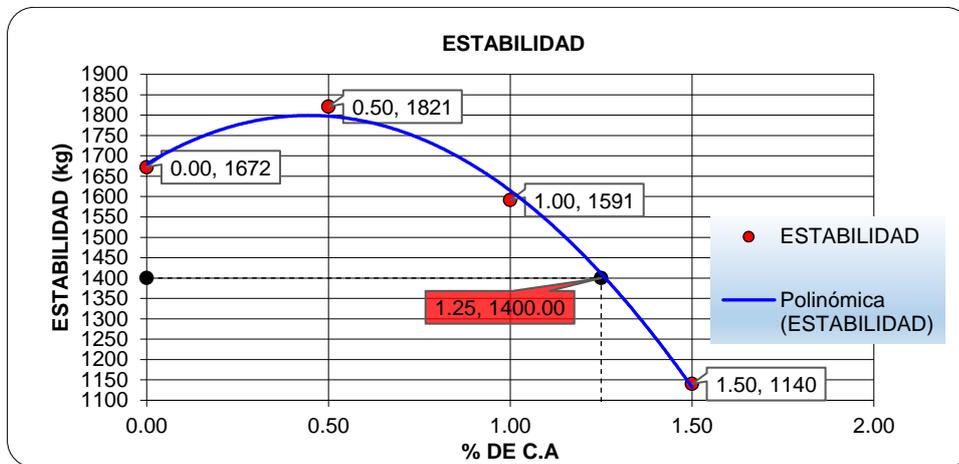
Valores de estabilidad para RAP adicionado con PEN 120-150.

Ensayo de Estabilidad Marshall (RAP + cemento asfáltico)						
Probeta No	% de Cemento Asfáltico	Lectura del dial	Lectura de calibración (kg)	Volumen de la probeta (cm ³)	Estabilidad (kg)	Estabilidad Promedio (kg)
1	0.0%	592	1964.0824	541.00	1826.60	1672.08
2		515	1710.40827	549.00	1522.26	
3		540	1792.8727	544.00	1667.37	
1	0.5%	572	1898.28307	546.00	1765.40	1820.84
2		499	1657.57921	505	1723.88	
3		640	2121.74292	539	1973.22	
1	1.0%	567	1881.82337	539	1750.10	1591.21
2		579	1921.32003	543	1786.83	
3		400	1329.79999	541	1236.71	
1	1.5%	370	1230.16723	538	1144.06	1139.92
2		350	1163.66638	538	1082.21	
3		386	1283.3224	543	1193.49	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 78

Resultados de estabilidad para RAP + PEN 120-150.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación

De acuerdo a la figura 78 la curva de estabilidad tiende a decrecer, mientras mayor sea la cantidad de cemento asfáltico añadido al pavimento asfáltico reciclado (RAP), esto es debido el cemento asfáltico que contine el RAP durante su tiempo de vida útil a perdido

su capacidad de flexibilidad en el pavimento asfáltico, por lo tanto, de acuerdo a estos datos y la curva de estabilidad, deducimos que mientras más cemento asfáltico se añade menor es la rigidez del pavimento asfáltico reciclado.

4.2.5 Resultados de peso específico a diferentes % de cemento asfáltico añadido al pavimento asfáltico reciclado (RAP)

Tabla 104

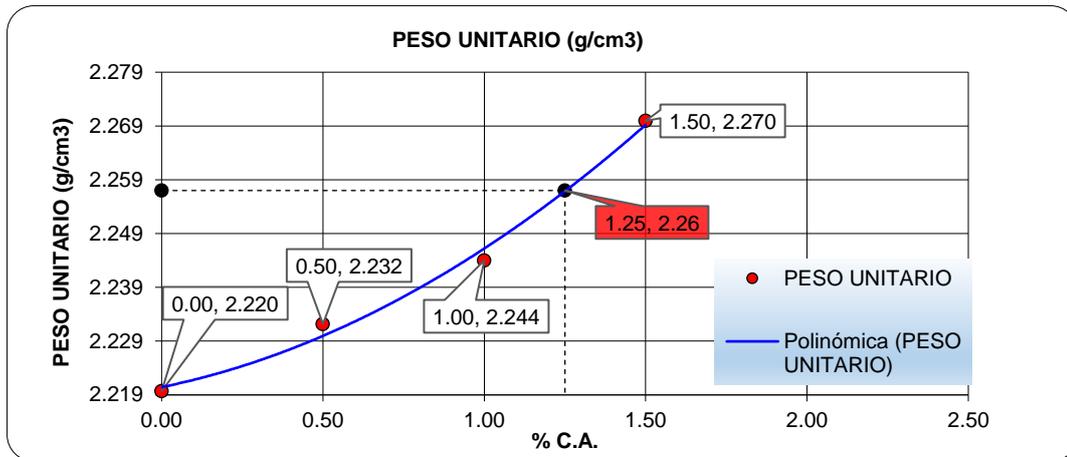
Valores de peso específico para RAP + PEN 120-150.

Peso específico (RAP + cemento asfáltico)			
Probeta No	% de Cemento Asfáltico	Peso específico (gr/cm ³)	Peso específico promedio (gr/cm ³)
1		2.227	
2	0.0%	2.222	2.220
3		2.210	
1		2.251	
2	0.5%	2.212	2.232
3		2.234	
1		2.234	
2	1.0%	2.225	2.244
3		2.274	
1		2.283	
2	1.5%	2.266	2.270
3		2.262	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 79

Resultados de peso unitario para RAP + PEN 120-150.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación

De la curva peso unitario de la probeta vs % de cemento asfáltico podemos deducir que a mayor cantidad añadida de cemento asfáltico al pavimento asfáltico reciclado (figura 79) aumenta el peso unitario de la probeta, esto es debido a que el cemento asfáltico ocupa los vacíos de aire en la probeta y por lo tanto esta se vuelve más compacta a medida que se aumenta el cemento asfáltico, en tal caso el óptimo contenido de cemento asfáltico 1.25% añadido al pavimento asfáltico reciclado es de 1.260 gr/cm³.

4.2.6 Resultado de vacíos a diferentes % de cemento asfáltico añadido al pavimento asfáltico reciclado (RAP)

En la tabla 105 se muestra los resultados del % de vacíos para los distintos porcentajes de cemento asfáltico añadido al pavimento asfáltico reciclado (RAP), para lo cual de acuerdo a este parámetro de definió que la cantidad óptima de cemento asfáltico a añadir al RAP es de 1.25% del peso de la mezcla, ya que, a este porcentaje alcanza un % de vacío del 4.0% y según a (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013) en la tabla 423-06, pide un mínimo de 3.0% y un máximo de 5.0%.

Tabla 105

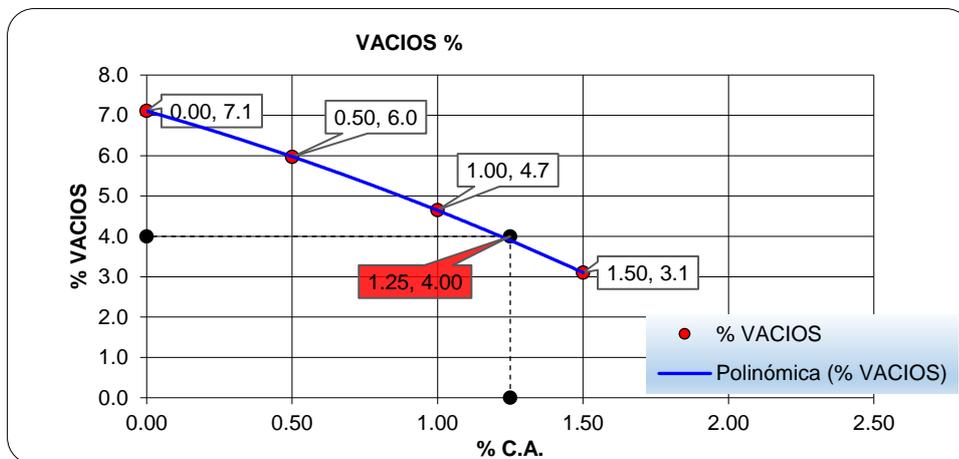
Valores de % de vacíos de RAP adicionado con PEN 120-150.

% de vacíos (RAP + cemento asfáltico)			
Probeta No	% de Cemento Asfáltico	% de vacíos	% de Vacíos Promedio
1		6.790	
2	0.0%	7.005	7.11
3		7.535	
1		5.179	
2	0.5%	6.824	5.97
3		5.902	
1		5.088	
2	1.0%	5.474	4.65
3		3.397	
1		2.563	
2	1.5%	3.278	3.10
3		3.461	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 80

Resultados del % de vacíos para RAP + PEN 120-150.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación

De acuerdo a la figura 80 el % de vacíos decrece mientras aumenta el % de cemento asfáltico añadido, se puede apreciar el gráfico que el pavimento asfáltico reciclado sin añadir cemento asfáltico tiene un % de vacíos de 7.11%, el RAP añadido 1.5% tiene un contenido de vacíos de 3.1%, por lo tanto, deducimos que para un contenido



adecuado de vacíos que es 4.0% el contenido óptimo de asfalto a añadir al RAP es de 1.25%.

4.3 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE PATRÓN ADICIONADO CON PAVIMENTOS ASFÁLTICO RECICLADO (RAP)

Una vez conocida el contenido óptimo de cemento asfáltico para la muestra patrón que es el 5.9% de peso total de la mezcla asfáltica en caliente, se adicionó pavimento asfáltico reciclado (con contenido óptimo de asfalto de 1.25% del peso total) en diferentes cantidades como es al 15%, 25%, 35% y 45% de peso total de la mezcla, para lo cual realizando análisis y comparaciones entre las propiedades de estabilidad, flujo, contenido de vacíos, densidad de la probeta, factor de rigidez, se encontró que con 39%, de pavimento asfáltico reciclado adicionado a la mezcla asfáltica virgen, mantiene sus propiedades y parámetros mínimos de estabilidad y contenido de vacíos.

4.3.1 Resultados de ensayo de Flujo Marshall de mezcla asfáltica en caliente adicionado con pavimentos asfáltico reciclado (RAP)

En la tabla 106 se muestran los resultados del ensayo de flujo Marshal realizado a la combinación de MAC-1 añadido con pavimento asfáltico reciclado, el cual resultó que el 39.0% de pavimento asfáltico reciclado a añadir al MAC-1, mantiene la propiedad mínima del flujo que es de 8.0mm.

Tabla 106

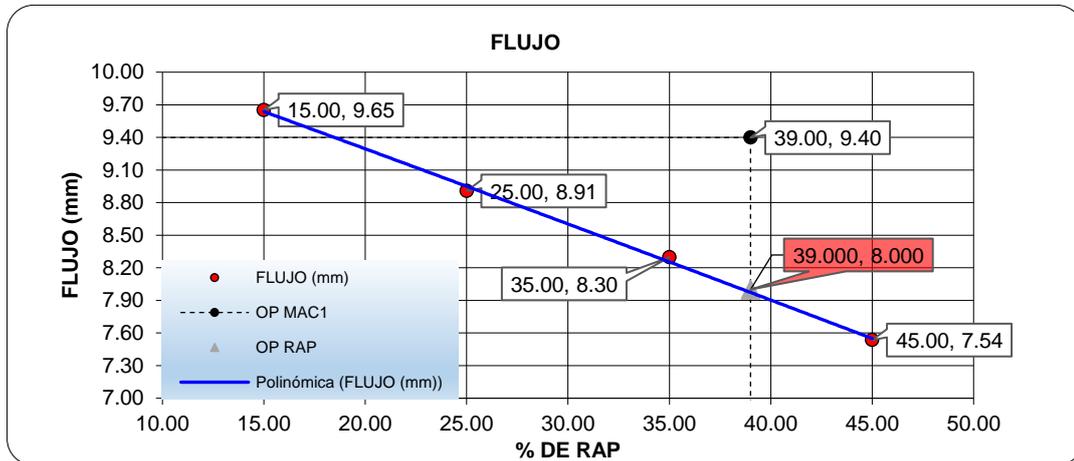
Valores de flujo para MAC-1 adicionado con RAP.

Ensayo de Flujo Marshall (MAC-1 + RAP)				
Probeta No	% de Pavimento Asfáltico Reciclado	Lectura del dial (0.01 plg)	Flujo (mm)	Flujo Promedio (mm)
1	0.0%	350	8.89	9.40
2		370	9.40	
3		390	9.91	
1	15.0%	360	9.14	9.65
2		380	9.65	
3		400	10.16	
1	25.0%	360	9.14	8.91
2		342	8.69	
3		350	8.89	
1	35.0%	320	8.13	8.30
2		325	8.26	
3		335	8.51	
1	45.0%	290	7.37	7.54
2		300	7.62	
3		300	7.62	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 81

Resultados del flujo para MAC-1 + RAP.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación

El la figura 81 se muestra que mientras se aumente la cantidad de RAP a la mezcla MAC-1, el flujo empieza a descender, por lo tanto, para un 39.0% de RAP del peso total

de la mezcla se tiene 8.0mm de flujo, si se sigue añadiendo RAP mayor a este óptimo encontrado, entonces el flujo descenderá por debajo de 8.0mm, entonces la mezcla asfáltica en caliente tipo MAC-1 adicionada con pavimento asfáltico reciclado tendrá un comportamiento rígido. El flujo del MAC-1 que es de 9.5mm respecto de la combinación óptima (MAC-1 + RAP) decrece en un 15.6% respecto al flujo del MAC-1.

4.3.2 Resultados de ensayo de estabilidad Marshall de mezcla asfáltica en caliente adicionado con pavimentos asfáltico reciclado (RAP)

En la tabla 107 se muestran los resultados del ensayo de estabilidad Marshall para la mezcla asfáltica en caliente tipo MAC-1 añadida con pavimento asfáltico reciclado. Resultó que para un 39.0% de adición con RAP tiene una estabilidad de 1240.0 kg, esta estabilidad se toma como límite antes de exceder el factor de rigidez que como máximo es de 4000 kg/cm de acuerdo a (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013).

Tabla 107

Valores de estabilidad para MAC-1 adicionado con RAP.

Ensayo de Estabilidad Marshall (MAC-1 + RAP)						
Probeta No	% de Pavimento Asfáltico Reciclado	Lectura del dial	Lectura de calibración (kg)	Volumen de la probeta (cm ³)	Estabilidad (kg)	Estabilidad Promedio (kg)
1	0.0%	300	997.14	501.00	1037.0	1148
2		350	1163.67	511.00	1163.7	
3		360	1196.92	507.00	1244.8	
1	15.0%	290	963.785	509.00	963.8	999
2		300	997.138	505.00	1037.0	
3		300	997.138	510.00	997.1	
1	25.0%	310	1030.475	501.00	1071.7	1129
2		320	1063.797	498.00	1106.3	
3		350	1163.666	508.00	1210.2	
1	35.0%	340	1130.392	566.00	972.1	1149
2		360	1196.925	504.00	1244.8	
3		370	1230.167	516.00	1230.2	
1	45.0%	400	1329.800	511.00	1329.8	1331
2		390	1296.605	508.00	1348.5	

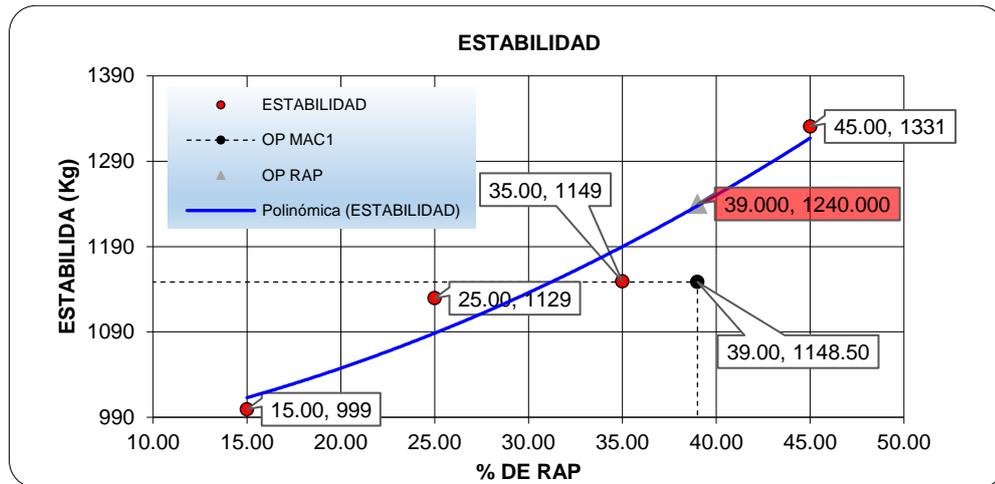
Ensayo de Estabilidad Marshall (MAC-1 + RAP)

Probeta No	% de Pavimento Asfáltico Reciclado	Lectura del dial	Lectura de calibración (kg)	Volumen de la probeta (cm ³)	Estabilidad (kg)	Estabilidad Promedio (kg)
3		380	1263.394	500.00	1313.9	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 82

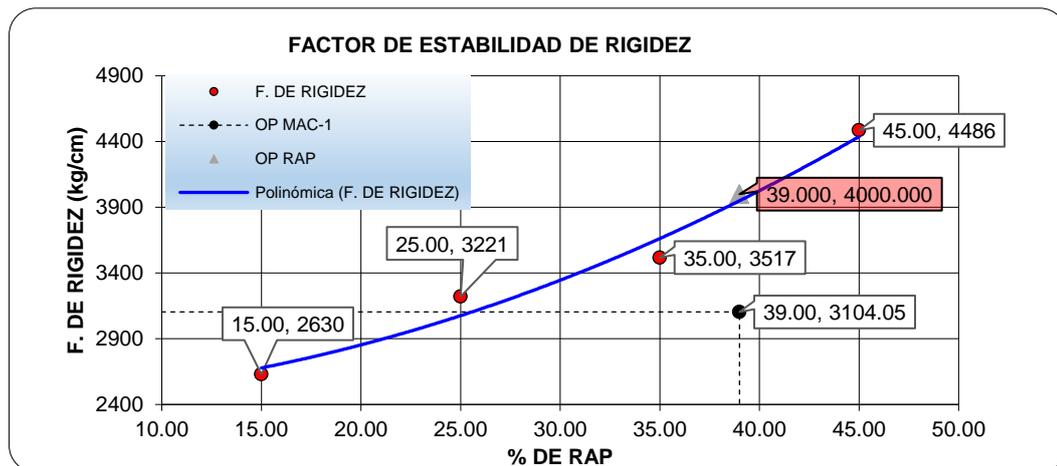
Resultados de estabilidad para MAC-1 + RAP.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 83

Resultados del factor de rigidez para MAC-1 + RAP.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación

De las figuras 82 y 83 se observa que a mayor adición de RAP la estabilidad aumenta, por lo tanto, incrementa también la rigidez de la combinación (MAC-1 + RAP), debido a que el pavimento asfáltico reciclado perdió la propiedad de flexibilidad y flujo durante su tiempo de vida útil, es por ello que para que tenga un comportamiento positivo en cuanto a estabilidad y flujo se le añadió 1.25% de cemento asfáltico. Por lo tanto, para una adición de 39.0% de RAP en el MAC-1, la estabilidad del MAC-1 que es de 1148 kg respecto de la combinación óptima (MAC-1 + RAP) se incrementa en un 8.01% respecto al flujo del MAC-1.

