



Universidad Católica de Santa María

Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y del Ambiente

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

**Valorización de lodos residuales provenientes del tratamiento de agua potable
como sustituto de materiales para la construcción de vías en la ciudad de
Arequipa**

Tesis presentada por:

Calizaya Mamani, Luz Clarita

ORCID: 0009-0005-0208-4150

Coronel Bernales, Maria de los Angeles

ORCID: 0009-0009-0420-0601

para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil

Asesor (a):

Mg. García Godos Peñaloza, Luz Matilde

ORCID: 0000-0003-0591-2191

Arequipa – Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA CIVIL

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 15 de Diciembre del 2025

Dictamen: 017006-C-EPIC-2025

Visto el borrador del expediente 017006, presentado por:

2020241112 - CALIZAYA MAMANI LUZ CLARITA

2017242892 - CORONEL BERNALES MARIA DE LOS ANGELES

Titulado:

**VALORIZACIÓN DE LODOS RESIDUALES PROVENIENTES DEL TRATAMIENTO DE AGUA
POTABLE COMO SUSTITUTO DE MATERIAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE VÍAS EN LA CIUDAD
DE AREQUIPA**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO CIVIL

**41481170 - GAMARRA TUCO RUBEN FRANCISCO
DICTAMINADOR**



**46309156 - MONTOYA VILLANUEVA FILIBERTO RODY
DICTAMINADOR**



**46890195 - DE LA CRUZ MENDOZA FERNANDO ARON
DICTAMINADOR**



VALORIZACIÓN DE LODOS RESIDUALES PROVENIENTES DEL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE COMO SUSTITUTO DE MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE VÍAS EN LA CIUDAD DE AREQUIPA

INFORME DE ORIGINALIDAD

18%	16%	4%	8%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	5%
2	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	2%
3	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	1%
5	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	vsip.info Fuente de Internet	<1%
7	Submitted to Universidad Católica San Pablo Trabajo del estudiante	<1%
8	qdoc.tips Fuente de Internet	<1%
9	repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet	<1%
10	documentop.com Fuente de Internet	<1%
11	doku.pub Fuente de Internet	<1%

DEDICATORIA

A mi hermosa madre Eufracia Mamani Llanos, por darme las oportunidades que en su momento no tuvo, y por enseñarme, con su ejemplo, a ser una persona fuerte, desafiante y comprometida con sus sueños. Cada paso que doy representa su esfuerzo, sacrificio y amor.

A DIOS, por siempre ser mi refugio.

Luz Clarita Calizaya Mamani

A Dios y la Virgen Maria que nunca soltaron mi mano y por demostrarme que todo tiene su tiempo.

A mis padres Ángel Eugenio Coronel y Rommy Bernales, por su apoyo incondicional y su amor infinito de principio a fin en toda mi vida.

A mi hermana Anggell que siempre estuvo en los momentos difíciles para apoyarme y darme un aliento, a mi hermano Áaron por ser el mayor motivo a ser mejor cada día.

A mis ángeles en el cielo, mis abuelos Eugenio, Ascencia y Máximo, mi prima Yesenia por estar presente espiritualmente.

A toda mi familia y amigos que siempre estuvieron apoyándome y dándome palabras de aliento y sobre todo creer en mí.

Maria de los Angeles Coronel Bernales

AGRADECIMIENTOS

Al vicerrectorado de investigación de la Universidad Católica de Santa María, por darme la oportunidad de aterrizar una idea que seguramente será de gran aporte a la sociedad.

A SEDAPAR, por su invaluable colaboración al proporcionar material necesario para la investigación.

Al Ing. Rubén Gamarra, por confiar en el proyecto y su apoyo por difundir el conocimiento.

Al Ing. Gilberto Colina, por sus consejos y apoyo en la presente investigación.

Al personal a cargo del laboratorio de la escuela profesional de Ingeniería Civil, quienes desde el primer momento demostraron disponibilidad para apoyar la investigación.

A toda la familia del GRUPO RPG SAC por orientarme en los ensayos de laboratorio y darme la oportunidad de conocer personal tan dedicado a su trabajo.

A mi querida familia, quienes me incentivan a ser una buena profesional, con valores bien sentados y con un deseo enorme de mejorar continuamente.

A mis amistades, por siempre creer en mí, más de lo que pueda hacer por cuenta propia.

Finalmente, agradecer a todos y todo el proceso que conllevó terminar el proyecto investigativo, me quedo con las enseñanzas duramente aprendidas, las amanecidas, frustraciones, los largos viajes, errores en ensayos, cálculos fallidos, que, por efecto, me demostraron que el camino no es fácil pero la meta es clara.

Luz Clarita Calizaya Mamani

A Dios y la Virgen Maria por permitirme llegar hasta aquí, guiada de su mano.

*A mis padres Ángel Eugenio Coronel y Rommy Bernales, por su apoyo incondicional en el
proceso de ejecución de esta tesis.*

*A mis hermanos Anggell y Aaron por todo su cariño y amor incondicional, por cada palabra de
aliento.*

A todos mis docentes que con sus conocimientos inculcados no hubiese llegado hasta aquí.

Al Ing. Rubén Gamarra, por el apoyo durante el desarrollo del proyecto

A mi amiga Analy quien nos ayudó en el proceso de desarrollo de ensayos en laboratorio.

A mi compañera de tesis Luz Clarita, por permitirme ser parte de este proyecto y confiar en mí.

*Finalmente, agradecer a toda mi familia y todos mis amigos que siempre estuvieron para
apoyarme y brindarme palabras de aliento, me quedo con todo lo aprendido durante el
desarrollo de este proyecto, alegrías, tristezas y frustraciones que poco a poco me enseñaron que
no todo es fácil en la vida.*

Maria de los Angeles Coronel Bernales

RESUMEN

Los lodos residuales del tratamiento de agua potable (LPTAP) son considerados como residuos ya que suelen desecharse en vertederos. Este estudio tiene como objetivo analizar la valorización de los LPTAP como sustituto parcial de materiales para la construcción de subrasantes, pavimento flexible y rígido, que puede mejorar las prácticas sostenibles de gestión de residuos para obtener resultados ambientales positivos. Se utiliza un enfoque metodológico que combina diferentes métodos, el cual se caracteriza por la fusión ordenada de técnicas cuantitativas y cualitativas, se tiene un diseño experimental y evaluativo, con un nivel explicativo. Para evaluar la valorización, se hicieron las pruebas de caracterización de los LPTAP, ensayos de próctor y penetración CBR para analizar el desempeño mecánico de suelo natural con LPTAP, asimismo, se realizaron diseños de mezcla para pavimento rígido y flexible. Según los resultados del proyecto de valorización de LPTAP, indican que, al mezclarse parcialmente con un suelo convencional, se obtienen valores mayores al 6% de CBR, por lo que, resulta óptimo para la construcción de subrasantes, asimismo, se desempeña positivamente en la resistencia a la compresión, estabilidad y flujo para pavimento rígido y pavimento flexible. En conclusión, la valorización de LPTAP representa una propuesta innovadora que busca abordar una serie de retos y oportunidades en la construcción sostenible.

Palabras clave: Lodo, Pavimento, Suelos.