4.3.3 Resultados de peso específico de mezcla asfáltica en caliente adicionado con pavimentos asfáltico reciclado (RAP)

En la tabla 108 se muestran los resultados de la variación del peso específico de cada probeta, de acuerdo a la cantidad de pavimento asfáltico añadido a la mezcla asfáltica patrón. Se tiene como resultado que al 39.0% de RAP añadido el peso específico es de 2.295 gr/cm³.

Tabla 108

Valores de peso específico para MAC-1 adicionado con RAP.

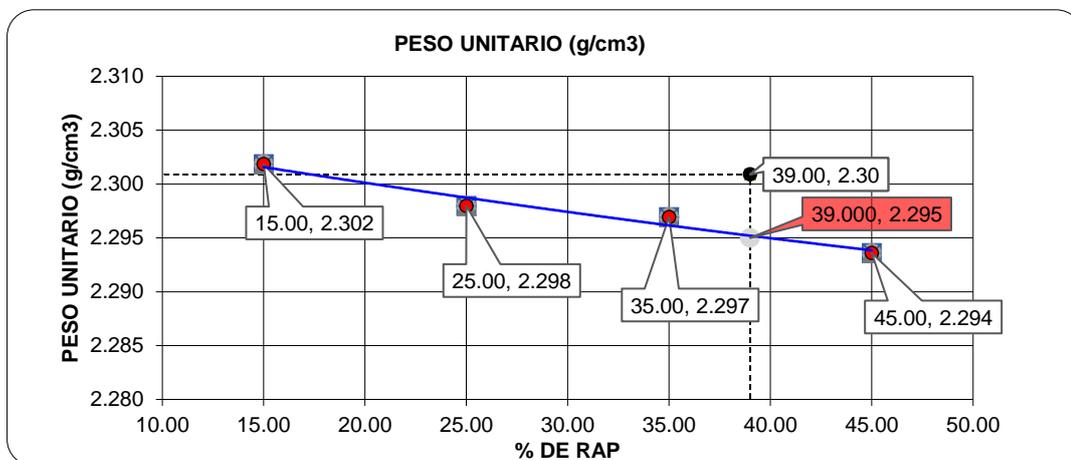
Peso específico (MAC-1+ RAP)			
Probeta No	% de Pavimento Asfáltico Reciclado	Peso específico (gr/cm³)	Flujo Promedio (mm)
1		2.303	
2	0.0%	2.290	2.301
3		2.310	
1		2.301	
2	15.0%	2.299	2.302
3		2.306	
1		2.311	
2	25.0%	2.291	2.298
3		2.291	

Peso específico (MAC-1+ RAP)			
Probeta No	% de Pavimento Asfáltico Reciclado	Peso específico (gr/cm ³)	Flujo Promedio (mm)
1		2.299	
2	35.0%	2.298	2.297
3		2.295	
1		2.297	
2	45.0%	2.293	2.294
3		2.290	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 84

Resultados de peso unitario para MAC-1 + RAP.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación

De la figura 84 se interpreta que a medida que incrementa la cantidad de RAP en el MAC-1, el peso específico unitario de la probeta disminuye, por lo tanto, se tiene que a un 39.0% de RAP añadido al MAC-1 el peso unitario decrece en un 0.26 % respecto a la muestra patrón (MAC-1).

4.3.4 Resultados del % de vacío de mezcla asfáltica en caliente adicionado con pavimentos asfáltico reciclado (RAP)

En la tabla 109 se muestra los resultados del % de vacíos y la variación de estos a medida que se incrementa el porcentaje de pavimento asfáltico reciclado a la mezcla

asfáltica en caliente tipo MAC-1 (muestra patrón). El cual para un 39.0% de RAP añadido nos da como resultado un % de vacío de 3.61%.

Tabla 109

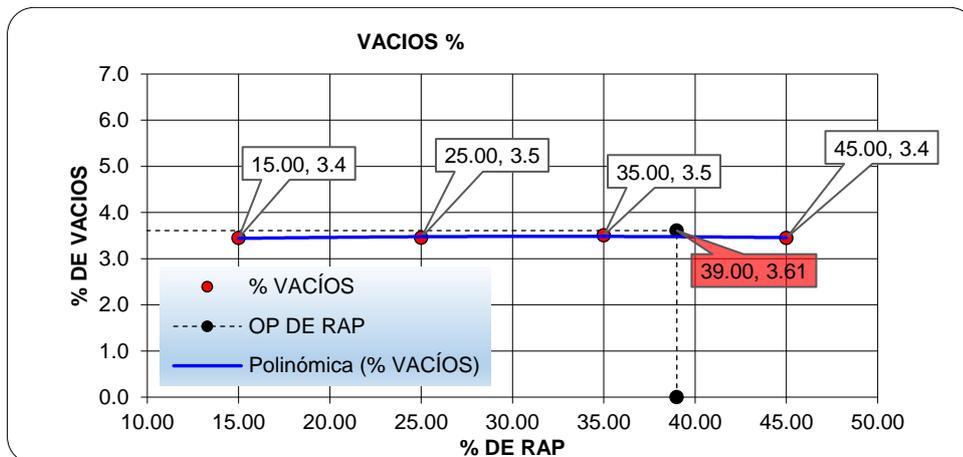
Valores de % de vacíos para MAC-1 adicionado con RAP.

% de vacíos (MAC-1 + RAP)			
Probeta No	% de Pavimento Asfáltico Reciclado	% de vacíos	% de Vacíos Promedio
1		3.50	
2	0.0%	4.08	3.61
3		3.24	
1		3.50	
2	15.0%	3.57	3.45
3		3.28	
1		2.89	
2	25.0%	3.74	3.45
3		3.73	
1		3.44	
2	35.0%	3.48	3.51
3		3.60	
1		3.28	
2	45.0%	3.46	3.45
3		3.60	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 85

Resultados del % de vacíos para MAC-1 + RAP.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación

De acuerdo a la figura 85, se deduce que el contenido de vacíos no se incrementa o reduce a grandes escalas, esto debido a que se diseñó la mezcla asfáltica en caliente tipo MAC-1 con un contenido de vacíos de 4.0% y que al realizar la comprobación en laboratorio nos dio un valor de 3.61%, también se añadió cemento asfáltico al pavimento asfáltico reciclado y se eligió para un óptimo de 1.25% de cemento asfáltico a añadir, con el cual resulta un % de vacíos teórico de 4.0%. Por lo tanto, el valor de % de vacíos de la combinación (MAC-1 + RAP) es de 3.61%, se encuentra dentro de lo permisible que es entre 3% a 5% de acuerdo a (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013).

4.3.5 Resultados del ensayo de efecto de la humedad en mezclas asfálticas (Lottman Modificado) de mezcla asfáltica en caliente adicionado con pavimentos asfáltico reciclado (RAP)

En la tabla 110 se muestra los resultados del ensayo del efecto de la húmeda (Lottman modificado) para un 39.0% de pavimento asfáltico reciclado añadido a la mezcla asfáltica en caliente de tipo MAC-1.

Tabla 110

Valores de resistencia a la tracción para MAC-1 añadido con RAP óptimo al 39.0%.

Porcentaje		39.0 % de RAP añadido a la Mezcla asfáltica nueva						
Condiciones		Briqueta en Condición Normal			Briqueta sometida a Condiciones Críticas			
Identificación muestra	Und	01	02	03	01	02	03	
1	Peso seco	gr.	1179.00	1169.0	1162.0	1163.0	1166.0	1165.0
2	Peso sumergido superficialmente seco	gr.	1182.00	1172.0	1165.0	1166.0	1169.0	1168.0

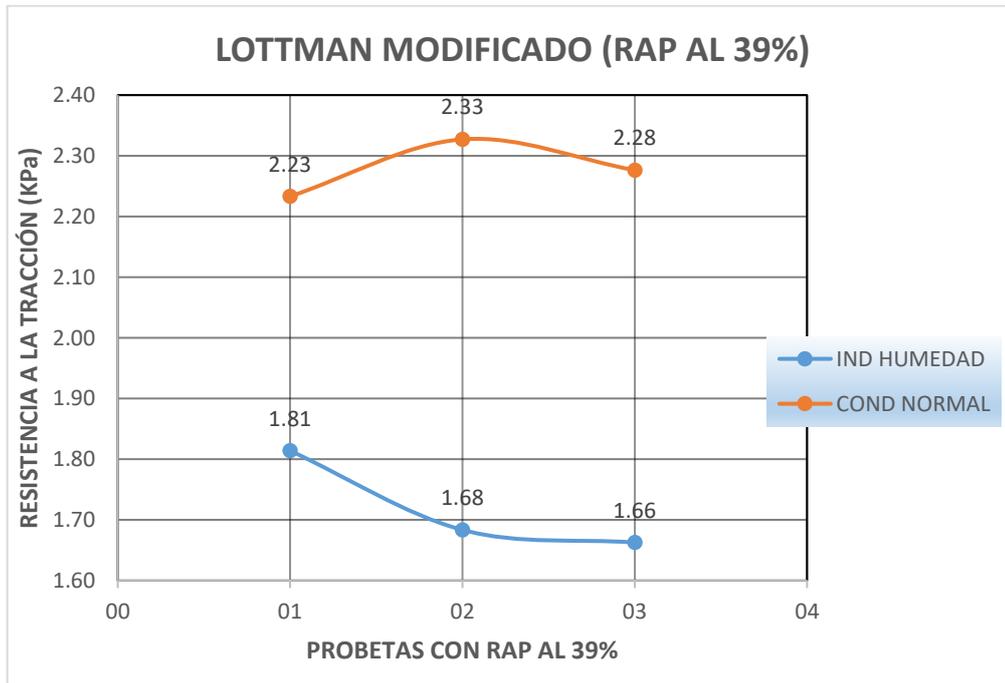


Porcentaje			39.0 % de RAP añadido a la Mezcla asfáltica nueva					
Condiciones			Briqueta en Condición Normal			Briqueta sometida a Condiciones Críticas		
3	Peso sumergido	gr.	666.00	669.0	667.0	663.0	664.0	664.0
4	volumen final (por desplazamiento de agua)	cm ³	516.00	503.0	498.0	503.0	505.0	504.0
5	Diámetro	cm	10.20	10.16	10.15	10.18	10.16	10.16
6	Altura	cm	6.35	6.29	6.26	6.28	6.54	6.50
7	Volumen inicial	cm ³	518.88	509.95	506.52	511.15	530.22	526.98
8	Variación de volumen	%	0.55	1.36	1.68	1.59	4.76	4.36
9	Peso específico de la briqueta	gr./cm ³	2.28	2.32	2.33	2.31	2.31	2.31
10	Lectura del dial	mm	700.00	720.00	700.00	560.00	540.00	530.00
11	Conversión lectura de dial	Kgf	2318.31	2383.70	2318.31	1858.77	1792.87	1759.90
12	Resistencia a la Tracción	Kpa	2.23	2.33	2.28	1.81	1.68	1.66
13	Promedio			2.28			1.72	
14	Relación de resistencia a la tracción	%				75.48		

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 86

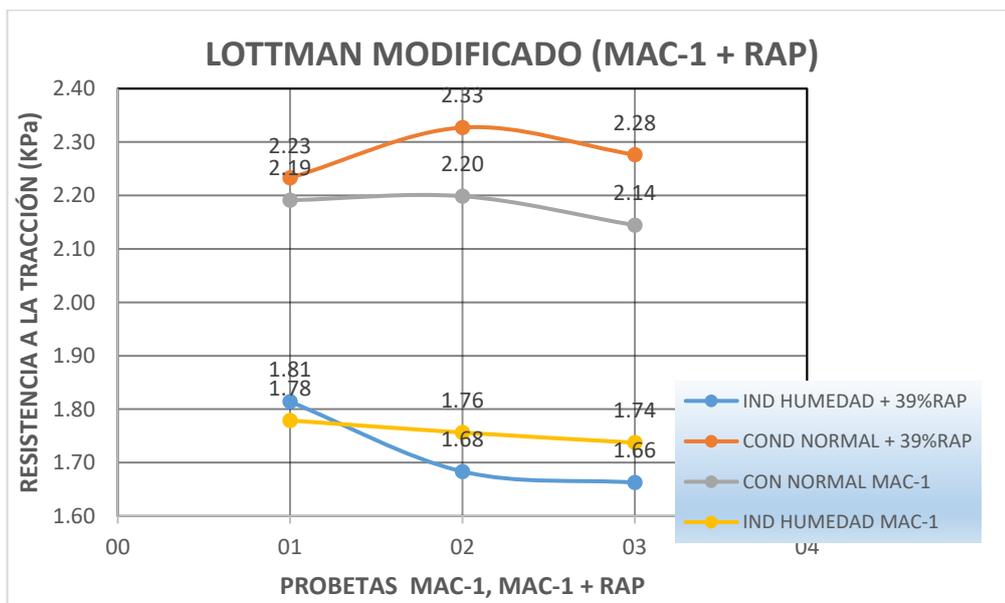
Resultados de resistencia a la tracción para MAC-1 + RAP al 39%.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 87

Comparación de resultados de resistencia a la tracción de MAC-1 patrón con MAC-1 + RAP al 39%.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.



Interpretación

La relación de la resistencia a la tracción para la combinación de MAC-1 + 39.0% de RAP es de 75.48% y de la mezcla asfáltica patrón MAC-1 es de 80.69%, estos datos nos indican que la combinación de MAC-1 + RAP surge mayor daño cuando se somete a condiciones críticas (como se puede apreciar en las figuras 86 y 87), sin embargo el 75.48% de relación de resistencia a la tracción se encuentra dentro de los parámetros permitidos por la (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013) el cual nos indica que la resistencia retenida mínima es de 75.0%.

4.4 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CBR PARA LA BASE GRANULAR PATRÓN Y PARA LA BASE GRANULAR ADICIONADO CON PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (RAP)

En la tabla 111 se muestra los resultados del ensayo de CBR a una penetración de 0.1" y 0.2" para una condición de máxima densidad seca para cada caso (56 golpes), densidad máxima seca de cada uno de los eventos (base granular +RAP), contenido de humedad y la expansión. Se da como resultado que un 21.0% del peso total de la mezcla de pavimento asfáltico reciclado añadido a la base granular patrón, es el óptimo porcentaje a añadir antes de que el CBR tome valores menores a 104% (como se muestra en la figura 88), siendo permitido un valor mínimo de 100.0% de CBR para materiales a usar como base granular de acuerdo a (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013).

Tabla 111

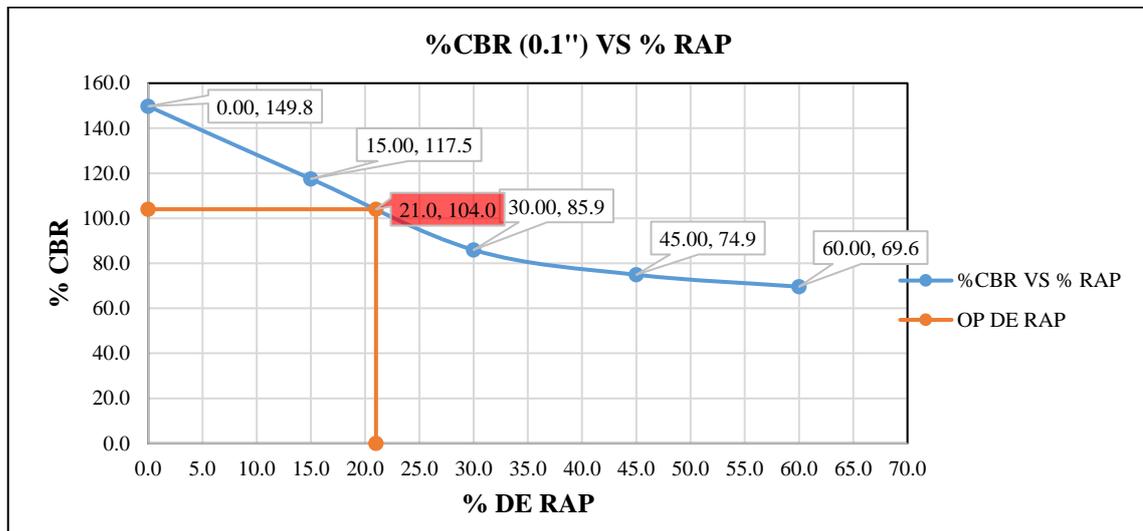
Valores de % de CBR para base granular añadida con RAP.

Ensayo de CBR (Base granular + RAP)						
Probeta No	% de Pavimento Asfáltico Reciclado	CBR (0.1'') %	Máxima Densidad seca (g/cm ³)	% Contenido de humedad	% de expansión	CBR (0.1'') promedio %
1		150.5	2.140	7.30	0.103	
2	0.0%	149.8	2.141	7.05	0.125	149.8
3		149.0	2.142	7.05	0.185	
1		117.4	2.133	7.30	0.090	
2	15.0%	115.1	2.131	7.40	0.110	117.5
3		119.9	2.133	7.00	0.130	
1		85.5	2.024	7.20	0.040	
2	30.0%	85.4	2.030	7.00	0.060	85.9
3		86.9	2.019	7.30	0.110	
1		74.8	1.933	7.20	0.070	
2	45.0%	75.6	1.935	7.30	0.090	74.9
3		74.3	1.928	6.90	0.080	
1		69.7	1.921	7.10	0.040	
2	60.0%	68.9	1.917	7.30	0.060	69.6
3		70.1	1.923	7.00	0.070	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 88

Resultados del % de CBR para base granular + RAP.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.



Interpretación

De la figura 88 mostrada se dedujo que, el CBR a una penetración de 0.1 plg disminuye a medida que el contenido de pavimento asfáltico reciclado incrementaba, se observó que a partir de 30% de RAP añadido el CBR es menos del 100%. También se observó que a medida que se añade RAP a la base granular la máxima densidad seca disminuye, de la misma manera la expansión disminuye. Por lo tanto, el porcentaje de RAP máximo a añadir a la base granular fue de 21% teniendo un CBR del 104%, estando dentro de los parámetros requeridos por la EG-2013 para que pueda ser utilizada en una base granular.

4.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

En esta sección se presenta el análisis estadístico de los resultados obtenidos de los ensayos de flujo Marshall, estabilidad Marshall, contenido de vacíos de la mezcla asfáltica en caliente patrón y de la mezcla asfáltica en caliente añadida con pavimento asfáltico reciclado.

También se realizó el análisis estadístico de los ensayos de CBR (0.1 plg) para la base granular patrón y la base granular añadida con pavimento asfáltico reciclado (RAP).

4.5.1 Análisis estadístico de los resultados del ensayo de flujo Marshall de la mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1

En la tabla 112 se muestran los datos del ensayo de flujo Marshall, para ser analizados estadísticamente.

Tabla 112

Datos de flujo para MAC-1 +RAP al 0%.

Ensayo de flujo Marshall	Probeta No	Xi Flujo (mm)
C.A. óptimo 5.9%	1	8.89
	2	9.40
	3	9.91

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 113 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del ensayo de flujo Marshall.

Tabla 113

Distribución de frecuencia para datos de flujo de MAC-1 + RAP al 0%.

Intervalo de clase	Xi	fi	Fi	fi*Xi	Xi-u	(Xi-u)^2	fi*(Xi-u)^2
[8.880 9.219 >	9.049	1.000	1.000	9.049	-0.349	0.122	0.122
[9.219 9.557 >	9.388	1.000	2.000	9.388	-0.010	0.000	0.000
[9.557 9.916 >	9.737	1.000	3.000	9.737	0.339	0.115	0.115

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 114 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos de ensayo de flujo Marshall.

Tabla 114

Resultado del análisis estadístico de los datos de flujo MAC-1 + RAP al 0%.

<i>Xi</i> <i>Flujo (mm)</i>	
C.A. AL 5.9%	
Media	9.398
Error típico	0.293
Mediana	9.398
Moda	
Desviación estándar	0.508
Varianza de la muestra	0.258
Curtosis	
Coficiente de asimetría	0.000
Rango	1.016
Mínimo	8.890
Máximo	9.906
Suma	28.194
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de Intervalos	0.339
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.2 Análisis estadístico de los resultados del ensayo de flujo Marshall de la mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 15%

En la tabla 115 se muestran los datos del ensayo de flujo Marshall, para ser analizados estadísticamente.

Tabla 115

Datos de flujo para MAC-1 +RAP al 15%.

Ensayo de flujo Marshall	Probeta No	Xi Flujo (mm)
	1	9.14
RAP al 15%	2	9.65
	3	10.16

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 116 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del ensayo de flujo Marshall.

Tabla 116

Distribución de frecuencia para datos de flujo de MAC-1 + RAP al 15%.

Intervalo de clase	Xi	fi	Fi	fi*Xi	Xi-u	(Xi-u)^2	fi*(Xi-u)^2
[9.134 9.473 >	9.303	1.000	1.000	9.303	-0.349	0.122	0.122
[9.473 9.811 >	9.642	1.000	2.000	9.642	-0.010	0.000	0.000
[9.811 10.170 >	9.991	1.000	3.000	9.991	0.339	0.115	0.115

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 117 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos de ensayo de flujo Marshall.

Tabla 117

Resultados del análisis estadístico de flujo para MAC-1 + RAP al 15%.

Xi Flujo (mm) RAP AL 15%	
Media	9.652
Error típico	0.293
Mediana	9.652
Moda	
Desviación estándar	0.508
Varianza de la muestra	0.258
Curtosis	
Coefficiente de asimetría	0.000
Rango	1.016
Mínimo	9.144
Máximo	10.160

<i>Xi</i> <i>Flujo (mm)</i>	
RAP AL 15%	
Suma	28.956
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	0.339
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.3 Análisis estadístico de los resultados del ensayo de flujo Marshall de la mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 25%

En la tabla 118 se muestran los datos del ensayo de flujo Marshall, para ser analizados estadísticamente.

Tabla 118

Datos de flujo para MAC-1 + RAP al 25%.

Ensayo de flujo Marshall	Probeta No	Xi Flujo (mm)
RAP al 25%	1	9.14
	2	8.69
	3	8.89

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 119 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del ensayo de flujo Marshall.

Tabla 119

Distribución de frecuencias para datos de flujo de MAC-1 + RAP al 25%.

Intervalo de clase	Xi	fi	Fi	fi*Xi	Xi-u	(Xi-u) ²	fi*(Xi-u) ²
[8.677 8.829 >	8.753	1.000	1.000	8.753	-0.154	0.024	0.024
[8.829 8.982 >	8.905	1.000	2.000	8.905	-0.002	0.000	0.000
[8.982 9.154 >	9.068	1.000	3.000	9.068	0.161	0.026	0.026

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 120 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos de ensayo de flujo Marshall.

Tabla 120

Resultados del análisis estadístico para datos de flujo de MAC-1 + RAP al 25%.

<i>Xi</i> <i>Flujo (mm)</i> RAP AL 25%	
Media	8.907
Error típico	0.132
Mediana	8.890
Moda	
Desviación estándar	0.229
Varianza de la muestra	0.052
Curtosis	
Coefficiente de asimetría	0.331
Rango	0.457
Mínimo	8.687
Máximo	9.144
Suma	26.721
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	0.152
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.4 Análisis estadístico de los resultados del ensayo de flujo Marshall de la mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 35%

En la tabla 121 se muestran los datos del ensayo de flujo Marshall, para ser analizados estadísticamente.

Tabla 121

Datos de flujo para MAC-1 + RAP al 35%.

Ensayo de flujo Marshall	Probeta No	Xi Flujo (mm)
RAP al 35%	1	8.13
	2	8.26
	3	8.51

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 122 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del ensayo de flujo Marshall.

Tabla 122

Distribución de frecuencias para datos de flujo de MAC-1 + RAP al 35%.

Intervalo de clase	X_i	f_i	F_i	$f_i \cdot X_i$	$X_i - u$	$(X_i - u)^2$	$f_i \cdot (X_i - u)^2$
[8.118 8.245 >	8.182	1.000	1.000	8.182	-0.116	0.013	0.013
[8.245 8.372 >	8.309	1.000	2.000	8.309	0.011	0.000	0.000
[8.372 8.519 >	8.446	1.000	3.000	8.446	0.148	0.022	0.022

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 123 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos de ensayo de flujo Marshall.

Tabla 123

Resultados del análisis estadístico para datos de flujo de MAC-1 + RAP al 35%.

X_i Flujo (mm) RAP AL 35%	
Media	8.297
Error típico	0.112
Mediana	8.255
Moda	
Desviación estándar	0.194
Varianza de la muestra	0.038
Curtosis	
Coefficiente de asimetría	0.935
Rango	0.381
Mínimo	8.128
Máximo	8.509
Suma	24.892
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	0.127
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.5 Análisis estadístico de los resultados del ensayo de flujo Marshall de la mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 45%

En la tabla 124 se muestran los datos del ensayo de flujo Marshall, para ser analizados estadísticamente.

Tabla 124

Datos de flujo para MAC-1 + RAP al 45%.

Ensayo de flujo Marshall	Probeta No	Xi Flujo (mm)
RAP al 45%	1	7.37
	2	7.62
	3	7.62

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 125 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del ensayo de flujo Marshall.

Tabla 125

Distribución de frecuencias para datos de flujo de MAC-1 + RAP al 45%.

Intervalo de clase	Xi	fi	Fi	fi*Xi	Xi-u	(Xi-u)^2	fi*(Xi-u)^2
[7.356 7.441 >	7.398	1.000	1.000	7.398	-0.137	0.019	0.019
[7.441 7.525 >	7.483	0.000	1.000	0.000	-0.052	0.003	0.000
[7.525 7.630 >	7.578	2.000	3.000	15.155	0.042	0.002	0.004

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 126 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos de ensayo de flujo Marshall.

Tabla 126

Resultados del análisis estadístico para los datos de flujo de MAC-1 + RAP al 45%.

<i>Xi</i> <i>Flujo (mm)</i>	
RAP AL 45%	
Media	7.535
Error típico	0.085
Mediana	7.620
Moda	7.620
Desviación estándar	0.147
Varianza de la muestra	0.022
Curtosis	
Coefficiente de asimetría	-1.732
Rango	0.254
Mínimo	7.366
Máximo	7.620
Suma	22.606
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	0.085
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.6 Análisis estadístico de los resultados del ensayo de estabilidad Marshall de la mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1

En la tabla 127 se muestran los datos del ensayo de estabilidad Marshall, para ser analizados estadísticamente.

Tabla 127

Datos de estabilidad para MAC-1 + RAP al 0%.

Ensayo de estabilidad Marshall	Probeta No	<i>Xi</i> Estabilidad (kg)
C.A. óptimo 5.9%	1	1037.02
	2	1163.67
	3	1244.80

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 128 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del ensayo de estabilidad Marshall.

Tabla 128*Distribución de frecuencia para datos de estabilidad de MAC-1 + RAP al 0%.*

Intervalo de clase	Xi	fi	Fi	fi*Xi	Xi-u	(Xi-u)^2	fi*(Xi-u)^2
[1037.013 1106.273 >	1071.643	1.000	1.000	1071.643	-76.854	5906.553	5906.553
[1106.273 1175.532 >	1140.902	1.000	2.000	1140.902	-7.595	57.678	57.678
[1175.532 1244.812 >	1210.172	1.000	3.000	1210.172	61.675	3803.786	3803.786

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 129 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos de ensayo de estabilidad Marshall.

Tabla 129*Resultados del análisis estadístico para datos de estabilidad de MAC-1 + RAP al 0%.*

<i>Xi</i> <i>Estabilidad (kg)</i>	
C.A. AL 5.9%	
Media	1148.497
Error típico	60.458
Mediana	1163.666
Moda	
Desviación estándar	104.717
Varianza de la muestra	10965.547
Curtosis	
Coefficiente de asimetría	-0.638
Rango	207.778
Mínimo	1037.023
Máximo	1244.802
Suma	3445.491
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	69.259
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.7 Análisis estadístico de los resultados del ensayo de estabilidad Marshall de la mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 15%

En la tabla 130 se muestran los datos del ensayo de estabilidad Marshall, para ser analizados estadísticamente.

Tabla 130

Datos de estabilidad para MAC-1 + RAP al 15%.

Ensayo de estabilidad Marshall	Probeta No	Xi Estabilidad (kg)
RAP al 15%	1	963.78
	2	1037.02
	3	997.14

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 131 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del ensayo de estabilidad Marshall.

Tabla 131

Distribución de frecuencia para datos de estabilidad de MAC-1 + RAP al 15%.

Intervalo de clase	Xi	fi	Fi	fi*Xi	Xi-u	(Xi-u)^2	fi*(Xi-u)^2
[963.775 988.188 >	975.981	1.000	1.000	975.981	-23.334	544.482	544.482
[988.188 1012.600 >	1000.394	1.000	2.000	1000.394	1.079	1.164	1.164
[1012.600 1037.033 >	1024.817	1.000	3.000	1024.817	25.502	650.332	650.332

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 132 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos de ensayo de estabilidad Marshall.

Tabla 132

Resultados del análisis estadístico para datos de estabilidad de MAC-1 + RAP al 15%.

Xi Estabilidad (kg) RAP AL 15%	
Media	999.315
Error típico	21.170
Mediana	997.138
Moda	
Desviación estándar	36.668
Varianza de la muestra	1344.530
Curtosis	
Coefficiente de asimetría	0.266
Rango	73.239

<i>Xi</i> <i>Estabilidad (kg)</i>	
RAP AL 15%	
Mínimo	963.785
Máximo	1037.023
Suma	2997.946
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	24.413
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.8 Análisis estadístico de los resultados del ensayo de estabilidad Marshall de la mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 25%

En la tabla 133 se muestran los datos del ensayo de estabilidad Marshall, para ser analizados estadísticamente.

Tabla 133

Datos de estabilidad para MAC-1 + RAP al 25%.

Ensayo de estabilidad Marshall	Probeta No	Xi Estabilidad (kg)
RAP al 25%	1	1071.69
	2	1106.35
	3	1210.21

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 134 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del ensayo de estabilidad Marshall.

Tabla 134

Distribución de frecuencias para datos de estabilidad de MAC-1 + RAP al 25%.

Intervalo de clase	Xi	fi	Fi	fi*Xi	Xi-u	(Xi-u)^2	fi*(Xi-u)^2
[1071.684 1117.857 >	1094.771	2.000	2.000	2189.541	-34.648	1200.481	2400.961
[1117.857 1164.030 >	1140.944	0.000	2.000	0.000	11.525	132.826	0.000
[1164.030 1210.223 >	1187.127	1.000	3.000	1187.127	57.708	3330.214	3330.214

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 135 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos de ensayo de estabilidad Marshall.

Tabla 135

Resultados del análisis estadístico para datos de estabilidad de MAC-1 + RAP al 25%.

<i>Xi</i> <i>Estabilidad (kg)</i>	
RAP AL 25%	
Media	1129.419
Error típico	41.617
Mediana	1106.348
Moda	
Desviación estándar	72.084
Varianza de la muestra	5196.045
Curtosis	
Coefficiente de asimetría	1.293
Rango	138.519
Mínimo	1071.694
Máximo	1210.213
Suma	3388.256
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	46.173
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.9 Análisis estadístico de los resultados del ensayo de estabilidad Marshall de la mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 35%

En la tabla 136 se muestran los datos del ensayo de estabilidad Marshall, para ser analizados estadísticamente.

Tabla 136

Datos de estabilidad para MAC-1 + RAP al 35%.

Ensayo de estabilidad Marshall	Probeta No	Xi Estabilidad (kg)
RAP al 35%	1	972.14

Ensayo de estabilidad Marshall	Probeta No	Xi Estabilidad (kg)
	2	1244.80
	3	1230.17

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 137 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del ensayo de estabilidad Marshall.

Tabla 137

Distribución de frecuencia para datos de estabilidad de MAC-1 + RAP al 35%.

Intervalo de clase			Xi	fi	Fi	fi*Xi	Xi-u	(Xi-u)^2	fi*(Xi-u)^2	
[	972.127	1063.015	>	1017.571	1.000	1.000	1017.571	-131.464	17282.788	17282.788
[	1063.015	1153.904	>	1108.460	0.000	1.000	0.000	-40.576	1646.404	0.000
[	1153.904	1244.812	>	1199.358	2.000	3.000	2398.715	50.322	2532.325	5064.650

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 138 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos de ensayo de estabilidad Marshall.

Tabla 138

Resultados de análisis estadístico para datos de estabilidad de MAC-1 + RAP al 35%.

Xi Estabilidad (kg)	
RAP AL 35%	
Media	1149.035
Error típico	88.550
Mediana	1230.167
Moda	
Desviación estándar	153.373
Varianza de la muestra	23523.239
Curtosis	
Coefficiente de asimetría	-1.714
Rango	272.664
Mínimo	972.137
Máximo	1244.802
Suma	3447.106
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	90.888
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.10 Análisis estadístico de los resultados del ensayo de estabilidad Marshall de la mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 45%

En la tabla 139 se muestran los datos del ensayo de estabilidad Marshall, para ser analizados estadísticamente.

Tabla 139

Datos de estabilidad para MAC-1 +RAP al 45%.

Ensayo de estabilidad Marshall	Probeta No	Xi Estabilidad (kg)
RAP al 45%	1	1329.80
	2	1348.47
	3	1313.93

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 140 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del ensayo de estabilidad Marshall.