ABSTRACT

Sewage sludge from drinking water treatment (SDWT) is classified as waste because it is typically disposed of in landfills. The objective of this investigation is to analyze the potential use of SDWT as a partial substitute for materials in road construction in the city of Arequipa, which could improve sustainable management practices in construction industry and yield positive environmental outcomes. A methodological approach combining different methods is used, characterized by the orderly integration of quantitative and qualitative techniques; the study employs an experimental and evaluative design with an explanatory focus. To evaluate the recovery, characterization tests of LPTAP, compaction tests, and CBR tests were conducted to assess the mechanical performance of soil mixtures with LPTAP; additionally, mix designs were developed for rigid and flexible pavements. According to the results of the LPTAP recovery project, partial mixing with conventional soil yields CBR values greater than 6%, making it optimal for subgrade construction. Furthermore, it performs well in terms of compressive strength, stability, and flow for both rigid and flexible pavements. In conclusion, the reuse of LPTAP represents an innovative approach that seeks to address a range of challenges and opportunities in sustainable construction.

Keywords: Sludge, Pavement, Soils.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I..... 4

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... 4

 Situación problemática..... 5

 Definición del problema..... 7

 Formulación del problema 7

 Objetivo general y específicos 8

 Importancia de la investigación..... 8

 Viabilidad 9

 Alcance y limitaciones 9

CAPÍTULO II 11

MARCO TEÓRICO 11

 Antecedentes 12

 Bases teóricas 17

<i>LPTAP</i>	17
Propiedades físicas y química de LPTAP.....	18
Subrasante	20
Estabilización de suelos	22
Agregados.....	23
Diseño de mezcla para pavimento.....	25
CAPÍTULO III	27
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	27
Diseño metodológico.....	28
Población y muestra	31
Definición de variables.....	31
Operacionalización de variables.....	32
Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	33
Técnicas de procesamiento de datos	35
CAPÍTULO IV	43
DESARROLLO	43
Ubicación de la muestra	44
Suelo.....	44
Lodo	45
Extracción de la muestra	46

Suelo.....	46
Lodo	46
CAPÍTULO V	48
RESULTADOS.....	48
Estabilización Del Suelo Con Lodos De Tratamiento De Agua Potable.....	49
<i>Ensayos Físicos</i>	49
<i>Ensayos Mecánicos</i>	71
Proctor Suelo natural.....	71
<i>Proctor mezcla parcial</i>	85
<i>Cuadro resumen de ensayos Proctor</i>	99
CBR.....	100
CBR mezcla parcial.....	127
<i>Cuadro resumen de ensayos CBR</i>	154
Ensayos Químicos.....	155
Diseño De Pavimento Flexible.....	156
<i>Caracterización De materiales pétreos</i>	156
Agregado Fino.....	156
Agregado grueso	166
<i>Cuadro resumen</i>	173
Diseño De Mezcla Asfáltica En Caliente Por El Método Marshall	174

<i>Diseño de mezcla</i>	¡Error! Marcador no definido.
<i>Interpretación de los datos sin FILLER (Lodos residuales de PTAP)</i>	177
<i>Interpretación de los datos con FILLER (Lodos residuales de PTAP)</i>	184
Diseño De Pavimento Rígido.....	193
<i>Caracterización De Los Agregados</i>	193
Agregado Fino.....	193
Agregado Grueso.....	203
Cuadro resumen.....	208
Diseño De Mezcla De Concreto Por El Método Aci.....	209
<i>Parámetros Básicos</i>	209
Diseño de mezcla	¡Error! Marcador no definido.
Resumen de resistencia a la compresión ($f'c$).....	212
CAPÍTULO VI.....	214
DISCUSIÓN.....	214
CONCLUSIONES	237
RECOMENDACIONES	241
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	242

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Condición de subrasante según valores de CBR</i>	21
Tabla 2	<i>Variable independiente</i>	32
Tabla 3	<i>Variable Dependiente</i>	32
Tabla 4	<i>Pruebas de laboratorio</i>	34
Tabla 5	<i>Ensayos para suelo natural</i>	36
Tabla 6	<i>Ensayos para sedimento (LPTAP)</i>	36
Tabla 7	<i>Ensayo para la mezcla parcial de suelo y sedimento para subrasante</i>	37
Tabla 8	<i>Ensayos de caracterización de agregados finos para pavimento rígido</i>	38
Tabla 9	<i>Ensayos de caracterización de agregados grueso para pavimento rígido</i>	39
Tabla 10	<i>Diseños de mezcla para pavimento rígido agregando porcentajes de sedimento</i>	39
Tabla 11	<i>Ensayos de caracterización de agregados finos para pavimento flexible</i>	40
Tabla 12	<i>Ensayos de caracterización de agregados grueso para pavimento flexible</i>	41
Tabla 13	<i>Diseños de mezcla para pavimento flexible</i>	42
Tabla 14	<i>Análisis granulométrico de C2- E2</i>	49
Tabla 15	<i>Clasificación visual y manual de C2- E2</i>	50
Tabla 16	<i>Análisis granulométrico de C4 - E2</i>	51
Tabla 17	<i>Clasificación visual y manual de C4- E2</i>	52
Tabla 18	<i>Análisis granulométrico de C6 - E2</i>	53
Tabla 19	<i>Clasificación visual y manual de C6- E2</i>	54
Tabla 20	<i>Índices de plasticidad de C2-E2</i>	55
Tabla 21	<i>Índices de plasticidad de C4-E2</i>	56
Tabla 22	<i>Índices de plasticidad de C6-E2</i>	57

Tabla 23	<i>Contenido de humedad de C2-E2</i>	58
Tabla 24	<i>Contenido de humedad de C4-E2</i>	58
Tabla 25	<i>Contenido de humedad de C6-E2</i>	59
Tabla 26	<i>Contenido de sales solubles de C2-E2</i>	59
Tabla 27	<i>Contenido de Cloruros Solubles de C2 - E2</i>	60
Tabla 28	<i>Contenido de sulfatos solubles de C2-E2</i>	60
Tabla 29	<i>Contenido de sales solubles de C4-E2</i>	61
Tabla 30	<i>Contenido de Cloruros Solubles de C4 - E2</i>	61
Tabla 31	<i>Contenido de sulfatos solubles de C4-E2</i>	62
Tabla 32	<i>Contenido de sales solubles de C6-E2</i>	62
Tabla 33	<i>Contenido de Cloruros Solubles de C6 - E2</i>	63
Tabla 34	<i>Contenido de sulfatos solubles de C6-E2</i>	63
Tabla 35	<i>Ensayo estándar para la gravedad específica de solidos de C2-E2</i>	64
Tabla 36	<i>Ensayo estándar para la gravedad específica de solidos de C4-E2</i>	64
Tabla 37	<i>Ensayo estándar para la gravedad específica de solidos de C6-E2</i>	65
Tabla 38	<i>Análisis granulométrico de lodo</i>	66
Tabla 39	<i>Clasificación Visual y manual de lodo</i>	67
Tabla 40	<i>Contenido de humedad de lodo</i>	68
Tabla 41	<i>Índices de plasticidad de lodo</i>	69
Tabla 42	<i>Gravedad específica de solidos de lodo</i>	70
Tabla 43	<i>Características de la muestra C2-E2 para el ensayo de Proctor</i>	71
Tabla 44	<i>Compactación y determinación de densidad húmeda de C2-E2</i>	71
Tabla 45	<i>Determinación de la humedad y densidad de C2-E2</i>	72
Tabla 46	<i>Corrección del peso unitario y contenido de humedad de C2-E2</i>	72

Tabla 47	<i>Datos de humedad optima - peso unitario seco - saturación de C2-E2</i>	73
Tabla 48	<i>Intervalos para cálculo de línea de saturación de C2-E2</i>	73
Tabla 49	<i>Cálculos para línea de saturación al 100% de C2-E2</i>	73
Tabla 50	<i>Cálculos para línea de saturación al 80% de C2-E2</i>	74
Tabla 51	<i>Cálculos para línea de saturación al 75% de C2-E2</i>	74
Tabla 52	<i>Características de la muestra C4-E2 para el ensayo de Proctor</i>	76
Tabla 53	<i>Compactación y determinación de densidad húmeda de C4-E2</i>	76
Tabla 54	<i>Determinación de la humedad y densidad de C4-E2</i>	77
Tabla 55	<i>Corrección del peso unitario y contenido de humedad de C4-E2</i>	77
Tabla 56	<i>Datos de humedad optima - peso unitario seco - saturación de C4-E2</i>	78
Tabla 57	<i>Intervalos para cálculo de línea de saturación de C4-E2</i>	78
Tabla 58	<i>Cálculos para línea de saturación al 100% de C4-E2</i>	78
Tabla 59	<i>Cálculos para línea de saturación al 80% de C4-E2</i>	79
Tabla 60	<i>Cálculos para línea de saturación al 75% de C4-E2</i>	79
Tabla 61	<i>Características de la muestra C6-E2 para el ensayo de Proctor</i>	80
Tabla 62	<i>Compactación y determinación de densidad húmeda de C6-E2</i>	81
Tabla 63	<i>Determinación de la humedad y densidad de C6-E2</i>	81
Tabla 64	<i>Corrección del peso unitario y contenido de humedad de C6-E2</i>	82
Tabla 65	<i>Datos de humedad optima - peso unitario seco - saturación de C6-E2</i>	82
Tabla 66	<i>Intervalos para cálculo de línea de saturación de C6-E2</i>	82
Tabla 67	<i>Cálculos para línea de saturación al 100% de C6-E2</i>	83
Tabla 68	<i>Cálculos para línea de saturación al 80% de C6-E2</i>	83
Tabla 69	<i>Cálculos para línea de saturación al 75% de C6-E2</i>	84
Tabla 70	<i>Características de la muestra C2-E2 (20% de lodo) para el ensayo de Proctor</i>	85

Tabla 71	<i>Compactación y determinación de densidad húmeda de C2-E2 (20%)</i>	85
Tabla 72	<i>Determinación de la humedad y densidad de C2-E2 (20%)</i>	86
Tabla 73	<i>Corrección del peso unitario y contenido de humedad de C2-E2 (20%)</i>	86
Tabla 74	<i>Datos de humedad optima - peso unitario seco - saturación de C2-E2 (20%)</i>	87
Tabla 75	<i>Intervalos para cálculo de línea de saturación de C2-E2 (20%)</i>	87
Tabla 76	<i>Cálculos para línea de saturación al 100% de C2-E2 (20%)</i>	88
Tabla 77	<i>Cálculos para línea de saturación al 80% de C2-E2 (20%)</i>	88
Tabla 78	<i>Cálculos para línea de saturación al 75% de C2-E2 (20%)</i>	89
Tabla 79	<i>Características de la muestra C4-E2 (60% de lodo) para el ensayo de Proctor</i>	90
Tabla 80	<i>Compactación y determinación de densidad húmeda de C4-E2 (60%)</i>	90
Tabla 81	<i>Determinación de la humedad y densidad de C4-E2 (60%)</i>	91
Tabla 82	<i>Corrección del peso unitario y contenido de humedad de C4-E2 (60%)</i>	91
Tabla 83	<i>Datos de humedad optima - peso unitario seco - saturación de C4-E2 (60%)</i>	92
Tabla 84	<i>Intervalos para cálculo de línea de saturación de C4-E2 (60%)</i>	92
Tabla 85	<i>Cálculos para línea de saturación al 100% de C4-E2 (60%)</i>	92
Tabla 86	<i>Cálculos para línea de saturación al 80% de C4-E2 (60%)</i>	93
Tabla 87	<i>Cálculos para línea de saturación al 75% de C4-E2 (60%)</i>	93
Tabla 88	<i>Características de la muestra C6-E2 (40% de lodo) para el ensayo de Proctor</i>	94
Tabla 89	<i>Compactación y determinación de densidad húmeda de C6-E2 (40%)</i>	95
Tabla 90	<i>Determinación de la humedad y densidad de C6-E2 (40%)</i>	95
Tabla 91	<i>Corrección del peso unitario y contenido de humedad de C6-E2 (40%)</i>	96
Tabla 92	<i>Datos de humedad optima - peso unitario seco - saturación de C6-E2 (40%)</i>	96
Tabla 93	<i>Intervalos para cálculo de línea de saturación de C6-E2 (40%)</i>	96
Tabla 94	<i>Cálculos para línea de saturación al 100% de C6-E2 (40%)</i>	97

Tabla 95	<i>Cálculos para línea de saturación al 80% de C6-E2 (40%)</i>	97
Tabla 96	<i>Cálculos para línea de saturación al 75% de C6-E2 (40%)</i>	98
Tabla 97	<i>Resumen de ensayos Proctor para suelo natural y con mezcla parcial de lodo</i>	99
Tabla 98	<i>Compactación y determinación de la densidad húmeda de C2-E2</i>	100
Tabla 99	<i>Humedad y densidad seca de C2-E2</i>	101
Tabla 100	<i>Expansión de C2- E2</i>	101
Tabla 101	<i>Expansión de C2- E2</i>	102
Tabla 102	<i>Resultados de compactación de C2-E2</i>	106
Tabla 103	<i>Resultados de CBR de C2-E2</i>	106
Tabla 104	<i>Curva relación humedad - Peso unitario seco - Saturación de C4-E2</i>	109
Tabla 105	<i>Humedad y densidad seca de C4-E2</i>	110
Tabla 106	<i>Expansión de C4-E2</i>	110
Tabla 107	<i>Penetración C4-E2</i>	111
Tabla 108	<i>Resultados de compactación C4-E2</i>	115
Tabla 109	<i>Resultados de CBR de C4-E2</i>	115
Tabla 110	<i>Curva relación humedad - Peso unitario seco - Saturación de C6-E2</i>	118
Tabla 111	<i>Humedad y densidad seca de C6-E2</i>	119
Tabla 112	<i>Expansión de C6-E2</i>	119
Tabla 113	<i>Penetración de C6-E2</i>	120
Tabla 114	<i>Resultados de compactación de C6-E2</i>	124
Tabla 115	<i>Resultados de CBR de C6-E2</i>	124
Tabla 116	<i>Curva relación humedad - Peso unitario seco - Saturación de C2-E2 (20%)</i>	127
Tabla 117	<i>Humedad y densidad seca de C2-E2 (20%)</i>	128
Tabla 118	<i>Expansión de C2-E2 (20%)</i>	128