Tabla 140

Distribución de frecuencia para datos de estabilidad de MAC-1 + RAP al 45%.

Intervalo de clase	Xi	fi	Fi	fi*Xi	Xi-u	(Xi-u)^2	fi*(Xi-u)^2
[1313.920 1325.433 >	1319.676	1.000	1.000	1319.676	-11.057	122.250	122.250
[1325.433 1336.946 >	1331.189	1.000	2.000	1331.189	0.456	0.208	0.208
[1336.946 1348.479 >	1342.713	1.000	3.000	1342.713	11.980	143.510	143.510

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 141 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos de ensayo de estabilidad Marshall.

Tabla 141

Resultados del análisis estadístico para datos de estabilidad de MAC-1 + RAP al 45%.

<i>Xi</i> <i>Estabilidad (kg)</i> RAP AL 45%	
Media	1330.733
Error típico	9.982
Mediana	1329.800
Moda	
Desviación estándar	17.289
Varianza de la muestra	298.895
Curtosis	
Coficiente de asimetría	0.242
Rango	34.539
Mínimo	1313.930
Máximo	1348.469
Suma	3992.199
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	11.513
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.11 Análisis estadístico de los resultados del peso específico de las probetas de mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1

En la tabla 142 se muestran los datos del peso específico de las probetas para MAC-1 con 5.9% de cemento asfáltico, para ser analizados estadísticamente.

Tabla 142

Datos de peso específico para MAC- + RAP al 0%.

Peso específico	Probeta No	Xi Peso Específico(gr/cm3)
C.A. óptimo 5.9%	1	2.30
	2	2.29
	3	2.31

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 143 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del peso específico de las probetas para MAC-1 con 5.9% de cemento asfáltico.

Tabla 143

Distribución de frecuencias para datos de peso específico de MAC-1 + RAP al 0%.

Intervalo de clase	Xi	fi	Fi	fi*Xi	Xi-u	(Xi-u)^2	fi*(Xi-u)^2
[2.280 2.286 >	2.283	0.000	0.000	0.000	-0.018	0.00032	0.00000
[2.286 2.293 >	2.290	1.000	1.000	2.290	-0.011	0.00013	0.00013
[2.293 2.320 >	2.306	2.000	3.000	4.613	0.005	0.00003	0.00006

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 144 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos del peso específico de las probetas para MAC-1 con 5.9% de cemento asfáltico.

Tabla 144

Resultado del análisis estadístico para datos de peso específico de MAC-1 + RAP al 0%.

<i>Xi</i> <i>Peso Específico(gr/cm3)</i>	
C.A. AL 5.9%	
Media	2.301
Error típico	0.006
Mediana	2.303
Moda	
Desviación estándar	0.010
Varianza de la muestra	0.000
Curtosis	
Coefficiente de asimetría	-1.032
Rango	0.020
Mínimo	2.290
Máximo	2.310
Suma	6.903
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	0.007
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.12 Análisis estadístico de los resultados del peso específico de las probetas de mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 15%

En la tabla 145 se muestran los datos del peso específico de las probetas para MAC-1 añadidas con RAP al 15%, para ser analizados estadísticamente.

Tabla 145

Datos de peso específico para MAC-1 + RAP al 15%.

Peso específico	Probeta No	Xi Peso Específico(gr/cm3)
RAP al 15%	1	2.30
	2	2.30
	3	2.31

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 146 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del peso específico de las probetas para MAC-1 añadidas con RAP al 15%.

Tabla 146

Distribución de frecuencia para datos de peso específico de MAC-1 + RAP al 15%.

Intervalo de clase	Xi	fi	Fi	fi*Xi	Xi-u	(Xi-u)^2	fi*(Xi-u)^2
[2.289 2.291 >	2.290	0.000	0.000	0.000	-0.012	0.00014	0.00000
[2.291 2.294 >	2.292	0.000	0.000	0.000	-0.009	0.00009	0.00000
[2.294 2.316 >	2.305	3.000	3.000	6.914	0.003	0.00001	0.00003

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 147 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos del peso específico de las probetas para MAC-1 añadidas con RAP al 15%.

Tabla 147

Resultados del análisis estadístico para datos de peso específico de MAC-1 + RAP al 15%.

\bar{X}_i Peso Específico(gr/cm ³) RAP AL 15%	
Media	2.302
Error típico	0.002
Mediana	2.301
Moda	
Desviación estándar	0.004
Varianza de la muestra	0.000
Curtosis	
Coefficiente de asimetría	1.364
Rango	0.007
Mínimo	2.299
Máximo	2.306
Suma	6.905
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	0.002
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.13 Análisis estadístico de los resultados del peso específico de las probetas de mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 25%

En la tabla 148 se muestran los datos del peso específico de las probetas para MAC-1 añadidas con RAP al 25%, para ser analizados estadísticamente.

Tabla 148

Datos de peso específico para MAC-1 + RAP al 25%.

Peso específico	Probeta No	\bar{X}_i Peso Específico(gr/cm ³)
RAP al 25%	1	2.31
	2	2.29
	3	2.29

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 149 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del peso específico de las probetas para MAC-1 añadidas con RAP al 25%.

Tabla 149

Distribución de frecuencia para datos de peso específico de MAC-1 + RAP al 25%.

Intervalo de clase	Xi	fi	Fi	fi*Xi	Xi-u	(Xi-u)^2	fi*(Xi-u)^2
[2.281 2.288 >	2.285	0.000	0.000	0.000	-0.013	0.00018	0.00000
[2.288 2.295 >	2.291	2.000	2.000	4.583	-0.007	0.00004	0.00009
[2.295 2.321 >	2.308	1.000	3.000	2.308	0.010	0.00010	0.00010

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 150 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos del peso específico de las probetas para MAC-1 añadidas con RAP al 25%.

Tabla 150

Resultados del análisis estadístico para datos de peso específico de MAC-1 + RAP al 25%.

<i>Xi</i> <i>Peso Específico(gr/cm3)</i> RAP AL 25%	
Media	2.298
Error típico	0.007
Mediana	2.291
Moda	
Desviación estándar	0.012
Varianza de la muestra	0.000
Curtosis	
Coefficiente de asimetría	1.732
Rango	0.020
Mínimo	2.291
Máximo	2.311
Suma	6.894
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	0.007
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.14 Análisis estadístico de los resultados del peso específico de las probetas de mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 35%

En la tabla 151 se muestran los datos del peso específico de las probetas para MAC-1 añadidas con RAP al 35%, para ser analizados estadísticamente.

Tabla 151

Datos de peso específico para MAC-1 + RAP al 35%.

Peso específico	Probeta No	Xi Peso Específico(gr/cm3)
RAP al 35%	1	2.30
	2	2.30
	3	2.29

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 152 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del peso específico de las probetas para MAC-1 añadidas con RAP al 35%.

Tabla 152

Distribución de frecuencia para datos de peso específico de MAC-1 + RAP al 35%.

Intervalo de clase	Xi	fi	Fi	fi*Xi	Xi-u	(Xi-u)^2	fi*(Xi-u)^2
[2.285 2.286 >	2.285	0.000	0.000	0.000	-0.012	0.000137	0.000000
[2.286 2.287 >	2.287	0.000	0.000	0.000	-0.010	0.000107	0.000000
[2.287 2.309 >	2.298	3.000	3.000	6.894	0.001	0.000001	0.000003

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 153 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos del peso específico de las probetas para MAC-1 añadidas con RAP al 35%.

Tabla 153

Resultados de análisis estadístico para datos de peso específico de MAC-1 + RAP al 35%.

<i>Xi</i> <i>Peso Específico(gr/cm³)</i>	
RAP AL 35%	
Media	2.297
Error típico	0.001
Mediana	2.298
Moda	
Desviación estándar	0.002
Varianza de la muestra	0.000
Curtosis	
Coefficiente de asimetría	-1.326
Rango	0.004
Mínimo	2.295
Máximo	2.299
Suma	6.891
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	0.001
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.15 Análisis estadístico de los resultados del peso específico de las probetas de mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 45%

En la tabla 154 se muestran los datos del peso específico de las probetas, para MAC-1 añadidas con RAP al 45%, para ser analizados estadísticamente.

Tabla 154

Datos de peso específico para MAC-1 + RAP al 45%.

Peso específico	Probeta No	Xi Peso Específico(gr/cm³)
RAP al 45%	1	2.30
	2	2.29
	3	2.29

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 155 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del peso específico de las probetas para MAC-1 añadidas con RAP al 45%.

Tabla 155

Distribución de frecuencia para datos de peso específico de MAC-1 + RAP al 45%.

Intervalo de clase	X_i	f_i	F_i	$f_i * X_i$	$X_i - u$	$(X_i - u)^2$	$f_i * (X_i - u)^2$
[2.280 2.282 >	2.281	0.000	0.000	0.000	-0.012	0.000152	0.000000
[2.282 2.285 >	2.284	0.000	0.000	0.000	-0.010	0.000097	0.000000
[2.285 2.307 >	2.296	3.000	3.000	6.889	0.003	0.000007	0.000021

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 156 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos del peso específico de las probetas para MAC-1 añadidas con RAP al 45%.

Tabla 156

Resultado de análisis estadístico para datos de peso específico de MAC-1 + RAP al 45%.

X_i <i>Peso Específico(gr/cm³)</i>	
RAP AL 45%	
Media	2.294
Error típico	0.002
Mediana	2.293
Moda	
Desviación estándar	0.004
Varianza de la muestra	0.000
Curtosis	
Coefficiente de asimetría	0.336
Rango	0.007
Mínimo	2.290
Máximo	2.297
Suma	6.881
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	0.002
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.16 Análisis estadístico de los resultados del % de vacíos de mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1

En la tabla 157 se muestran los datos del % de vacíos de las probetas para MAC-1 con 5.9% de cemento asfáltico, para ser analizados estadísticamente.

Tabla 157

Datos de % de vacíos para MAC-1 + RAP al 0%.

% de vacíos	Probeta No	Xi vacíos (%)
C.A. óptimo 5.9%	1	3.50
	2	4.08
	3	3.24

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 158 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del % de vacíos de las probetas para MAC-1 con 5.9% de cemento asfáltico.

Tabla 158

Distribución de frecuencia para datos de % de vacíos de MAC-1 + RAP al 0%.

Intervalo de clase	Xi	fi	Fi	fi*Xi	Xi-u	(Xi-u)^2	fi*(Xi-u)^2
[3.231 3.511 >	3.371	2.000	2.000	6.742	-0.237	0.056	0.113
[3.511 3.791 >	3.651	0.000	2.000	0.000	0.042	0.002	0.000
[3.791 4.091 >	3.941	1.000	3.000	3.941	0.332	0.110	0.110

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 159 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos del % de vacíos de las probetas para MAC-1 con 5.9% de cemento asfáltico.

Tabla 159

Resultados de análisis estadístico para datos de % de vacíos de MAC-1 + RAP al 0%.

<i>Xi</i> <i>vacíos (%)</i>	
C.A. AL 5.9%	
Media	3.609
Error típico	0.248
Mediana	3.504
Moda	
Desviación estándar	0.429
Varianza de la muestra	0.184
Curtosis	
Coefficiente de asimetría	1.032
Rango	0.839
Mínimo	3.241
Máximo	4.081
Suma	10.826
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	0.280
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.17 Análisis estadístico de los resultados del % de vacíos de mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 15%

En la tabla 160 se muestran los datos del % de vacíos de las probetas para MAC-1 añadidas con RAP al 15%, para ser analizados estadísticamente.

Tabla 160

Datos de % de vacíos para MAC-1 + RAP al 15%.

% de vacíos	Probeta No	Xi vacíos (%)
RAP al 15%	1	3.50
	2	3.57
	3	3.28

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 161 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del % de vacíos de las probetas para MAC-1 añadidas con RAP al 15%.

Tabla 161

Distribución de frecuencias para datos de % de vacíos de MAC-1 + RAP al 15%.

Intervalo de clase	Xi	fi	Fi	f _i *Xi	Xi-u	(Xi-u) ²	f _i *(Xi-u) ²
[3.267 3.363 >	3.315	1.000	1.000	3.315	-0.132	0.0174	0.0174
[3.363 3.459 >	3.411	0.000	1.000	0.000	-0.036	0.0013	0.0000
[3.459 3.575 >	3.517	2.000	3.000	7.035	0.070	0.0049	0.0098

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 162 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos del % de vacíos de las probetas para MAC-1 añadidas con RAP al 15%.

Tabla 162

Resultados del análisis estadístico para los datos de % de vacíos de MAC-1 + RAP al 15%.

Xi vacíos (%) RAP AL 15%	
Media	3.447
Error típico	0.087
Mediana	3.499
Moda	
Desviación estándar	0.151
Varianza de la muestra	0.023
Curtosis	
Coefficiente de asimetría	-1.364
Rango	0.288
Mínimo	3.277
Máximo	3.565
Suma	10.342
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	0.096
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.18 Análisis estadístico de los resultados del % de vacíos de mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 25%

En la tabla 163 se muestran los datos del % de vacíos de las probetas para MAC-1 añadidas con RAP al 25%, para ser analizados estadísticamente.

Tabla 163

Datos de % de vacíos para MAC-1 + RAP al 25%.

% de vacíos	Probeta No	Xi vacíos (%)
RAP al 25%	1	2.89
	2	3.74
	3	3.73

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 164 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del % de vacíos de las probetas para MAC-1 añadidas con RAP al 25%.

Tabla 164

Distribución de frecuencias para datos de % de vacíos de MAC-1 + RAP al 25%.

Intervalo de clase	Xi	fi	Fi	fi*Xi	Xi-u	(Xi-u)^2	fi*(Xi-u)^2
[2.877 3.160 >	3.019	1.000	1.000	3.019	-0.432	0.1868	0.1868
[3.160 3.443 >	3.302	0.000	1.000	0.000	-0.149	0.0222	0.0000
[3.443 3.746 >	3.595	2.000	3.000	7.190	0.144	0.0207	0.0415

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 165 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos del % de vacíos de las probetas para MAC-1 añadidas con RAP al 25%.

Tabla 165

Resultado del análisis estadístico para datos de % de vacíos de MAC-1 + RAP al 25%.

Xi vacíos (%) RAP AL 25%	
Media	3.451
Error típico	0.282
Mediana	3.729
Moda	
Desviación estándar	0.488
Varianza de la muestra	0.238
Curtosis	
Coefficiente de asimetría	-1.732
Rango	0.849
Mínimo	2.887
Máximo	3.736
Suma	10.353
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	0.283
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.19 Análisis estadístico de los resultados del % de vacíos de mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 35%

En la tabla 166 se muestran los datos del % de vacíos de las probetas para MAC-1 añadidas con RAP al 35%, para ser analizados estadísticamente.

Tabla 166

Datos de % de vacíos para MAC-1 + RAP al 35%.

% de vacíos	Probeta No	Xi vacíos (%)
RAP al 35%	1	3.44
	2	3.48
	3	3.60

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 167 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del % de vacíos de las probetas para MAC-1 añadidas con RAP al 35%.

Tabla 167

Distribución de frecuencias para datos de % de vacíos de MAC-1 + RAP al 35%.

Intervalo de clase				Xi	fi	Fi	fi*Xi	Xi-u	(Xi-u)^2	fi*(Xi-u)^2
[	3.426	3.482	>	3.454	2.000	2.000	6.908	-0.052	0.0027	0.0053
[	3.482	3.538	>	3.510	0.000	2.000	0.000	0.005	0.0000	0.0000
[	3.538	3.615	>	3.576	1.000	3.000	3.576	0.071	0.0050	0.0050

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 168 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos del % de vacíos de las probetas para MAC-1 añadidas con RAP al 35%.

Tabla 168

Resultados de análisis estadístico para datos de % de vacíos de MAC-1 + RAP al 35%.

<i>Xi</i> <i>vacíos (%)</i>	
RAP AL 35%	
Media	3.506
Error típico	0.051
Mediana	3.477
Moda	
Desviación estándar	0.088
Varianza de la muestra	0.008
Curtosis	
Coefficiente de asimetría	1.326
Rango	0.169
Mínimo	3.436
Máximo	3.605
Suma	10.517
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	0.056
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.20 Análisis estadístico de los resultados del % de vacíos de mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 45%

En la tabla 169 se muestran los datos del % de vacíos de las probetas para MAC-1 añadidas con RAP al 45%, para ser analizados estadísticamente.

Tabla 169

Datos de % de vacíos para MAC-1 + RAP al 45%.

% vacíos	Probeta No	Xi vacíos (%)
RAP al 45%	1	3.28
	2	3.46
	3	3.60

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 170 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del % de vacíos de las probetas para MAC-1 añadidas con RAP al 45%.

Tabla 170

Distribución de frecuencias para datos de % de vacíos de MAC-1+ RAP al 45%.

Intervalo de clase	Xi	fi	Fi	fi*Xi	Xi-u	(Xi-u)^2	fi*(Xi-u)^2
[3.275 3.379 >	3.327	1.000	1.000	3.327	-0.121	0.0145	0.0145
[3.379 3.484 >	3.432	1.000	2.000	3.432	-0.016	0.0003	0.0003
[3.484 3.609 >	3.546	1.000	3.000	3.546	0.099	0.0097	0.0097

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 171 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos del % de vacíos de las probetas para MAC-1 añadidas con RAP al 45%.

Tabla 171

Resultado del análisis estadístico para datos de % de vacíos de MAC-1 + RAP al 45%.