Tabla 119	<i>Penetración de C2-E2 (20%)</i>	129
Tabla 120	<i>Resultados de compactación de C2-E2 (20%)</i>	133
Tabla 121	<i>Resultados de CBR de C2-E2 (20%)</i>	133
Tabla 122	<i>Curva relación humedad - Peso unitario seco - Saturación de C4-E2 (60%)</i>	136
Tabla 123	<i>Humedad y densidad seca de C4-E2 (60%)</i>	137
Tabla 124	<i>Expansión de C4-E2 (60%)</i>	137
Tabla 125	<i>Penetración de C4-E2 (60%)</i>	138
Tabla 126	<i>Resultados de compactación de C4-E2 (60%)</i>	142
Tabla 127	<i>Resultados de CBR de C4-E2 (60%)</i>	142
Tabla 128	<i>Curva relación humedad - Peso unitario seco - Saturación de C6-E2 (40%)</i>	145
Tabla 129	<i>Humedad y densidad seca de C6-E2 (40%)</i>	146
Tabla 130	<i>Expansión de C6-E2 (40%)</i>	146
Tabla 131	<i>Penetración de C6-E2 (40%)</i>	147
Tabla 132	<i>Resultado de compactación de C6-E2 (40%)</i>	151
Tabla 133	<i>Resultados de CBR de C6-E2 (40%)</i>	151
Tabla 134	<i>Resumen de ensayos CBR para suelo natural y con mezcla parcial de lodo</i>	154
Tabla 135	<i>Husos granulométricos para MAC</i>	156
Tabla 136	<i>Husos granulométricos para MAC</i>	157
Tabla 137	<i>Contenido de humedad del agregado fino para pavimento flexible</i>	158
Tabla 138	<i>Porcentaje de vacíos del agregado fino para pavimento flexible</i>	159
Tabla 139	<i>Equivalente de arena del agregado fino para pavimento flexible</i>	160
Tabla 140	<i>Angularidad del agregado fino para pavimento flexible</i>	160
Tabla 141	<i>Índices de plasticidad del agregado fino para pavimento flexible</i>	161

Tabla 142 <i>Durabilidad al sulfato de sodio y magnesio del agregado fino para pavimento flexible</i>	161
Tabla 143 <i>Índice de durabilidad del agregado fino para pavimento flexible</i>	162
Tabla 144 <i>Contenido de sales solubles del agregado fino para pavimento flexible</i>	162
Tabla 145 <i>Contenido de cloruros solubles del agregado fino para pavimento flexible</i>	163
Tabla 146 <i>Contenido de sulfatos solubles del agregado fino para pavimento flexible</i>	163
Tabla 147 <i>Peso específico y absorción del agregado fino para pavimento flexible</i>	164
Tabla 148 <i>Adhesividad de los ligantes bituminosos a los áridos finos (Procedimiento Riedel Weber) del agregado fino para pavimento flexible</i>	165
Tabla 149 <i>Determinación cualitativa de arcilla nociva utilizando azul de metileno" del agregado fino para pavimento flexible</i>	165
Tabla 150 <i>Contenido de humedad del agregado grueso para pavimento flexible</i>	166
Tabla 151 <i>Peso unitario de vacíos del agregado grueso para pavimento flexible</i>	166
Tabla 152 <i>Durabilidad al sulfato de sodio y magnesio del agregado grueso para pavimento flexible</i>	167
Tabla 153 <i>Gradación Abrasión máquina de los ángeles</i>	167
Tabla 154 <i>Abrasión máquina de los ángeles del agregado grueso para pavimento flexible</i>	168
Tabla 155 <i>Revestimiento y desprendimiento de mezclas agregado-bitumen</i>	168
Tabla 156 <i>Revestimiento y desprendimiento de mezclas agregado – bitumen del agregado grueso para pavimento flexible</i>	169
Tabla 157 <i>Índice de durabilidad del agregado grueso para pavimento flexible</i>	169
Tabla 158 <i>Partículas chatas y alargadas en agregados para pavimento flexible</i>	170
Tabla 159 <i>Porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso para pavimento flexible</i>	170

Tabla 160 <i>Porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso para pavimento flexible</i>	171
Tabla 161 <i>Peso específico y absorción del agregado grueso para pavimento flexible</i>	172
Tabla 162 <i>Cuadro resumen de ensayos requeridos para pavimento flexible según MTC</i>	173
Tabla 163 <i>Análisis granulométrico para diseño de mezcla asfáltica en caliente para pavimento flexible según el método Marshall</i>	174
Tabla 164 <i>Resumen ecuación para determinar contenido de bitumen</i>	176
Tabla 165 <i>Dosificación para MAC 2 de agregados y bitumen para diseño de mezcla asfáltica en caliente para pavimento flexible según el método Marshall</i>	176
Tabla 166 <i>Ensayo RICE para briquetas de asfalto de diseño de mezcla asfáltica en caliente para pavimento flexible según el método Marshall</i>	180
Tabla 167 <i>Ensayo BULK para briquetas de asfalto de diseño de mezcla asfáltica en caliente para pavimento flexible según el método Marshall</i>	182
Tabla 168 <i>Ensayo RICE para briquetas de asfalto de DMAC para pavimento flexible según el método Marshall</i>	187
Tabla 169 <i>Ensayo BULK para briquetas de asfalto de DMAC para pavimento flexible según el método Marshall</i>	189
Tabla 170 <i>Resumen de resultados DMAC por el Método Marshal SIN FILLER</i>	192
Tabla 171 <i>Resumen de resultados DMAC por el Método Marshal CON FILLER</i>	192
Tabla 172 <i>Husos granulométrico para mezcla asfáltica en caliente</i>	193
Tabla 173 <i>Análisis granulométrico del agregado fino para pavimento rígido</i>	194
Tabla 174 <i>Contenido de humedad del agregado fino para pavimento rígido</i>	196
Tabla 175 <i>Porcentaje de vacíos del agregado fino para pavimento rígido</i>	196
Tabla 176 <i>Partículas friables y terrones de arcilla en el agregado fino para pavimento rígido</i>	197

Tabla 177	<i>Índices de plasticidad del agregado fino para pavimento rígido</i>	198
Tabla 178	<i>Equivalente de arena del agregado fino para pavimento rígido</i>	198
Tabla 179	<i>Partículas livianas del agregado fino para pavimento rígido</i>	199
Tabla 180	<i>Determinación de azul de metileno para agregado fino para el pavimento rígido</i> ...	200
Tabla 181	<i>Determinación de peso específico y absorción del agregado fino para pavimento rígido</i>	200
Tabla 182	<i>Contenido de sales solubles del agregado fino para pavimento rígido</i>	201
Tabla 183	<i>Contenido de cloruros solubles del agregado fino para pavimento rígido</i>	201
Tabla 184	<i>Contenido de sulfatos solubles del agregado fino para pavimento rígido</i>	202
Tabla 185	<i>Se presenta el cuadro de abrasión de los ángeles</i>	203
Tabla 186	<i>Tamaño de las partículas friables y terrones de arcilla de los agregados gruesos para pavimento rígido</i>	204
Tabla 187	<i>Se presenta el porcentaje de partículas livianas del agregado grueso para el pavimento rígido</i>	205
Tabla 188	<i>Porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso para pavimento rígido</i>	206
Tabla 189	<i>Partículas chatas y alargadas del agregado grueso para pavimento rígido</i>	207
Tabla 190	<i>Cuadro resumen de ensayos requeridos para pavimento flexible según MTC</i>	208
Tabla 191	<i>Parámetros básicos para el diseño de mezcla de pavimento rígido</i>	209
Tabla 192	<i>Diseño de pavimento rígido sin lodo</i>	210
Tabla 193	<i>Diseño de pavimento rígido con 5% de lodo</i>	210
Tabla 194	<i>Diseño de pavimento rígido con 10% de lodo</i>	211
Tabla 195	<i>Diseño de pavimento rígido con 15% de lodo</i>	212
Tabla 196	<i>Resumen de resistencias de 1er vaciado de pavimento rígido</i>	212
Tabla 197	<i>Resumen de resistencias de 2do vaciado de pavimento rígido</i>	213

Tabla 198	<i>Caracterización física de LPTAP</i>	215
Tabla 199	<i>Categorías de subrasante según su porcentaje de CBR</i>	217
Tabla 200	<i>Resultados de CBR de suelo natural</i>	217
Tabla 201	<i>Resultados de CBR de suelo con mezcla parcial de lodo</i>	218
Tabla 202	<i>Análisis de precio unitario de suelo natural</i>	219
Tabla 203	<i>Análisis de precio unitario de suelo con mezcla parcial de lodo</i>	220
Tabla 204	<i>Parámetros básicos para el DM de pavimento rígido</i>	221
Tabla 205	<i>Diseño de pavimento rígido sin lodo</i>	221
Tabla 206	<i>Resumen de proporciones de diseños de mezcla para pavimento rígido</i>	222
Tabla 207	<i>Resultados de resistencia a la compresión para pavimento rígido</i>	223
Tabla 208	<i>Análisis de precio unitario diseño de mezcla ACI para pavimento rígido</i>	224
Tabla 209	<i>Análisis de precio unitario diseño de mezcla ACI con 5% de lodo para pavimento rígido</i>	225
Tabla 210	<i>Resumen de Diseño de Mezcla Marshall SIN FILLER</i>	226
Tabla 211	<i>Comparación con EE.TT. del MTC</i>	227
Tabla 212	<i>Resumen de resultados de diseño de mezcla asfáltica CON FILLER</i>	228
Tabla 213	<i>Comparación de resultados con EE.TT. del MTC</i>	229
Tabla 214	<i>Comparación técnica de resultados</i>	229
Tabla 215	<i>Análisis de precio unitario DMAC</i>	230
Tabla 216	<i>Análisis de precio unitario de diseño de mezcla CON filler</i>	231

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Sedimentación en la PTAP, Miguel de la Cuba Ibarra</i>	6
Figura 2 <i>Espectro de FTIR</i>	20
Figura 3 <i>Metodología de estudio</i>	29
Figura 4 <i>Metodología experimental</i>	30
Figura 5 <i>Ubicación del muestreo de suelos (Aeropuerto Internacional Alfredo Rodríguez Ballón)</i>	44
Figura 6 <i>Ubicación de PTAP</i>	45
Figura 7 <i>Pozas de sedimentación PTAP Miguel de la Cuba Ibarra</i>	47
Figura 8 <i>Curva granulométrica de C2 - E 2</i>	50
Figura 9 <i>Curva granulométrica de C4- E2</i>	52
Figura 10 <i>Curva granulométrica de C6-E2</i>	54
Figura 11 <i>Curva granulométrica de lodo</i>	68
Figura 12 <i>Curva relación humedad - Peso unitario seco - Saturación de C2-E2</i>	75
Figura 13 <i>Curva relación humedad - Peso unitario seco - Saturación de C4-E2</i>	80
Figura 14 <i>Curva relación humedad - Peso unitario seco - Saturación de C6-E2</i>	84
Figura 15 <i>Curva relación humedad - Peso unitario seco - Saturación de C2-E2 (20%)</i>	89
Figura 16 <i>Curva relación humedad - Peso unitario seco - Saturación de C4-E2 (60%)</i>	94
Figura 17 <i>Curva relación humedad - Peso unitario seco - Saturación de C6-E2 (40%)</i>	98
Figura 18 <i>Curvas CBR de 10 golpes de C2-E2</i>	103
Figura 19 <i>Curvas CBR de 25 golpes de C2-E2</i>	104
Figura 20 <i>Curvas CBR de 56 golpes de C2-E2</i>	105
Figura 21 <i>Línea de CBR corregido para 0.1" de penetración de C2-E2</i>	107

Figura 22	<i>Línea de CBR corregido para 0.2" de penetración de C2-E2</i>	108
Figura 23	<i>Curvas CBR de 10 golpes de C4-E2</i>	112
Figura 24	<i>Curvas CBR de 25 golpes de C4-E2</i>	113
Figura 25	<i>Curvas CBR de 56 golpes de C4-E2</i>	114
Figura 26	<i>Línea de CBR corregido para 0.1" de penetración de C4-E2</i>	116
Figura 27	<i>Línea de CBR corregido para 0.2" de penetración de C4-E2</i>	117
Figura 28	<i>Curvas CBR de 10 golpes de C6-E2</i>	121
Figura 29	<i>Curvas CBR de 25 golpes de C6-E2</i>	122
Figura 30	<i>Curvas CBR de 56 golpes de C6-E2</i>	123
Figura 31	<i>Línea de CBR corregido para 0.1" de penetración de C6-E2</i>	125
Figura 32	<i>Línea de CBR corregido para 0.2" de penetración de C6-E2</i>	126
Figura 33	<i>Curvas CBR de 10 golpes de C2-E2 (20%)</i>	130
Figura 34	<i>Curvas CBR de 25 golpes de C2-E2 (20%)</i>	131
Figura 35	<i>Curvas CBR de 56 golpes de C2-E2 (20%)</i>	132
Figura 36	<i>Línea de CBR corregido para 0.1" de penetración de C2-E2 (20%)</i>	134
Figura 37	<i>Línea de CBR corregido para 0.2" de penetración de C2-E2 (20%)</i>	135
Figura 38	<i>Curvas CBR de 10 golpes de C4-E2 (60%)</i>	139
Figura 39	<i>Curvas CBR de 25 golpes de C4-E2 (60%)</i>	140
Figura 40	<i>Curvas CBR de 56 golpes de C4-E2 (60%)</i>	141
Figura 41	<i>Línea de CBR corregido para 0.1" de penetración de C4-E2 (60%)</i>	143
Figura 42	<i>Línea de CBR corregido para 0.2" de penetración de C4-E2 (60%)</i>	144
Figura 43	<i>Curvas CBR de 10 golpes de C6-E2 (40%)</i>	148
Figura 44	<i>Curvas CBR de 25 golpes de C6-E2 (40%)</i>	149
Figura 45	<i>Curvas CBR de 56 golpes de C6-E2 (40%)</i>	150