<i>Xi</i> <i>vacíos (%)</i>	
RAP AL 45%	
Media	3.448
Error típico	0.091
Mediana	3.459
Moda	
Desviación estándar	0.157
Varianza de la muestra	0.025
Curtosis	
Coefficiente de asimetría	-0.336
Rango	0.314
Mínimo	3.285
Máximo	3.599
Suma	10.343
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	0.105
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.21 Análisis estadístico del ensayo de efecto de humedad (Lottman modificado) en mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1

4.5.21.1 Resistencia a la tracción en condiciones normales

En la tabla 172 se muestran los datos del ensayo de efecto de humedad (Lottman modificado) para MAC-1 con 5.9% de cemento asfáltico (probetas en condiciones normales), para ser analizados estadísticamente.

Tabla 172

Datos de resistencia a la tracción para MAC-1 + RAP al 0% (en condiciones normales).

Lottman Modificado	Probeta No	Xi Resistencia a la tracción (kpa)
5.9% de C.A. condición normal	1	2.19
	2	2.20
	3	2.14

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 173 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del ensayo de efecto de humedad (Lottman modificado) para MAC-1.

Tabla 173

Distribución de frecuencias para datos de resistencia a la tracción de MAC-1 + RAP al 0% (condiciones normales).

Intervalo de clase	Xi	fi	Fi	fi*Xi	Xi-u	(Xi-u)^2	fi*(Xi-u)^2
[2.134 2.152 >	2.143	1.000	1.000	2.143	-0.035	0.0012	0.0012
[2.152 2.170 >	2.161	0.000	1.000	0.000	-0.017	0.0003	0.0000
[2.170 2.209 >	2.190	2.000	3.000	4.379	0.012	0.0001	0.0003

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 174 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos del ensayo de efecto de humedad (Lottman modificado) para MAC-1.

Tabla 174

Resultados del análisis estadístico para datos de resistencia a la tracción de a MAC-1 + RAP al 0% (condiciones normales).

Xi Resistencia a la tracción (kpa)	
5.9% de C.A. condición normal	
Media	2.178
Error típico	0.017
Mediana	2.191

<i>Xi</i> <i>Resistencia a la tracción (kpa)</i>	
5.9% de C.A. condición normal	
Moda	
Desviación estándar	0.029
Varianza de la muestra	0.001
Curtosis	
Coefficiente de asimetría	-1.606
Rango	0.054
Mínimo	2.144
Máximo	2.199
Suma	6.534
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	0.018
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.21.2 Resistencia a la tracción en condiciones críticas

En la tabla 175 se muestran los datos del ensayo de efecto de humedad (Lottman modificado) para MAC-1 con 5.9% de cemento asfáltico (probetas en condiciones críticas), para ser analizados estadísticamente.

Tabla 175

Datos de resistencia a la tracción para MAC-1 + RAP al 0% (condiciones críticas).

Lottman Modificado	Probeta No	Xi Resistencia a la tracción (kpa)
5.9% de C.A. condición crítica	1	1.78
	2	1.76
	3	1.74

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 176 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del ensayo de efecto de humedad (Lottman modificado) para MAC-1.

Tabla 176

Distribución de frecuencias para datos de resistencia a la tracción de MAC-1 + RAP al 0% (condiciones críticas).

Intervalo de clase	X_i	f_i	F_i	$f_i * X_i$	$X_i - u$	$(X_i - u)^2$	$f_i * (X_i - u)^2$
[1.727 1.741 >	1.734	1.000	1.000	1.734	-0.023	0.0005	0.0005
[1.741 1.755 >	1.748	0.000	1.000	0.000	-0.009	0.0001	0.0000
[1.755 1.789 >	1.772	2.000	3.000	3.544	0.015	0.0002	0.0004

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 177 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos del ensayo de efecto de humedad (Lottman modificado) para MAC-1.

Tabla 177

Resultado del análisis estadístico para datos de resistencia a la tracción de MAC-1 + RAP al 0% (condiciones críticas).

X_i Resistencia a la tracción (kpa) 5.9% de C.A. condición crítica	
Media	1.757
Error típico	0.012
Mediana	1.756
Moda	
Desviación estándar	0.021
Varianza de la muestra	0.000
Curtosis	
Coefficiente de asimetría	0.276
Rango	0.042
Mínimo	1.737
Máximo	1.779
Suma	5.272
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	0.014
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.22 Análisis estadístico de los resultados del ensayo de efecto de humedad

(Lottman modificado) en mezclas asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1
añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 39%

4.5.22.1 Resistencia a la tracción en condiciones normales

En la tabla 178 se muestran los datos del ensayo de efecto de humedad (Lottman modificado) para MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 39% (probetas en condiciones normales), para ser analizados estadísticamente.

Tabla 178

Datos de resistencia a la tracción para MAC-1 + RAP al 39% (condiciones normales).

Lottman Modificado	Probeta No	Xi Resistencia a la tracción (kpa)
39.0% de RAP condición normal	1	2.23
	2	2.33
	3	2.28

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 179 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del ensayo de efecto de humedad (Lottman modificado) para MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 39%.

Tabla 179

Distribución de frecuencias para datos de resistencia a la tracción de MAC-1 + RAP al 39% (condiciones normales).

Intervalo de clase	Xi	fi	Fi	fi*Xi	Xi-u	(Xi-u)^2	fi*(Xi-u)^2
[2.223 2.254 >	2.239	1.000	1.000	2.239	-0.040	0.0016	0.0016
[2.254 2.286 >	2.270	1.000	2.000	2.270	-0.009	0.0001	0.0001
[2.286 2.337 >	2.311	1.000	3.000	2.311	0.033	0.0011	0.0011

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 180 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos del ensayo de efecto de humedad (Lottman modificado) para MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 39%.

Tabla 180

Resultado del análisis estadístico para datos de resistencia a la tracción de MAC-1+ RAP al 39% (condiciones normales).

<i>Xi</i> <i>Resistencia a la tracción (kpa)</i> 39.0% de RAP condición normal	
Media	2.279
Error típico	0.027
Mediana	2.276
Moda	
Desviación estándar	0.047
Varianza de la muestra	0.002
Curtosis	
Coefficiente de asimetría	0.238
Rango	0.094
Mínimo	2.233
Máximo	2.327
Suma	6.837
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	0.031
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.22.2 Resistencia a la tracción en condiciones críticas

En la tabla 181 se muestran los datos del ensayo de efecto de humedad (Lottman modificado) para MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 39% (probetas en condiciones críticas), para ser analizados estadísticamente.

Tabla 181

Datos de resistencia a la tracción para MAC-1 + RAP al 39% (condiciones críticas).

Lottman Modificado	Probeta No	Xi Resistencia a la tracción (kpa)
	1	1.81

Lottman Modificado	Probeta No	Xi Resistencia a la tracción (kpa)
39.0% de RAP condición crítica	2	1.68
	3	1.66

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 182 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del ensayo de efecto de humedad (Lottman modificado) para MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 39%.

Tabla 182

Distribución de frecuencias para datos de resistencia a la tracción de MAC-1 + RAP al 39% (condiciones críticas)

Intervalo de clase	Xi	fi	Fi	fi*Xi	Xi-u	(Xi-u)^2	fi*(Xi-u)^2
[1.653 1.703 >	1.678	2.000	2.000	3.356	-0.042	0.0018	0.0036
[1.703 1.753 >	1.728	0.000	2.000	0.000	0.008	0.0001	0.0000
[1.753 1.824 >	1.789	1.000	3.000	1.789	0.069	0.0047	0.0047

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 183 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos del ensayo de efecto de humedad (Lottman modificado) para MAC-1 añadido pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 39%.

Tabla 183

Resultado del análisis estadístico para datos de resistencia a la tracción de MAC-1 + RAP al 39% (condiciones críticas).

Xi Resistencia a la tracción (kpa)	
39.0% de RAP condición crítica	
Media	1.720
Error típico	0.047
Mediana	1.683
Moda	
Desviación estándar	0.082

X_i Resistencia a la tracción (kpa)	
39.0% de RAP condición crítica	
Varianza de la muestra	0.007
Curtosis	
Coefficiente de asimetría	1.608
Rango	0.151
Mínimo	1.663
Máximo	1.814
Suma	5.160
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	0.050
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.23 Análisis estadístico de los resultados del ensayo de CBR (0.1 plg) de la base granular patrón

En la tabla 184 se muestran los datos del % de CBR (0.1 plg) de las muestras de base granular patrón.

Tabla 184

Datos de CBR para base granular + RAP al 0%.

Ensayo de CBR	Muestra No	X_i % CBR (0.1")
Base granular patrón	1	150.45
	2	149.82
	3	149.00

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 185 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del % de CBR (0.1 plg) de la base granular patrón.

Tabla 185

Distribución de frecuencias para datos de CBR de base granular + RAP al 0%.

Intervalo de clase	X_i	f_i	F_i	$f_i \cdot X_i$	$X_i - u$	$(X_i - u)^2$	$f_i \cdot (X_i - u)^2$
[148.988 149.472 >	149.230	1.000	1.000	149.230	-0.525	0.276	0.276
[149.472 149.957 >	149.715	1.000	2.000	149.715	-0.041	0.002	0.002
[149.957 150.462 >	150.210	1.000	3.000	150.210	0.454	0.206	0.206

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 186 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos del % de CBR (0.1 plg) de la base granular patrón.

Tabla 186

Resultado del análisis estadístico para datos de CBR de base granular + RAP al 0%.

<i>Xi</i> % CBR (0.1")	
RAP AL 0%	
Media	149.755
Error típico	0.421
Mediana	149.817
Moda	
Desviación estándar	0.729
Varianza de la muestra	0.532
Curtosis	
Coefficiente de asimetría	-0.375
Rango	1.455
Mínimo	148.998
Máximo	150.452
Suma	449.266
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	0.485
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.24 Análisis estadístico de los resultados del ensayo de CBR (0.1 plg) de la base granular patrón y de la base granular añadida con pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 15.0%

En la tabla 187 se muestran los datos del % de CBR (0.1 plg) de las muestras de base granular añadida con pavimento asfáltico reciclado al 15.0%.

Tabla 187

Datos de CBR para base granular + RAP al 15%.

Ensayo de CBR	Muestra No	Xi % CBR (0.1")
RAP al 15%	1	117.43
	2	115.12
	3	119.88

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.



En la tabla 188 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del % de CBR (0.1 plg) de las muestras de base granular añadida con pavimento asfáltico reciclado al 15.0%.

Tabla 188

Distribución de frecuencias para datos de CBR de base granular +RAP al 15%.

	Intervalo de clase			Xi	fi	Fi	fi*Xi	Xi-u	(Xi-u)^2	fi*(Xi-u)^2
[	115.108	116.696	>	115.902	1.000	1.000	115.902	-1.574	2.479	2.479
[	116.696	118.285	>	117.490	1.000	2.000	117.490	0.014	0.000	0.000
[	118.285	119.893	>	119.089	1.000	3.000	119.089	1.613	2.601	2.601

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 189 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos del % de CBR (0.1 plg) de las muestras de base granular añadida con pavimento asfáltico reciclado al 15.0%.

Tabla 189

Resultado del análisis estadístico para datos de CBR de base granular + RAP al 15%.

<i>Xi</i> <i>% CBR (0.1")</i>	
RAP AL 15%	
Media	117.476
Error típico	1.376
Mediana	117.428
Moda	
Desviación estándar	2.383
Varianza de la muestra	5.679
Curtosis	
Coefficiente de asimetría	0.091
Rango	4.766
Mínimo	115.118
Máximo	119.883
Suma	352.429
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	1.589
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.25 Análisis estadístico de los resultados del ensayo de CBR de la base granular patrón y de la base granular añadida con pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 30.0%

En la tabla 190 se muestran los datos del % de CBR (0.1 plg) de las muestras de base granular añadida con pavimento asfáltico reciclado al 30.0%.

Tabla 190

Datos de CBR para base granular + RAP al 30%.

Ensayo de CBR	Muestra No	Xi % CBR (0.1")
RAP al 30%	1	85.50
	2	85.41
	3	86.90

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 191 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del % de CBR (0.1 plg) de las muestras de base granular añadida con pavimento asfáltico reciclado al 30.0%.

Tabla 191

Distribución de frecuencias para datos de CBR de base granular + RAP al 30%.

Intervalo de clase	Xi	fi	Fi	fi*Xi	Xi-u	(Xi-u)^2	fi*(Xi-u)^2
[85.397 85.894 >	85.646	2.000	2.000	171.291	-0.288	0.083	0.166
[85.894 86.390 >	86.142	0.000	2.000	0.000	0.208	0.043	0.000
[86.390 86.907 >	86.648	1.000	3.000	86.648	0.715	0.511	0.511

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 192 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos del % de CBR (0.1 plg) de las muestras de base granular añadida con pavimento asfáltico reciclado al 30.0%.

Tabla 192

Resultados del análisis estadístico para datos de CBR de base granular + RAP al 30%.

X_i	
% CBR (0.1")	
RAP AL 30%	
Media	85.934
Error típico	0.482
Mediana	85.497
Moda	
Desviación estándar	0.835
Varianza de la muestra	0.698
Curtosis	
Coficiente de asimetría	1.710
Rango	1.489
Mínimo	85.407
Máximo	86.897
Suma	257.801
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	0.496
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.26 Análisis estadístico de los resultados del ensayo de CBR de la base granular patrón y de la base granular añadida con pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 45.0%

En la tabla 193 se muestran los datos del % de CBR (0.1 plg) de las muestras de base granular añadida con pavimento asfáltico reciclado al 45.0%.

Tabla 193

Datos de CBR para base granular + RAP al 45%.

Ensayo de CBR	Muestra No	X_i % CBR (0.1")
RAP al 45%	1	74.80
	2	75.58
	3	74.31

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 194 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del % de CBR (0.1 plg) de las muestras de base granular añadida con pavimento asfáltico reciclado al 45.0%.

Tabla 194

Distribución de frecuencias para datos de CBR de base granular +RAP al 45%.

Intervalo de clase	X_i	f_i	F_i	$f_i \cdot X_i$	$X_i - u$	$(X_i - u)^2$	$f_i \cdot (X_i - u)^2$
[74.303 74.725 >	74.514	1.000	1.000	74.514	-0.383	0.147	0.147
[74.725 75.147 >	74.936	1.000	2.000	74.936	0.039	0.002	0.002
[75.147 75.588 >	75.368	1.000	3.000	75.368	0.471	0.222	0.222

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 195 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos del % de CBR (0.1 plg) de las muestras de base granular añadida con pavimento asfáltico reciclado al 45.0%.

Tabla 195

Resultados del análisis estadístico para datos de CBR de base granular + RAP al 45%.

X_i % CBR (0.1") RAP AL 45%	
Media	74.897
Error típico	0.369
Mediana	74.799
Moda	
Desviación estándar	0.639
Varianza de la muestra	0.408
Curtosis	
Coefficiente de asimetría	0.673
Rango	1.266
Mínimo	74.313
Máximo	75.578
Suma	224.690
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	0.422
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.5.27 Análisis estadístico de los resultados del ensayo de CBR de la base granular patrón y de la base granular añadida con pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 60.0%

En la tabla 196 se muestran los datos del % de CBR (0.1 plg) de las muestras de base granular añadida con pavimento asfáltico reciclado al 60.0%.

Tabla 196

Datos de CBR para base granular + RAP al 60%.

Ensayo de CBR	Muestra No	Xi % CBR (0.1")
RAP al 60%	1	69.75
	2	68.88
	3	70.14

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 197 se muestra y presenta la distribución de las frecuencias de los resultados del % de CBR (0.1 plg) de las muestras de base granular añadida con pavimento asfáltico reciclado al 60.0%.

Tabla 197

Distribución de frecuencias para datos de CBR de base granular + RAP al 60%.

Intervalo de clase	Xi	fi	Fi	fi*Xi	Xi-u	(Xi-u)^2	fi*(Xi-u)^2
[68.867 69.289 >	69.078	1.000	1.000	69.078	-0.511	0.261	0.261
[69.289 69.711 >	69.500	0.000	1.000	0.000	-0.089	0.008	0.000
[69.711 70.153 >	69.932	2.000	3.000	139.864	0.343	0.118	0.235

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 198 se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos del % de CBR (0.1 plg) de las muestras de base granular añadida con pavimento asfáltico reciclado al 60.0%.

Tabla 198

Resultados del análisis estadístico para datos de CBR de base granular + RAP al 60%.

X_i	
% CBR (0.1")	
RAP AL 60%	
Media	69.589
Error típico	0.374
Mediana	69.746
Moda	
Desviación estándar	0.647
Varianza de la muestra	0.419
Curtosis	
Coefficiente de asimetría	-1.031
Rango	1.266
Mínimo	68.877
Máximo	70.143
Suma	208.766
Número de Intervalos de clase	3.000
Tamaño de intervalos	0.422
Cuenta	3.000

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.6 PRUEBA DE HIPÓTESIS – CONTRASTACIÓN

En esta sección se presenta la contrastación de la hipótesis para los resultados del ensayo de flujo Marshal, resultados de estabilidad Marshall, % de vacíos en la mezcla y los resultados del ensayo efecto de la humedad en mezclas asfálticas (Lottman modificado). Así como, la contrastación de los resultados de CBR de la base granular añadida con pavimento asfáltico reciclado.

4.6.1 Flujo

4.6.1.1 Prueba de hipótesis del flujo de la mezcla asfáltica en caliente patrón y la mezcla asfáltica en caliente adicionado con pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 15.0%

a) Parámetros de interés

En la tabla 199 se muestran los parámetros de interés del flujo, como son el número de muestra, media y varianza para muestra patrón y para la muestra adicionada con RAP al 15.0% del peso total de la mezcla.

Tabla 199

Parámetros de flujo para MAC-1 y MAC-1+RAP al 15%.