Figura 46	<i>Línea de CBR corregido para 0.1" de penetración de C6-E2 (40%)</i>	152
Figura 47	<i>Línea de CBR corregido para 0.2" de penetración de C6-E2 (40%)</i>	153
Figura 48	<i>Ensayo químico – FTIR</i>	155
Figura 49	<i>Curva granulométrica para caracterización de agregados</i>	157
Figura 50	<i>Curva granulométrica para diseño de MAC para pavimento flexible según el método Marshall</i>	175
Figura 51	<i>Estabilidad (kg) - % concreto asfáltico de diseño de mezcla asfáltica en caliente para pavimento flexible según el método Marshall</i>	177
Figura 52	<i>Flujo 0.01" - %concreto asfáltico de diseño de mezcla asfáltica en caliente para pavimento flexible según el método Marshall</i>	178
Figura 53	<i>Relación estabilidad - flujo (kg/cm) - % concreto asfáltico de diseño de mezcla asfáltica en caliente para pavimento flexible según el método Marshall</i>	179
Figura 54	<i>RICE (kg/cm3) - %Concreto asfáltico</i>	181
Figura 55	<i>BULK (kg/cm3) - % Concreto asfáltico</i>	182
Figura 56	<i>Relación Polvo - Asfalto - %concreto asfáltico</i>	183
Figura 57	<i>Estabilidad (kg) - % concreto asfáltico de DMAC para pavimento flexible según el método Marshall</i>	184
Figura 58	<i>Flujo 0.01" - %concreto asfáltico de DMAC para pavimento flexible según el método Marshall</i>	185
Figura 59	<i>Relación estabilidad – flujo</i>	186
Figura 60	<i>RICE (kg/cm3) - % Concreto asfáltico</i>	188
Figura 61	<i>Bulk (kg/cm3)-% concreto asfáltico</i>	190
Figura 62	<i>Relación polvo – asfalto</i>	191
Figura 63	<i>Curva granulométrica para caracterización de agregados</i>	195



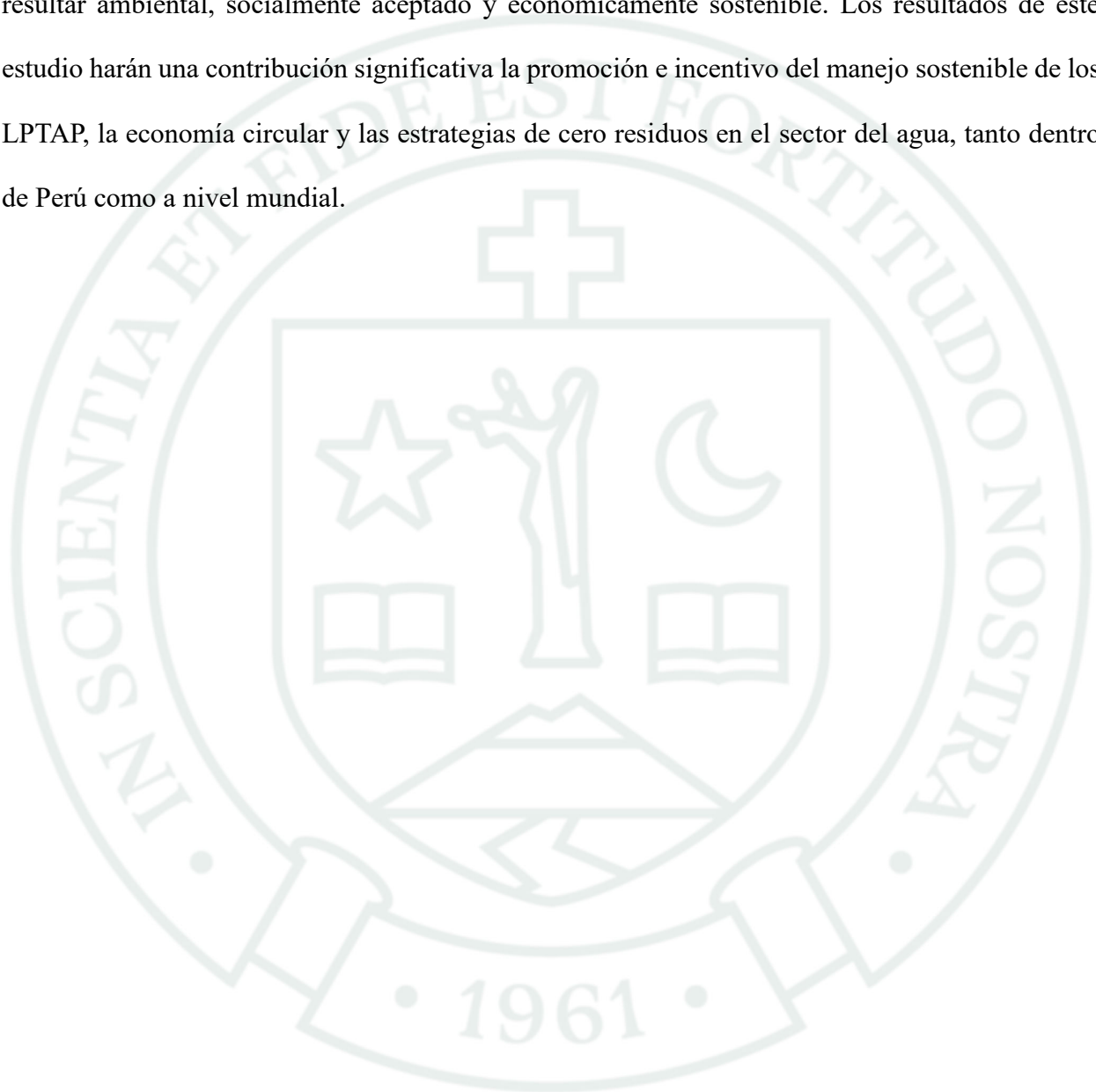
INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico es una necesidad imperativa para la existencia del ser humano y el progreso social. Por lo que, la necesidad de agua en buena calidad crece todos los días debido al hacinamiento. Empero, el tratamiento y limpieza del agua, requiere de procedimientos que inevitablemente generan subproductos que deben eliminarse, conocidos como LPTAP. Sus propiedades no son constantes, pues varían según el origen de la muestra y la zona geográfica (Chang et al., 2020). Alrededor del mundo, se generan millones de toneladas de LPTAP cada año y el volumen de estos aumenta con la demanda hídrica. Se estima que se generan 10000 toneladas de LPTAP diariamente en todo el mundo, por lo cual, la gestión de los LPTAP representa un reto ambiental y económico para todas las autoridades hídricas a nivel mundial (Salimi et al., 2025). El almacenamiento y posterior descarga de LPTAP en vertederos es también un problema. Debido a los escasos de vertederos y la falta de normativas, la eliminación de LPTAP resulta costosa y menos deseable. Por consiguiente, existe una necesidad apremiante de desarrollar prácticas de gestión de lodos que sea más sostenible, que incluya su recuperación, reutilización y valorización.

La reutilización de LPTAP es discutida frecuentemente en la literatura, siendo un ejemplo, la recuperación de sus elementos constitutivos y su uso como material absorbente para tratar lixiviados, contaminantes orgánicos y materiales de construcción (ladrillos, bloquetas, tejas, y otros) (Nguyen et al., 2022). La reutilización de lodos ha resultado positivo a nivel mundial en la producción de materiales cerámicos, como ladrillos, geopolímeros, azulejos. Sin embargo, aún existe una brecha en la ingeniería de carreteras. La oportunidad de que los LPTAP tengan un importe económico, así como, un enfoque de solución sin desperdicios ha llevado al sector del agua a explorar las diversas aplicaciones de los lodos, teniendo en cuenta su composición que varía según la estación, la turbidez del agua, el proceso de decantación, las variaciones en el flujo

entrante, los procesos de tratamiento y la duración de almacenamiento de lodos (Bensitel et al., 2023). Ante ello, se han evaluado casos en los cuales se aplican los lodos como un sustituto parcial del suelo, ya que esta ofrece una serie de ventajas, como reducir el volumen de los lodos que se vierten al medio ambiente y contribuir al objetivo de cero residuos (Amakye & Abbey, 2021). Se han usado diferentes materiales de desecho en la ingeniería geotécnica para estabilizar los suelos, incluida filler de bagazo, cenizas volantes, cemento, cenizas de carbón y polvo de vidrio reciclado (Bensitel et al., 2023). Además, se ha usado los LPTAP en combinación con el suelo para optimizar las propiedades físicas y químicas de los suelos, tales como la resistencia al corte, la capacidad de carga para mejorar los cimientos de estructuras como edificios, vías y puentes (Amakye & Abbey, 2021). Además (Nguyen et al., 2023) investigaron lodos de una planta de tratamiento que emplea cloruro férrico como principal compuesto de tratamiento, generando así, lodos con composiciones de hierro. Sus proporciones fueron de 5% a 25% en mezcla con arena y concluyeron que la adición óptima sería del 15% de lodo, ya que este proporcionaba 4.7% más de resistencia al suelo. (Fiore et al., 2022) investigaron lodos con composición de aluminio y hierro en proporciones de 25% y 50% con suelo arenoso y arcilloso, mencionan que gracias a la composición de aluminio y hierro la proporción óptima sería del 50% de lodo. Estos estudios son prueba de que los lodos tienen un potencial en el reemplazo del suelo. Sin embargo, no se han extendido los estudios de lodos con composiciones diferentes al aluminio y hierro, quedando así incierta los beneficios que se podrían obtener en la reutilización de los lodos según la zona en el cual se ubiquen. Actualmente, los estudios son limitados en cuanto al uso de los LPTAP. Además, estos estudios se centran en otros tipos de lodos, por consiguiente, el propósito de la investigación es evaluar la mezcla de lodos en base a la composición existente en una planta de tratamiento de la ciudad de Arequipa, asimismo, se debe analizar el tipo de suelo sea arcilloso o arenoso con el cual se va a realizar la mezcla

parcial. Como también, se debe evaluar las proporciones óptimas para el reemplazo. Asimismo, se propone reutilizar los LPTAP en el diseño de mezcla de concreto para pavimento rígido y flexible. Dadas estas brechas, se considera una opción de alternativa de reciclaje de los lodos que puede resultar ambiental, socialmente aceptado y económicamente sostenible. Los resultados de este estudio harán una contribución significativa la promoción e incentivo del manejo sostenible de los LPTAP, la economía circular y las estrategias de cero residuos en el sector del agua, tanto dentro de Perú como a nivel mundial.





CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Situación problemática

El agua potable es una necesidad imperativa para la población que ahora supera los 8 mil millones de personas. Para verificar la calidad del agua, es importante utilizar diversos procesos de tratamiento de agua para que satisfagan con las normas de salud y seguridad (De Carvalho Gomes et al., 2019). No obstante, durante el tratamiento, se genera un residuo conocido como LPTAP, a menudo este, es considerado como residuo ya que se desecha al medio ambiente (Liu et al., 2020). Anualmente, se producen grandes cantidades de lodos debido al escaso estudio sobre ellos, estos lodos seguirán aumentando a medida que aumente la demanda de agua. Por otro lado, se debe mencionar que la eliminación de estos materiales supone un costo de eliminación (Godoy et al., 2020). Según la industria australiana del agua, menciona que se estima en 130 dólares por tonelada, lo que supondría un total de 6,2 millones de dólares anualmente (Water Statistics. s.f.). En la actualidad, el método más común de descarga de lodos es eliminarlos en vertederos. Sin embargo, con el crecimiento de la población junto con las escasas regulaciones ambientales por parte del gobierno y agencias reguladoras, la eliminación de los lodos se vuelve restringida y costosa (Jung et al., 2016) por lo que, las prácticas de manejo de LPTAP más sostenible como la reutilización, recuperación y reciclaje son importantes y necesarias.

En Perú, se sabe que se presencia la problemática del agua, por lo que, se han establecido metas claras para el año 2030, de tal manera que se pueda alcanzar el acceso igualitario y generalizado al agua potable, así como a servicios apropiados de saneamiento e higiene, asimismo, a fomentar la participación de la comunidad local para cuidar el agua y saneamiento.

Para alcanzar los objetivos planteados para el 2030, es imperativo que las PTAP cuenten con mayores opciones de gestión sostenible de residuos sólidos, según un informe realizado por FENTAP(2022), gran cantidad de empresas prestadoras del servicio hídrico, carecen de

oportunidades sostenibles tanto operacionales como financieras, para hacerse cargo de toda la logística que implica la prestación de servicios, pues, estas empresas no generan ingresos suficientes para hacerse cargo de todos los gastos imprescindibles para el correcto funcionamiento del sistema.

Mientras tanto, en Arequipa, la sedimentación (lodos) de partículas sólidas es uno de los mayores inconvenientes que se presenta al momento de abastecer agua, según un informe de INGEMMET (2018) se expresa que la sedimentación podría ser una de las causantes de la vulnerabilidad de la infraestructura potable, ya que, se menciona que este problema fue el principal causante del desabastecimiento aproximadamente a 300000 usuarios de la ciudad, debido a una obstrucción en la PTAP La Tomilla II de SEDAPAR.

Figura 1

Sedimentación en la PTAP, Miguel de la Cuba Ibarra



Nota. La figura 1 muestra la visita a campo en la PTAP Miguel de la Cuba Ibarra, para obtener muestras representativas, en el cual se pudo observar que la planta de tratamiento cuenta con pozas de sedimentación, los cuales son rebozados en temporadas de lluvias intensas.

El incentivo para fomentar la economía circular ha hecho que los lodos de tratamiento de agua sean experimentados en varias aplicaciones, como materiales de construcción en agregados,

ladrillos, bloquetas, cementos, cerámicos, tejas y concreto (Turner et al., 2019). Pese a que la literatura muestre diversos métodos de reutilización, estas aplicaciones aún son limitadas ya que conllevan un consumo de energía elevado (para la producción de materiales), lo que aumenta significativamente las emanaciones de GEI, que pueden generar consecuencias sobre el uso del producto final (Nguyen et al., 2022).

Definición del problema

Por lo expuesto anteriormente, considerando las brechas, se propone como alternativa de reciclaje los lodos de tratamiento de agua potable, que puede resultar ambiental, socialmente aceptado y económicamente sostenible. Por lo que, vale cuestionarse ¿Pueden los LPTAP valorizarse para la construcción de materiales de construcción de vías?

Formulación del problema

Problema general

¿Cómo pueden ser valorizados los LPTAP en materiales para la construcción de vías en la ciudad de Arequipa?