Descripción	Grupo 1	Grupo 2
	MAC-1	MAC-1 + RAP
% de RAP	0%	15%
Número de muestra (n)	3	3
Media (u)	9.40	9.65
Varianza (σ^2)	0.258	0.258

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

b) Hipótesis

Hipótesis nula $H_0: u_1 \leq u_2$, se rechaza la hipótesis nula, si $Z_o > Z$.

Al añadir RAP en 15.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, el flujo INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.

Hipótesis alternativa $H_a: u_1 > u_2$, unilateral con cola a la derecha.

Al añadir RAP en 15.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, el flujo NO INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.



c) Nivel de significancia

Tenemos: $\sigma = 0.05$, $Z = 1.645$ y confiabilidad del 95%.

d) Estadística de prueba

Se utilizó el estadístico de prueba de hipótesis para dos poblaciones con medias y varianza conocida, se presenta como sigue:

$$Z_o = \frac{u_1 - u_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

Reemplazando tenemos: $Z_o = -0.612$

e) Región de rechazo

De la interpolación de la distribución normal, se tiene que para 0.05 corresponde un valor de $Z = 1.645$, por lo tanto, se rechaza H_o si $Z_o > Z$.

Por lo tanto, debido a que $Z_o = -0.612$ es < 1.645 , se acepta H_o y se rechaza H_a , con un nivel de significancia de 0.05, por tanto, se concluye que al añadir RAP en 15.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, el flujo INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.

4.6.1.2 Prueba de hipótesis del flujo de la mezcla asfáltica en caliente patrón y la mezcla asfáltica en caliente adicionado con pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 25.0%

a) Parámetros de interés

En la tabla 200 se muestran los parámetros de interés del flujo, como son el número de muestra, media y varianza para muestra patrón y para la muestra adicionada con RAP al 25.0% del peso total de la mezcla.

Tabla 200

Parámetros de interés de flujo para MAC-1 y MAC-1+RAP al 25%.

Descripción	Grupo 1	Grupo 2
	MAC-1	MAC-1 + RAP
% de RAP	0%	25%
Número de muestra (n)	3	3
Media (u)	9.40	8.91
Varianza (σ^2)	0.258	0.052

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

b) Hipótesis

Hipótesis nula $H_0: u_1 \leq u_2$, se rechaza la hipótesis nula, si $Z_0 > Z$.

Al añadir RAP en 25.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, el flujo INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.

Hipótesis alternativa $H_a: u_1 > u_2$, unilateral con cola a la derecha.

Al añadir RAP en 25.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, el flujo NO INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.

c) Nivel de significancia

Tenemos: $\sigma = 0.1$, $Z = 1.28$ y confiabilidad del 90%

d) Estadística de prueba

Se utilizó el estadístico de prueba de hipótesis para dos poblaciones con medias y varianza conocida, se presenta como sigue:

$$Z_0 = \frac{u_1 - u_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

Reemplazando tenemos: $Z_o = 1.526$

e) Región de rechazo

De la interpolación de la distribución normal, se tiene que para 0.1 corresponde un valor de $Z = 1.28$, por lo tanto, se rechaza H_o si $Z_o > Z$.

Por lo tanto, debido a que $Z_o = 1.526$ es > 1.28 , se rechaza $H_o: u_1 \leq u_2$ y se acepta $H_a: u_1 > u_2$, con un nivel de significancia de 0.1, por tanto, se concluye que al añadir RAP en 25.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, el flujo NO INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.

4.6.1.3 Prueba de hipótesis del flujo de la mezcla asfáltica en caliente patrón y la mezcla asfáltica en caliente adicionado con pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 35.0%

a) Parámetros de interés

En la tabla 201 se muestran los parámetros de interés del flujo, como son el número de muestra, media y varianza para muestra patrón y para la muestra adicionada con RAP al 35.0% del peso total de la mezcla.

Tabla 201

Parámetros de interés de flujo para MAC-1 y MAC-1+RAP al 35%.

Descripción	Grupo 1	Grupo 2
	MAC-1	MAC-1 + RAP
% de RAP	0%	35%
Número de muestra (n)	3	3
Media (u)	9.40	8.30
Varianza (σ^2)	0.258	0.038

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

b) Hipótesis

Hipótesis nula $H_0: u_1 \leq u_2$, se rechaza la hipótesis nula, si $Z_o > Z$.

Al añadir RAP en 35.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, el flujo INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.

Hipótesis alternativa $H_a: u_1 > u_2$, unilateral con cola a la derecha.

Al añadir RAP en 35.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, el flujo NO INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.

c) Nivel de significancia

Tenemos: $\sigma = 0.05$ y $Z = 1.645$

d) Estadística de prueba

Se utilizó el estadístico de prueba de hipótesis para dos poblaciones con medias y varianza conocida, se presenta como sigue:

$$Z_o = \frac{u_1 - u_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

Reemplazando tenemos: $Z_o = 3.506$

e) Región de rechazo

De la interpolación de la distribución normal, se tiene que para 0.05 corresponde un valor de $Z = 1.645$, por lo tanto, se rechaza H_0 si $Z_o > Z$.

Por lo tanto, debido a que $Z_o = 3.506$ es $> Z = 1.645$, se rechaza $H_o: u_1 \leq u_2$ y se acepta $H_a: u_1 > u_2$, con un nivel de significancia de 0.05, por tanto, se concluye que al añadir RAP en 35.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, el flujo NO INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.

4.6.1.4 Prueba de hipótesis del flujo de la mezcla asfáltica en caliente patrón y la mezcla asfáltica en caliente adicionado con pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 45.0%

a) Parámetros de interés

En la tabla 202 se muestran los parámetros de interés del flujo, como son el número de muestra, media y varianza para muestra patrón y para la muestra adicionada con RAP al 45.0% del peso total de la mezcla.

Tabla 202

Parámetros de interés de flujo para MAC-1 y MAC-1+RAP al 45%.

Descripción	Grupo 1	Grupo 2
	MAC-1	MAC-1 + RAP
% de RAP	0%	45%
Número de muestra (n)	3	3
Media (u)	9.40	7.54
Varianza (σ^2)	0.258	0.022

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

b) Hipótesis

Hipótesis nula $H_o: u_1 \leq u_2$, se rechaza la hipótesis nula, si $Z_o > Z$.

Al añadir RAP en 45.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, el flujo INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.



Hipótesis alternativa $H_a: u_1 > u_2$, unilateral con cola a la derecha.

Al añadir RAP en 45.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, el flujo NO INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.

c) Nivel de significancia

Tenemos: $\sigma = 0.05$ y $Z = 1.645$

d) Estadística de prueba

Se utilizó el estadístico de prueba de hipótesis para dos poblaciones con medias y varianza conocida, se presenta como sigue:

$$Z_o = \frac{u_1 - u_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

Reemplazando tenemos: $Z_o = 6.102$

e) Región de rechazo

De la interpolación de la distribución normal, se tiene que para 0.05 corresponde un valor de $Z = 1.645$, por lo tanto, se rechaza H_o si $Z_o > Z$.

Por lo tanto, debido a que $Z_o = 6.102$ es $> Z = 1.645$, se rechaza $H_o: u_1 \leq u_2$ y se acepta $H_a: u_1 > u_2$, con un nivel de significancia de 0.05, por tanto, se concluye que al añadir RAP en 45.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, el flujo NO INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.

4.6.2 Estabilidad

4.6.2.1 Prueba de hipótesis de la estabilidad de la mezcla asfáltica en caliente patrón y la mezcla asfáltica en caliente adicionado con pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 15.0%

a) Parámetros de interés

En la tabla 203 se muestran los parámetros de interés de estabilidad, como son el número de muestra, media y varianza para muestra patrón y para la muestra adicionada con RAP al 15.0% del peso total de la mezcla.

Tabla 203

Parámetros de interés de estabilidad para MAC-1 y MAC-1+RAP al 15%.

Descripción	Grupo 1	Grupo 2
	MAC-1	MAC-1 + RAP
% de RAP	0%	15%
Número de muestra (n)	3	3
Media (u)	1148.50	999.32
Varianza (σ^2)	10965.547	1344.530

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

b) Hipótesis

Hipótesis nula $H_0: u_1 \geq u_2$, se rechaza la hipótesis nula, si $Z_o < Z$.

Al añadir RAP en 15.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, la estabilidad no incrementa respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.

Hipótesis alternativa $H_a: u_1 < u_2$, unilateral con cola a la izquierda.

Al añadir RAP en 15.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, la estabilidad INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.



c) Nivel de significancia

Tenemos: $\sigma = 0.05$, $Z = -1.645$ y confiabilidad del 95%.

d) Estadística de prueba

Se utilizó el estadístico de prueba de hipótesis para dos poblaciones con medias y varianza conocida, se presenta como sigue:

$$Z_o = \frac{u_1 - u_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

Reemplazando tenemos: $Z_o = 2.329$

e) Región de rechazo

De la interpolación de la distribución normal, se tiene que para 0.05 corresponde un valor de $Z = 1.645$, por lo tanto, se rechaza H_o si $Z_o < Z$.

Por lo tanto, debido a que $Z_o = 2.329$ es > -1.645 , se acepta $H_o: u_1 \geq u_2$ y se rechaza $H_a: u_1 < u_2$, con un nivel de significancia de 0.05, por tanto, se concluye que al añadir RAP en 15.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, la estabilidad NO INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.

4.6.2.2 Prueba de hipótesis de la estabilidad de la mezcla asfáltica en caliente patrón y la mezcla asfáltica en caliente adicionado con pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 25.0%

a) Parámetros de interés

En la tabla 204 se muestran los parámetros de interés de la estabilidad, como son el número de muestra, media y varianza para muestra patrón y para la muestra adicionada con RAP al 25.0% del peso total de la mezcla.

Tabla 204

Parámetros de interés de estabilidad para MAC-1 y MAC-1+RAP al 25%.

Descripción	Grupo 1	Grupo 2
	MAC-1	MAC-1 + RAP
% de RAP	0%	25%
Número de muestra (n)	3	3
Media (u)	1148.50	1129.42
Varianza (σ^2)	10965.547	5196.045

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

b) Hipótesis

Hipótesis nula $H_0: u_1 \geq u_2$, se rechaza la hipótesis nula, si $Z_0 < Z$.

Al añadir RAP en 25.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, la estabilidad NO INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.

Hipótesis alternativa $H_a: u_1 < u_2$, unilateral con cola a la izquierda.

Al añadir RAP en 25.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, la estabilidad INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.



c) Nivel de significancia

Tenemos: $\sigma = 0.05$, $Z = -1.645$ y confiabilidad del 95%

d) Estadística de prueba

Se utilizó el estadístico de prueba de hipótesis para dos poblaciones con medias y varianza conocida, se presenta como sigue:

$$Z_o = \frac{u_1 - u_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

Reemplazando tenemos: $Z_o = 0.260$

e) Región de rechazo

De la interpolación de la distribución normal, se tiene que para 0.05 corresponde un valor de $Z = -1.645$, por lo tanto, se rechaza H_o si $Z_o < Z$.

Por lo tanto, debido a que $Z_o = 0.260$ es > -1.645 , se acepta $H_o: u_1 \geq u_2$ y se rechaza $H_a: u_1 < u_2$, con un nivel de significancia de 0.05, por tanto, se concluye que al añadir RAP en 25.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, la estabilidad NO INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.

4.6.2.3 Prueba de hipótesis de la estabilidad de la mezcla asfáltica en caliente patrón y la mezcla asfáltica en caliente adicionado con pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 35.0%

a) Parámetros de interés

En la tabla 205 se muestran los parámetros de interés de la estabilidad, como son el número de muestra, media y varianza para muestra patrón y para la muestra adicionada con RAP al 35.0% del peso total de la mezcla.

Tabla 205

Parámetros de interés de estabilidad para MAC-1 y MAC-1+RAP al 35%.

Descripción	Grupo 1	Grupo 2
	MAC-1	MAC-1 + RAP
% de RAP	0%	35%
Número de muestra (n)	3	3
Media (u)	1148.50	1149.04
Varianza (σ^2)	10965.547	23523.239

b) Hipótesis

Hipótesis nula $H_0: u_1 \geq u_2$, se rechaza la hipótesis nula, si $Z_0 < Z$.

Al añadir RAP en 35.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, la estabilidad NO INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.

Hipótesis alternativa $H_a: u_1 < u_2$, unilateral con cola a la izquierda.

Al añadir RAP en 35.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, la estabilidad INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.



c) Nivel de significancia

Tenemos: $\sigma = 0.05$ y $Z = -1.645$

d) Estadística de prueba

Se utilizó el estadístico de prueba de hipótesis para dos poblaciones con medias y varianza conocida, se presenta como sigue:

$$Z_o = \frac{u_1 - u_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

Reemplazando tenemos: $Z_o = -0.005$

e) Región de rechazo

De la interpolación de la distribución normal, se tiene que para 0.05 corresponde un valor de $Z = -1.645$, por lo tanto, se rechaza H_o si $Z_o < Z$.

Por lo tanto, debido a que $Z_o = -0.005$ es $> Z = -1.645$, se acepta $H_o: u_1 \geq u_2$ y se rechaza $H_a: u_1 < u_2$, con un nivel de significancia de 0.05, por tanto, se concluye que al añadir RAP en 35.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, la estabilidad NO INCREMENTA significativamente respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.

4.6.2.4 Prueba de hipótesis de la estabilidad de la mezcla asfáltica en caliente patrón y la mezcla asfáltica en caliente adicionado con pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 45.0%

a) Parámetros de interés

En la tabla 206 se muestran los parámetros de interés de la estabilidad, como son el número de muestra, media y varianza para muestra patrón y para la muestra adicionada con RAP al 45.0% del peso total de la mezcla.

Tabla 206

Parámetros de interés de estabilidad para MAC-1 y MAC-1+RAP al 45%.

Descripción	Grupo 1	Grupo 2
	MAC-1	MAC-1 + RAP
% de RAP	0%	45%
Número de muestra (n)	3	3
Media (u)	1148.50	1330.73
Varianza (σ^2)	10965.547	298.895

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

b) Hipótesis

Hipótesis nula $H_0: u_1 \geq u_2$, se rechaza la hipótesis nula, si $Z_o < Z$.

Al añadir RAP en 45.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, la estabilidad NO INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.

Hipótesis alternativa $H_a: u_1 < u_2$, unilateral con cola a la izquierda.

Al añadir RAP en 45.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, la estabilidad INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.



c) Nivel de significancia

Tenemos: $\sigma = 0.05$ y $Z = -1.645$

d) Estadística de prueba

Se utilizó el estadístico de prueba de hipótesis para dos poblaciones con medias y varianza conocida, se presenta como sigue:

$$Z_o = \frac{u_1 - u_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

Reemplazando tenemos: $Z_o = -2.974$

e) Región de rechazo

De la interpolación de la distribución normal, se tiene que para 0.05 corresponde un valor de $Z = -1.645$, por lo tanto, se rechaza H_o si $Z_o < Z$.

Por lo tanto, debido a que $Z_o = -2.974$ es $< Z = -1.645$, se rechaza $H_o: u_1 \geq u_2$ y se acepta $H_a: u_1 < u_2$, con un nivel de significancia de 0.05, por tanto, se concluye que al añadir RAP en 45.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, la resistencia a la tracción INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.

4.6.3 Efecto de la humedad en mezclas asfálticas – Lottman modificado

(resistencia a la tracción)

4.6.3.1 Prueba de hipótesis de la resistencia a la tracción (Lottman modificado) de la mezcla asfáltica en caliente patrón y la mezcla asfáltica en caliente adicionado con pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 39.0% (condición normal)

a) Parámetros de interés

En la tabla 207 se muestran los parámetros de interés de la resistencia a la tracción, como son el número de muestra, media y varianza para muestra patrón y para la muestra adicionada con RAP al 39.0% del peso total de la mezcla.

Tabla 207

Parámetros de interés de resistencia a la tracción para MAC-1 y MAC-1+RAP al 39% (condiciones normales).

Descripción	Grupo 1	Grupo 2
	MAC-1	MAC-1 + RAP
% de RAP	0%	39%
Número de muestra (n)	3	3
Media (u)	2.18	2.28
Varianza (σ^2)	0.001	0.002

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

b) Hipótesis

Hipótesis nula $H_0: u_1 \geq u_2$, se rechaza la hipótesis nula, si $Z_0 < Z$.

Al añadir RAP en 39.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, la resistencia a la tracción NO INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.

Hipótesis alternativa $H_a: u_1 < u_2$, unilateral con cola a la izquierda.



Al añadir RAP en 39.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, la resistencia a la tracción INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.

c) Nivel de significancia

Tenemos: $\sigma = 0.05$ y $Z = -1.645$

d) Estadística de prueba

Se utilizó el estadístico de prueba de hipótesis para dos poblaciones con medias y varianza conocida, se presenta como sigue:

$$Z_o = \frac{u_1 - u_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

Reemplazando tenemos: $Z_o = -3.149$

e) Región de rechazo

De la interpolación de la distribución normal, se tiene que para 0.05 corresponde un valor de $Z = -1.645$, por lo tanto, se rechaza H_o si $Z_o < Z$.

Por lo tanto, debido a que $Z_o = -3.149$ es $< Z = -1.645$, se rechaza $H_o: u_1 \geq u_2$ y se acepta $H_a: u_1 < u_2$, con un nivel de significancia de 0.05, por tanto, se concluye que al añadir RAP en 39.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, la estabilidad INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1.

4.6.3.2 Prueba de hipótesis de la resistencia a la tracción (Lottman modificado) de la mezcla asfáltica en caliente patrón y la mezcla asfáltica en caliente adicionado con pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 39.0% (condición crítica)

a) Parámetros de interés

En la tabla 208 se muestran los parámetros de interés de la resistencia a la tracción, como son el número de muestra, media y varianza para muestra patrón y para la muestra adicionada con RAP al 39.0% del peso total de la mezcla (en condición crítica).

Tabla 208

Parámetros de interés de resistencia a la tracción para MAC-1 y MAC-1+RAP al 39% (condiciones críticas).

Descripción	Grupo 1	Grupo 2
	MAC-1	MAC-1 + RAP
% de RAP	0%	39%
Número de muestra (n)	3	3
Media (u)	1.76	1.72
Varianza (σ^2)	0.0004	0.007

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

b) Hipótesis

Hipótesis nula $H_0: u_1 \geq u_2$, se rechaza la hipótesis nula, si $Z_0 < Z$.

Al añadir RAP en 39.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, la resistencia a la tracción NO INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1 (en condiciones críticas).

Hipótesis alternativa $H_a: u_1 < u_2$, unilateral con cola a la izquierda.



Al añadir RAP en 39.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, la resistencia a la tracción INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1 en condiciones críticas).

c) Nivel de significancia

Tenemos: $\sigma = 0.05$ y $Z = -1.645$

d) Estadística de prueba

Se utilizó el estadístico de prueba de hipótesis para dos poblaciones con medias y varianza conocida, se presenta como sigue:

$$Z_o = \frac{u_1 - u_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

Reemplazando tenemos: $Z_o = 0.767$

e) Región de rechazo

De la interpolación de la distribución normal, se tiene que para 0.05 corresponde un valor de $Z = -1.645$, por lo tanto, se rechaza H_o si $Z_o < Z$.

Por lo tanto, debido a que $Z_o = 0.767$ es $> Z = -1.645$, se acepta $H_o: u_1 \geq u_2$ y se rechaza $H_a: u_1 < u_2$, con un nivel de significancia de 0.05, por tanto, se concluye que al añadir RAP en 39.0% del peso total de la mezcla a la mezcla asfáltica en caliente MAC-1, la resistencia a la tracción NO INCREMENTA respecto a la mezcla asfáltica patrón MAC-1 (en condiciones críticas).

4.6.4 Ensayo de relación de soporte de California (CBR)

4.6.4.1 Prueba de hipótesis del % de CBR (0.1”) de la base granular patrón y de la base granular adicionado con pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 15.0%

a) Parámetros de interés

En la tabla 209 se muestran los parámetros de interés del % de CBR (0.1”), como son el número de muestra, media y varianza para la base granular patrón y para la base granular adicionada con RAP al 15.0% del peso total de la mezcla.

Tabla 209

Parámetros de interés de CBR para base granular patrón y base granular + RAP al 15%.

Descripción	Grupo 1	Grupo 2
	MAC-1	BASE GRANULAR + RAP
% de RAP	0%	15%
Número de muestra (n)	3	3
Media (u)	149.76	117.48
Varianza (σ^2)	0.532	5.679

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

b) Hipótesis

Hipótesis nula $H_0: u_1 \leq u_2$, se rechaza la hipótesis nula, si $Z_o > Z$.

Al añadir RAP en 15.0% del peso total de la combinación (Base granular + RAP), % de CBR INCREMENTA respecto a la base granular patrón.

Hipótesis alternativa $H_a: u_1 > u_2$, unilateral con cola a la derecha.

Al añadir RAP en 15.0% del peso total de la combinación (Base granular + RAP), % de CBR NO INCREMENTA respecto a la base granular patrón.



c) Nivel de significancia

Tenemos: $\sigma = 0.05$, $Z = 1.645$ y confiabilidad del 95%.

d) Estadística de prueba

Se utilizó el estadístico de prueba de hipótesis para dos poblaciones con medias y varianza conocida, se presenta como sigue:

$$Z_o = \frac{u_1 - u_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

Reemplazando tenemos: $Z_o = 22.434$

e) Región de rechazo

De la interpolación de la distribución normal, se tiene que para 0.05 corresponde un valor de $Z = 1.645$, por lo tanto, se rechaza H_o si $Z_o > Z$.

Por lo tanto, debido a que $Z_o = 22.434$ es > 1.645 , se rechaza $H_o: u_1 \leq u_2$ y se acepta $H_a: u_1 > u_2$, con un nivel de significancia de 0.05, por tanto, se concluye que Al añadir RAP en 15.0% del peso total de la combinación (Base granular + RAP), % de CBR NO INCREMENTA respecto a la base granular patrón.

4.6.4.2 Prueba de hipótesis del % de CBR (0.1”) de la base granular patrón y de la base granular adicionado con pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 30.0%

a) Parámetros de interés

En la tabla 210 se muestran los parámetros de interés del % de CBR (0.1”), como son el número de muestra, media y varianza para la base granular patrón y para la base granular adicionada con RAP al 30.0% del peso total de la mezcla.

Tabla 210

Parámetros de interés de CBR para base granular patrón y base granular +RAP al 30%.

Descripción	Grupo 1	Grupo 2
	MAC-1	BASE GRANULAR + RAP
% de RAP	0%	30%
Número de muestra (n)	3	3
Media (u)	149.76	85.93
Varianza (σ^2)	0.532	0.698

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

b) Hipótesis

Hipótesis nula $H_0: u_1 \leq u_2$, se rechaza la hipótesis nula, si $Z_o > Z$.

Al añadir RAP en 30.0% del peso total de la combinación (Base granular + RAP), % de CBR INCREMENTA respecto a la base granular patrón.

Hipótesis alternativa $H_a: u_1 > u_2$, unilateral con cola a la derecha.

Al añadir RAP en 30.0% del peso total de la combinación (Base granular + RAP), % de CBR NO INCREMENTA respecto a la base granular patrón.

c) Nivel de significancia

Tenemos: $\sigma = 0.05$, $Z = 1.645$ y confiabilidad del 95%.

d) Estadística de prueba

Se utilizó el estadístico de prueba de hipótesis para dos poblaciones con medias y varianza conocida, se presenta como sigue:

$$Z_o = \frac{u_1 - u_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

Reemplazando tenemos: $Z_o = 99.699$

e) Región de rechazo

De la interpolación de la distribución normal, se tiene que para 0.05 corresponde un valor de $Z = 1.645$, por lo tanto, se rechaza H_0 si $Z_0 > Z$.

Por lo tanto, debido a que $Z_0 = 99.699$ es > 1.645 , se rechaza $H_0: u_1 \leq u_2$ y se acepta $H_a: u_1 > u_2$, con un nivel de significancia de 0.05, por tanto, se concluye que Al añadir RAP en 30.0% del peso total de la combinación (Base granular + RAP), % de CBR NO INCREMENTA respecto a la base granular patrón.

4.6.4.3 Prueba de hipótesis del % de CBR (0.1”) de la base granular patrón y de la base granular adicionado con pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 45.0%

a) Parámetros de interés

En la tabla 211 se muestran los parámetros de interés del % de CBR (0.1”), como son el número de muestra, media y varianza para la base granular patrón y para la base granular adicionada con RAP al 45.0% del peso total de la mezcla.

Tabla 211

Parámetros de interés de CBR para base granular patrón y base granular + RAP al 45%.

Descripción	Grupo 1	Grupo 2
	MAC-1	BASE GRANULAR + RAP
% de RAP	0%	45%
Número de muestra (n)	3	3
Media (u)	149.76	74.90
Varianza (σ^2)	0.532	0.408

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

b) Hipótesis

Hipótesis nula $H_0: u_1 \leq u_2$, se rechaza la hipótesis nula, si $Z_0 > Z$.



Al añadir RAP en 45.0% del peso total de la combinación (Base granular + RAP),
% de CBR INCREMENTA respecto a la base granular patrón.

Hipótesis alternativa $H_a: u_1 > u_2$, unilateral con cola a la derecha.

Al añadir RAP en 45.0% del peso total de la combinación (Base granular + RAP),
% de CBR NO INCREMENTA respecto a la base granular patrón.

c) Nivel de significancia

Tenemos: $\sigma = 0.05$, $Z = 1.645$ y confiabilidad del 95%.

d) Estadística de prueba

Se utiliza el estadístico de prueba de hipótesis para dos poblaciones con medias y
varianza conocida, se presenta como sigue:

$$Z_o = \frac{u_1 - u_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

Reemplazando tenemos: $Z_o = 133.769$

e) Región de rechazo

De la interpolación de la distribución normal, se tiene que para 0.05 corresponde
un valor de $Z = 1.645$, por lo tanto, se rechaza H_o si $Z_o > Z$.

Por lo tanto, debido a que $Z_o = 133.769$ es > 1.645 , se rechaza $H_o: u_1 \leq u_2$ y se
acepta $H_a: u_1 > u_2$, con un nivel de significancia de 0.05, por tanto, se concluye que Al
añadir RAP en 45.0% del peso total de la combinación (Base granular + RAP), % de CBR
NO INCREMENTA respecto a la base granular patrón.

4.6.4.4 Prueba de hipótesis del % de CBR (0.1”) de la base granular patrón y de la base granular adicionado con pavimento asfáltico reciclado (RAP) al 60.0%

a) Parámetros de interés

En la tabla 212 se muestran los parámetros de interés del % de CBR (0.1”), como son el número de muestra, media y varianza para la base granular patrón y para la base granular adicionada con RAP al 60.0% del peso total de la mezcla.

Tabla 212

Parámetros de interés de CBR para base granular patrón y base granular + RAP al 60%.

Descripción	Grupo 1	Grupo 2
	MAC-1	BASE GRANULAR + RAP
% de RAP	0%	60%
Número de muestra (n)	3	3
Media (u)	149.76	69.59
Varianza (σ^2)	0.532	0.419

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

b) Hipótesis

Hipótesis nula $H_0: u_1 \leq u_2$, se rechaza la hipótesis nula, si $Z_o > Z$.

Al añadir RAP en 60.0% del peso total de la combinación (Base granular + RAP), % de CBR INCREMENTA respecto a la base granular patrón.

Hipótesis alternativa $H_a: u_1 > u_2$, unilateral con cola a la derecha.

Al añadir RAP en 60.0% del peso total de la combinación (Base granular + RAP), % de CBR NO INCREMENTA respecto a la base granular patrón.

c) Nivel de significancia

Tenemos: $\sigma = 0.05$, $Z = 1.645$ y confiabilidad del 95%.



d) Estadística de prueba

Se utiliza el estadístico de prueba de hipótesis para dos poblaciones con medias y varianzas conocidas, se presenta como sigue:

$$Z_o = \frac{u_1 - u_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

Reemplazando tenemos: $Z_o = 142.388$

e) Región de rechazo

De la interpolación de la distribución normal, se tiene que para 0.05 corresponde un valor de $Z = 1.645$, por lo tanto, se rechaza H_o si $Z_o > Z$.

Por lo tanto, debido a que $Z_o = 142.388$ es > 1.645 , se rechaza $H_o: u_1 \leq u_2$ y se acepta $H_a: u_1 > u_2$, con un nivel de significancia de 0.05, por tanto, se concluye que Al añadir RAP en 60.0% del peso total de la combinación (Base granular + RAP), % de CBR NO INCREMENTA respecto a la base granular patrón.



4.7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.7.1 Del flujo Marshall de la mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 y la adición de pavimento asfáltico reciclado (RAP) al MAC-1.

Del flujo Marshall de la mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 y la adición de pavimento asfáltico reciclado (RAP) al MAC-1.

Se presentan los resultados obtenidos en la presente investigación y en las investigaciones realizadas en los antecedentes acerca del flujo Marshall de mezclas asfáltica en caliente añadida con pavimento asfáltico reciclado (RAP).

Como se observa en la tabla 213, en la presente investigación realizada se tiene un flujo promedio de 9.6 mm para la mezcla asfáltica en caliente patrón (tipo MAC-1, utilizando cemento portland tipo IP como filler y con cemento asfáltico PEN 120-150). En la presente investigación se tiene que a medida que el RAP incrementa en la mezcla, el flujo desciende respecto de la muestra patrón.

En la investigación realizada por (Huari, 2020, pág. 119) tiene un flujo promedio de 10.7 mm para una mezcla asfáltica en caliente patrón (tipo MAC-2, utilizando cal hidratada como filler y cemento asfáltico BETUTEC IB). En la investigación de (Huari, 2020), el flujo en una primera instancia desciende para una adición de RAP al 15% y para las siguientes tasaciones de 30% y 40%, aumenta hasta 14 mm como máximo, esto sucede debido a que el cemento asfáltico que usó actúa también como un rejuvenecedor para el RAP, por lo tanto recupera su influencia de flexibilidad y también porque el tipo MAC-2 respecto al MAC-1 (mezcla patrón de la presente investigación) se comporta de manera más flexible, debido a que el MAC-1 tiene una gradación en su granulometría con tamaño máximo nominal de 3/4".

Tabla 213

Comparación de resultados de flujo con Huari, 2020.

Resultados obtenidos en la presente investigación		Resultados de Huari, 2020	
% de RAP	Flujo (mm)	% de RAP	Flujo (mm)
39%	8.00	40%	13.1

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la investigación de (Fustamante, 2018), para una mezcla asfáltica patrón tipo MAC-2, con cemento asfáltico PEN 60-70, como se aprecia en la tabla 214, a mayor porcentaje de RAP añadido a la mezcla, el flujo tiende a disminuir hasta 3.73 mm estando este resultado fuera de los parámetros exigidos por la EG-2013. En la presente investigación se añade RAP progresivamente hasta obtener el flujo mínimo permitido por la (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013) que es de 8.0 mm, esta condición se da para una adición de RAP de 39.0% de la mezcla total.

Tabla 214

Comparación de resultados de flujo con Fustamante, 2018.

Resultados obtenidos en la presente investigación		Resultados de Fustamante, 2018	
% de RAP	Flujo (mm)	% de RAP	Flujo (mm)
39%	8.00	30%	3.73

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.7.2 De la Estabilidad Marshall de la mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 y la adición de pavimento asfáltico reciclado (RAP) al MAC-1.

Se presentan los resultados obtenidos en la presente investigación y en las investigaciones realizadas en los antecedentes acerca de la estabilidad Marshall de mezclas asfáltica en caliente añadida con pavimento asfáltico reciclado (RAP).

Como se observa en la tabla 215, en la presente investigación realizada se tiene una estabilidad de 1149 kg promedio para la mezcla asfáltica en caliente patrón (tipo

MAC-1), y a medida que se aumenta la cantidad de RAP en la mezcla tiene a aumentar la estabilidad respecto al MAC-1.

En la investigación realizada por (Huari, 2020, pág. 119), se tiene una estabilidad promedio de 2613 kg para la muestra patrón MAC-2 y a medida que incrementa la cantidad de RAP en la mezcla la estabilidad tiende a incrementarse también. Esto se da debido a que, el RAP proporciona a la mezcla patrón cierta rigidez, debido a que durante su vida útil perdió la característica de flexibilidad en su mayoría y aunque se le agregue rejuvenecedores, no se recupera la totalidad de sus características reológicas.

Tabla 215

Comparación de resultados de estabilidad con Huari, 2020.

Resultados obtenidos en la presente investigación		Resultados de Huari, 2020	
% de RAP	Estabilidad (kg)	% de RAP	Estabilidad (kg)
39%	1240.00	40%	2916

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la investigación que hizo (Fustamante, 2018), nos muestra los valores de de estabilidad, y su comportamiento frente a la adición de RAP, las cuales comparamos en la tabla 216, podemos apreciar que a medida que la adición de RAP incrementa, también incrementa la estabilidad, hasta cierto evento, lo cual coincide con el comportamiento de la presente investigación debido a que a mayor adición de RAP la estabilidad aumenta y por lo tanto, también la propiedad de rigidez de la mezcla final.

Tabla 216

Comparación de resultados de estabilidad con Fustamante, 2018.

Resultados obtenidos en la presente investigación		Resultados de Fustamante, 2018	
% de RAP	Estabilidad (kg)	% de RAP	Estabilidad (kg)
39%	1240.00	30%	1145

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.7.3 Del daño inducido por humedad en mezclas asfálticas (Lottman modificado) mezcla asfáltica en caliente patrón tipo MAC-1 y la adición de pavimento asfáltico reciclado (RAP) al MAC-1.

Se presentan los resultados obtenidos en la presente investigación y en las investigaciones realizadas en los antecedentes acerca del daño inducido por humedad de mezclas asfáltica en caliente añadida con pavimento asfáltico reciclado (RAP).

En la tabla 217 se compara los resultados de la siguiente investigación respecto al daño inducido por humedad en mezclas asfálticas, comparando con los resultados obtenidos por (Huari, 2020), en el cual muestra una resistencia retenida del 88.9% para la muestra patrón MAC-2 y para la muestra patrón MAC-1 de la investigación tenemos 80.7%, sin embargo, las lecturas de carga que obtuvo son menores a la de la presente investigación. Entonces podemos decir que, el MAC-1 frente al MAC-1 tiene una mejor resistencia a la tracción. En cuanto a la resistencia retenida el MAC-2 tiene un mejor comportamiento, sin embargo, los resultados de la presente investigación se mantienen dentro de los límite requeridos por (Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción, 2013), el cual es 75.0% mínimo. Y que al añadir pavimento asfáltico reciclado (RAP) entre 39.0 % y 40.0% a una mezcla asfáltica en caliente nueva, se tiene una resistencia retenida mayor a 75%.

Tabla 217

Comparación de resultados a la resistencia retenida (resistencia al daño inducido por humedad) con Huari, 2020.

Resultados obtenidos en la presente investigación				Resultados de Huari, 2020			
% de RAP	condición	Resistencia a la tracción	Resistencia retenida (%)	% de RAP	condición	Resistencia a la tracción	Resistencia retenida (%)



Resultados obtenidos en la presente investigación			Resultados de Huari, 2020		
(kpa) promedio			(kpa) promedio		
0%	normal	2.18	80.7	normal	0.99
	crítica	1.76		crítica	0.88
39%	normal	2.28	75.4	normal	2.24
	crítica	1.72		crítica	2.09

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.7.4 Del % de CBR (0.1”) de la base granular patrón adicionada con pavimento asfáltico reciclado (RAP)

Se presentan los resultados obtenidos en la presente investigación y en las investigaciones realizadas en los antecedentes acerca de la influencia del RAP añadido a la base granular patrón.

En la tabla 218 se muestran los resultados de la presente investigación y los resultados de (Camacho, 2016), adición de RAP a material granular, esta investigación coinciden en que a mayor cantidad de RAP añadido a la base granular, baja el % de CBR (0.1”), esto es debido a que los suelos granulares tienen mejor cohesión cuando se mezclan con la cantidad óptima de agua, mientras que el pavimento asfáltico reciclado, debido a que contiene cemento asfáltico tiene cierto grado de hidrofobia, por lo tanto a mayor cantidad de RAP menor será la cohesión y el acomodamiento de las partículas a la hora de compactar.



Tabla 218

Comparación de resultados de CBR con Camacho, 2016.

Resultados obtenidos en la presente investigación		Resultados de Camacho, 2016	
% de RAP	% CBR	% de RAP	% CBR
21%	104.00	10.17%	100.00

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la investigación de (Crispín & Helguero, 2019), en el cual estudia el mejoramiento de CBR con cemento portland tipo IP a la combinación de base granular añadido con 10% de pavimento asfáltico reciclado, en el cual a un 3% de cemento alcanza un CBR de 157%, en comparación con la presente investigación que alcanza un CBR del 104% para una adición de 21% de pavimento asfáltico reciclado, de lo anterior mencionado, se deduce que se puede añadir un mayor porcentaje de RAP utilizando otros materiales que aseguren el incremento del CBR.



V. CONCLUSIONES

- La adición de pavimento reciclado en 15%, 25%, 35% y 45% a la mezcla asfáltica patrón, tiene una mejora en la estabilidad, sin embargo, al incrementar la estabilidad, el flujo disminuye. Por otro lado, la adición de pavimento reciclado en 15%, 30%, 45% y 60% al material de base granular patrón, el porcentaje de CBR tiende a disminuir a mayor cantidad de pavimento reciclado añadido.
- Con respecto a la propiedad del flujo de la mezcla asfáltica patrón y la mezcla asfáltica adicionada con pavimento reciclado al 15%, 25%, 35% y 45%, este incrementa en 0.25 mm para 15% de pavimento reciclado añadido, sin embargo, disminuye para 25%, 35% y 45% en 0.49mm, 1.10mm y 1.86mm respectivamente con respecto a la mezcla asfáltica patrón. En cuanto a la propiedad de estabilidad de la mezcla asfáltica patrón y la mezcla asfáltica adicionada con pavimento reciclado al 15%, 25%, 35% y 45%, este disminuye para 15% y 25% de pavimento reciclado en 149.18 kgf y 19.08 kgf respectivamente y aumenta para 35% y 45% en 0.54kgf y 182.24kgf respectivamente con respecto a la mezcla asfáltica patrón. Por lo tanto, la estabilidad incrementa respecto a la mezcla asfáltica patrón y el flujo tiende a disminuir hasta 8.00 mm, teniendo una adición óptima de 39 % de pavimento reciclado.
- Con respecto a la resistencia al daño inducido por humedad de la mezcla asfáltica patrón y la mezcla asfáltica añadida con pavimento reciclado óptimo al 39%, se obtuvo que para la muestra patrón la resistencia retenida es de 80.7% y para la combinación de mezcla asfáltica patrón añadido con pavimento reciclado es de 75.5 %.



- Con respecto al porcentaje de CBR (0.1 plg) de la base granular patrón y la base granular añadida con pavimento reciclado al 15%, 30%, 45% y 60% del peso total de la mezcla, el CBR (0.1 plg) tiende a disminuir en 32.8%, 63.82%, 74.86% y 80.17% respectivamente, la adición óptima de pavimento reciclado en la base granular fue de 21%, obteniendo un valor de CBR (0.1 plg) de 104%.

Teniendo estos aspectos podemos concluir que para mantener las propiedades de estabilidad (850 kg mínimo) y flujo (8mm-14mm), el óptimo contenido de pavimento reciclado añadido a la mezcla asfáltica patrón es del 39.0%, el cual incrementó su estabilidad en 8.01%, disminuyó su flujo en 14.89%, incrementando el daño inducido por humedad en 4.59% en condiciones normales. Además, se tiene una adición óptima del 21% de pavimento reciclado a la base granular manteniendo el CBR en 104%.



VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar proyectos de investigación usando aditivos rejuvenecedores en el pavimento reciclado para poder añadir una mayor cantidad en una mezcla asfáltica nueva y tener mejoras en la propiedad de flujo, tomando como referencia la presente investigación, puesto que se mejoraron las propiedades de flujo y porcentaje de vacíos añadiendo cemento asfáltico PEN 120-150 al RAP.
- Se recomienda evaluar la variación de la granulometría del pavimento reciclado extraído mediante la técnica de fresado y su adición en mezclas asfálticas nuevas.
- Se recomienda que, para futuras investigaciones, verifique la influencia del pavimento reciclado en la base granular, utilizando cemento y cal hidratada como mejoradores de cohesión, por lo tanto, poder recuperar más del 21% de pavimento reciclado añadiendo a la base granular.
- Se recomienda realizar proyectos de investigación para analizar el efecto de la humedad (Lottman modificado) en mezclas asfálticas nuevas adicionadas con pavimento reciclado para diferentes tiempos de congelamiento y descongelamiento, para así simular el efecto del daño por humedad en mezclas asfálticas debido a los cambios de temperatura en nuestra región Puno.
- Se recomienda la evaluación de la adición de pavimento reciclado en suelos arcillosos para controlar el parámetro de expansión.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, A., & Infanzón, R. (2020). *Aprovechamiento de material de pavimento asfáltico envejecido para el reciclaje en caliente y reutilización en mezcla asfáltica en caliente*. Lima, Perú: Universidad Ricardo Palma.
- Alarcon, J. (2003). *Estudio del Comportamiento de Mezclas Bituminosas Recicladas en Caliente en Planta*. BARCELONA, ESPAÑA: Universidad Politécnica de Cataluña.
- American Society for Testing and Materials. (2013). *D5581 - 07a: Standar Test Method for Resistence to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus*. Pensilvania, Estados Unidos: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2019). *D 2726M - 19: Standar Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures*. Pensilvania, Estados Unidos: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2020). *D6926 - 20: Standar Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus*. Pensilvania, Estados Unidos: ASTM International.
- Arias, F. (2012). *El proyecto de Investigacion*. Espisteme.
doi:<https://abacoenred.com/wp-content/uploads/2019/02/El-proyecto-de-investigaci%C3%B3n-F.G.-Arias-2012-pdf-1.pdf>
- Balarezo, F., & Tanaka, R. (2022). *Análisis del uso de residuos plásticos reciclados en la estabilidad, durabilidad e impermeabilidad de una mezcla asfáltica*. Trujillo, Perú: Universidad Privada del Norte.



- Beranjano, J., & Caicedo, C. (2017). *Análisis del comportamiento físico-mecánico de la mezcla asfáltica tipo MDC.19 con fibra natural de caña de azúcar*. Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia.
- Camacho, P. (2016). *Evaluación del reciclado de pavimentos asfálticos (RAP) para uso en pavimentos expuestos*. Cartago, Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Chen, J. S., Chu, P., Lin, Y., & Lin, K. (2007). Characterization of binder and mix properties to detect reclaimed asphalt pavement content in bituminous mixtures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 581-588.
- Chuman, J. (2017). *Reutilización de Pavimento Flexible Envejecido Mediante el Empleo de Una Planta Procesadora de Mezcla Asfáltica en Caliente para Pavimentos en Huancayo 2016*. Huancayo, Perú: Universidad Peruana Los Andes. Obtenido de <https://repositorio.upla.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12848/267/JORGE%20MANUEL%20CHUMAN%20AGUIRRE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Córdova, M. (2003). *Estadística descriptiva e Inferencial* (Quinta ed.). Lima, Perú: MOSHERA S.RL.
- Crispín, E., & Helguero, L. (2019). *Estructura de un Pavimento Asfáltico en Material Reciclado para Mejorar sus Beneficios Integrales*. Lima, Perú: Universidad Ricardo Palma.
- Fustamante, J. (2018). *Propuesta técnica de diseño de carpeta asfáltica utilizando pavimento reciclado para el mejoramiento de Av. Mesones Muro km+000-2+066 Chiclayo*. Chiclayo, Perú: Universidad César Vallejo.



- Galindo, A. (2019). *Técnicas del fresado de pavimentos flexibles aplicables en la república de Guatemala*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Gamboa, K. (2009). *Cálculo del Índice de Condicion Aplicado en el Pavimento Flexible en la Av. Las Palmeras de Piura*. Piura, Perú: Universidad de Piura. Obtenido de https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1351/ICI_181.pdf?sequence=1
- Garnica, P., Flores, M., José, G., & Delgado, H. (2005). *Caracterización Geomecánica de Mezclas Asfálticas*. Sanfandila: Instituto Mexicano del Transporte.
- González, A. (2017). *Análisis del Comportamiento Mecánico de Pavimentos con la Reutilización de Materiales Reciclados en Vías del Distrito de San Miguel, San Román, Puno -2017*. Juliaca, Perú: Universidad Alas Peruanas.
- Hernandez, R., Fernandez, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la Investigación*. MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
doi:<https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
- Higuera, C. (2012). Comportamiento Estructural de un Pavimento Flexible, Esfuerzos - Deformaciones y Deflexiones. *Ingenierías*, 8-15.
- 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*. Lima, Perú: Universidad Ricardo Palma.
- International Slurry Surfacing Association. (2021). *ISSA Desing and Inspection Manual for Slurry Surfacing Systems*. ISSA Innovation Through Preservation.
doi:www.slurry.org



- Lagla, M. (2014). *Análisis de la correlación entre estabilidad y módulo de rigidez para mezclas asfálticas en caliente, empleando agregados pétreos de la provincia de Imbabura, Canton Ibarra*. Quito, Ecuador: Pontificia Universidad Católica de Ecuador.
- Medina, A., & De La Cruz, M. (2015). *Evaluación superficial del pavimento flexible del Jr. José*. Lima, Perú: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
doi:<http://hdl.handle.net/10757/581505>
- Menéndez, J. (2016). *Ingeniería de Pavimentos* (Quinta ed., Vol. I). Lima: ICG.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). *Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción*. Lima, Perú.
- Ministerio de Transportes y comunicaciones. (2013). *Manual de carreteras "Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos"*. Lima: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *Manual de Ensayo y Materiales*. Lima, Perú: MTC.
- Miranda, F. (2019). *Pavimentos Asfálticos Reciclados. Boletín Técnico: PITRA – LANAMME*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- MTC. (2013). *Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción*. Lima.
- Pastás, R. (2021). *Estudio y análisis de los procesos de obtención, almacenamiento y uso del material de pavimento asfáltico reciclado en las diferentes obras viales*. Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia.



- Patiño, N., Reyes, O., & Camacho, J. (2015). Comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas colombianas con adición de pavimento reciclado al 100%. *Tecnura*, 11.
- Peña, C., & Cáceres, L. (2021). *Caracterización de una muestra de pavimento asfáltico reciclado (RAP), extraído de la autopista sur a la altura de los municipios de Soacha y Sibaté Cundinamarca, con el fin de determinar su uso en capas granulares no tratadas en una estructura de pavimen*. Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Puig, R. (2021). *Análisis de las técnicas de reciclado de mezclas asfálticas. Evolución y tendencias actuales*. Universidad Politécnica de Cataluña · Barcelona Tech - UPC.
doi:https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/360390/TFG_Ricard%20Puig%20Salesa.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Rodríguez, C., & Rodríguez, J. (2004). *Evaluación y Rehabilitación de Pavimentos Flexibles por el Método de Reciclaje*. El Salvador: Universidad de El Salvador.
- Sáez, L. (2019). *Mezclas Asfálticas para Pavimentos*. Lima: Instituto de la Gerencia y Construcción. doi:https://tienda.construccion.org/producto/mezclas-asfalticas-para-pavimentos-1a_4662
- Salamanca, G. (2007). *Influencia de la contaminación salina en el envejecimiento prematuro de mezclas y tratamientos asfálticos*. Santiago: Universidad de Chile.
- Terán, L. (2015). *Diseño de mezcla asfáltica en caliente utilizando agregado de la mina Cashapamba con metodología Marshall*. Quito, Ecuador: Universidad Internacional de Ecuador.



The American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020).

ASSTHO T 11: Materials Finer than N° 200 (75 um) Sieve in Minerals

Aggregates by Washing. Washinton D.C., Estados Unidos: ASSTHO.

The American Society for Testing and Materials. (2015). *D 6927 - 15: Standar Test*

Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures. Pensilvania,

Estados Unidos: ASTM International.

Universidad Mayor de San Simón. (2004). *Pavimentos*. Cochabamba, Bolivia:

Universidad Mayor de San Simón.

Valenzuela, M. (2003). *El asfalto, en la conservación de pavimentos*. Valdivia:

Universidad Austral de Chile.

Vilchez, L., & Yerén, S. (2022). *Condiciones meteorológicas que afectan a las*

propiedades de las mezclas asfálticas. Lima, Perú: Universidad Ricardo Palma.



ANEXOS

ANEXO 1: Ficha técnica del cemento asfáltico PEN 120-150.

ANEXO 2: Certificado de calibración de prensa Marshall y CBR.

ANEXO 3: resultados de ensayo de laboratorio para base granular.

ANEXO 4: Ensayo de laboratorio para RAP y mezclas asfálticas.

ANEXO 5: Constancia de laboratorio.

ANEXO 6: Solicitud de extracción de pavimento asfáltico reciclado.

ANEXO 7: Panel fotográfico.



ANEXO 1:

Ficha técnica del cemento asfáltico PEN 120-150.



ANEXO 2:

Certificado de calibración de prensa Marshall y CBR.



ANEXO 3:

resultados de ensayo de laboratorio para base granular.



ANEXO 4:

Ensayo de laboratorio para RAP y mezclas asfálticas.



ANEXO 5:

Constancia de laboratorio.



ANEXO 6:

Solicitud de extracción de pavimento asfáltico reciclado.



ANEXO 7:

Panel fotográfico.



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Fidel Fortunato Lipe Luque
identificado con DNI 73697386 en mi condición de egresado de:

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

INGENIERÍA CIVIL

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado
 Título Profesional denominado:

"INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE PAVIMENTO RECICLADO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA Y BASE GRANULAR EN LA AV. 2A TORRE DE LA CIUDAD DE PUNO, 2021"
Es un tema original.

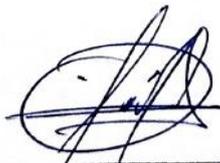
Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y no existe plagio/copia de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales,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

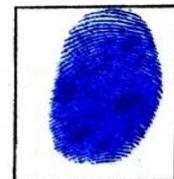
Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

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

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

Puno: 08 de junio del 2023


FIRMA (obligatoria)



Huella



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

Por el presente documento, Yo FIDEL FORTUNATO LIPE LUQUE
, identificado con DNI 73697386 en mi condición de egresado de:

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

INGENIERÍA CIVIL

, informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado

Título Profesional denominado:

" INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE PAVIMENTO RECLAMADO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA
MEZCLA ASFÁLTICA Y BASE GRANULAR EN LA AV. LA TORRE DE LA CUONIP DE PUNO, 2021 "

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

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

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

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

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

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

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 08 de JUNIO del 2023



FIRMA (obligatoria)



Huella



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo ANDY HENRY VALERIANO MOLLO
identificado con DNI 71972588 en mi condición de egresado de:

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

INGENIERIA CIVIL
informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado
 Título Profesional denominado:

"INFLUENCIA DE LA ADICION DE PAVIMENTO RECICLADO EN LAS PROPIEDADES MECANICAS DE
UNA MEZCLA ASFALTICA Y BASE GRANULAR EN LA AV LA TORRE DE LA CIUDAD DE PUNO 2021."
" Es un tema original.

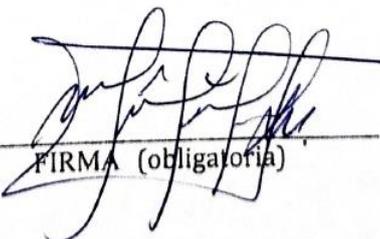
Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y no existe plagio/copia de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales,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

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

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

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

Puno 08 de JUNIO del 2023


FIRMA (obligatoria)



Huella



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

Por el presente documento, Yo ANDY HENRY VALERIANO MOLLO
, identificado con DNI 71472588 en mi condición de egresado de:

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

, informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado
 Título Profesional denominado:

"INFLUENCIA DE LA ADICION DE PAQUIMENTO RECICLADO EN LAS PROPIEDADES MECANICAS DE UNA
MEZCLA ASFALTICA Y BASE GRANULAR EN LA AV. LA TORRE DE LA CIUDAD DE PUNO 2021

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

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

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

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

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

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

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 08 de JUNIO del 2023

FIRMA (obligatoria)



Huella