Problema específico

- a) ¿Cuáles son las propiedades físicas y químicas de los lodos residuales provenientes del tratamiento de agua potable?
- b) ¿Cuál es el desempeño mecánico de mezclas de suelo con LPTAP, incorporados en proporciones de 20%, 40% y 60% para su aplicación como subrasante en vías de la ciudad de Arequipa?
- c) ¿Cuál es el desempeño mecánico de los LPTAP al incorporarse en diferentes proporciones dentro del diseño de mezcla para pavimento flexible y rígido?

- d) ¿Cuál es la factibilidad y viabilidad de uso de los LPTAP como material en la construcción de vías en la ciudad de Arequipa?

Objetivo general y específicos

Objetivo general

Analizar la valorización de LPTAP como sustituto parcial de materiales para la construcción de vías en la ciudad de Arequipa.

Objetivos específicos

- a) Caracterizar las propiedades físicas y químicas de los lodos residuales provenientes del tratamiento de agua potable.
- b) Evaluar el desempeño mecánico de mezcla del suelo con LPTAP, incorporados en proporciones de 20%, 40% y 60%, para su aplicación como subrasante en vías de la ciudad de Arequipa.
- c) Analizar el desempeño mecánico de los LPTAP incorporados en distintas proporciones en el diseño de mezclas (DM) de concreto (pavimento rígido) y mezclas asfálticas en caliente (pavimento flexible).
- d) Determinar la factibilidad y viabilidad de uso de los LPTAP como material en la construcción de vías en la ciudad de Arequipa.

Importancia del estudio

La valorización de LPTAP es imperativa para brindar mejoras sostenibles en la cadena productiva. Por lo general, la construcción de vías implica el consumo en gran cantidad de materiales vírgenes (agregados y suelo) ya que una parte importante de la estructura del pavimento está compuesta por áridos y tierras, así como agregados, que se aportan desde canteras mediante

un proceso de extracción. Una brecha en la construcción de pavimentos de vías es satisfacer la creciente demanda de recursos físicos y económicos. El uso de materiales secundarios (reutilizables y reciclables), en lugar de primarios (vírgenes) ayuda a aliviar la presión de los vertederos y a reducir la demanda de extracción y es una manera de que la industria de la construcción de vías tenga prácticas de construcción sostenibles y haga que la producción pueda ser más limpia.

Viabilidad

La generación de LPTAP conlleva como resultado la contaminación ambiental y pérdida económica en Perú, ya que estos son tratados de manera lineal y dispuestos de maneras inadecuadas en el ambiente, por lo que aún se requiere que las soluciones de reutilización y reciclaje de este material puedan integrarse a la producción como sustituto de recursos limitados, tal es el caso de la investigación.

Para ello, es necesario que pueda realizarse ensayos mecánicos y de caracterización con mezcla de suelo, como también en el diseño de mezcla asfáltica y mezcla de concreto hidráulico, con la finalidad de que estos parámetros se encuentren de acuerdo con los requisitos y normativas peruanas, asimismo, la investigación se considera viable ya que se dispone con materiales y equipos de laboratorio respectivos. Asimismo, se concretizó el muestreo de los LPTAP para los estudios a realizarse.

Alcance y limitaciones

El alcance del presente trabajo de investigación es la caracterización física – química de los LPTAP, con el fin de determinar proporciones de mezcla entre un suelo convencional de Arequipa con LPTAP extraídos de la PTAP Miguel de la Cuba Ibarra para verificar si este cumple con los estándares normativos para fines de subrasante. Además, realizar un DM de pavimento rígido y

flexible con el fin de analizar el comportamiento mecánico de los lodos y evaluar si este puede ser viable como sustituto parcial de materiales de construcción vial.

Es importante mencionar que el estudio se realiza con muestras inalteradas, cuyos resultados son obtenidos inmediatamente realizado el ensayo, por lo que, no se estudia su efecto posterior. Es importante que se pueda hacer una evaluación de durabilidad y rendimiento del lodo a largo plazo ya que, para la construcción de vías, a pesar de los prometedores resultados que se pueda obtener, la construcción de carreteras es una inversión a largo plazo y la durabilidad de los materiales es esencial para garantizar su longevidad y seguridad. Asimismo, se pueden experimentar con otras proporciones de mezcla, siendo el caso de estudio muy limitado por las bajas cantidades de muestreo obtenido. Por otro lado, se debe mencionar que, el estudio se enfoca netamente en la investigación de los LPTAP como sustituto de materiales de construcción de vías, pudiéndose así, investigar en otras líneas como cimentaciones de edificaciones, puentes y otros.



CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

Antecedentes

La oportunidad de que los LPTAP tengan un costo económico, así como, un enfoque de solución sin desperdicios ha llevado al sector del agua a explorar las diversas aplicaciones de los lodos, teniendo en cuenta su composición que varía según la estación, la turbidez del agua, el proceso de decantación, las variaciones en el flujo entrante, los procesos de tratamiento y la duración de almacenamiento de lodos (Bensitel et al., 2023). Ante ello, se han evaluado casos en los cuales se aplican los lodos como un sustituto parcial del suelo, ya que esta ofrece una serie de ventajas, como reducir el volumen de los lodos que se vierten al medio ambiente y contribuir al objetivo de cero residuos (Amakye & Abbey, 2021). Se ha usado los LPTAP en combinación con el suelo para mejorar las propiedades físicas y químicas de los suelos, como la resistencia al corte, la capacidad de carga para mejorar los cimientos de estructuras como edificios, vías y puentes (Amakye & Abbey, 2021). En la estabilización de suelos, se mejoran las propiedades físicas y químicas del suelo para que sea más resistente a la deformación y sea capaz de soportar estructuras.

En Australia en el artículo titulado como “Investigación sobre la idoneidad de los LPTAP a base de aluminio como sustituto sostenible del suelo para la construcción de carreteras” investigaron lodos de una planta de tratamiento que emplea cloruro férrico como principal compuesto de tratamiento, generando así, lodos con composiciones de hierro. Sus proporciones fueron de 5% a 25% en mezcla con arena y concluyeron que la adición óptima sería del 15% de lodo, ya que este proporcionaba 4.7% más de resistencia al suelo (Nguyen et al., 2023).

En Brasil en el artículo titulado como “Reutilización de lodos de agua como componente geotécnico en la construcción de carreteras: caso de estudio” investigaron lodos con composición de aluminio y hierro en proporciones de 25% y 50% con suelo arenoso y arcilloso, mencionan que gracias a la composición de aluminio y hierro la proporción óptima sería del 50% de lodo. Estos

estudios son prueba de que los lodos tienen un potencial en el reemplazo del suelo. Sin embargo, no se han extendido los estudios de lodos con composiciones diferentes al aluminio y hierro, quedando así incierta los beneficios que se podrían obtener en la reutilización de los lodos según la zona en el cual se ubiquen (Fiore et al., 2022).

Además, en el artículo de Alves Et Al., (2022) investigaron la sustitución parcial de suelos naturales brasileños por lodos con contenido de aluminio y coagulantes férricos para ser utilizados en obras geotécnicas en la construcción de carreteras. El artículo es de tipo experimental, con métodos mixtos, en el cual, se hace una recolección de muestras, caracterización química y física, evaluación mecánica, análisis estadísticos y finalmente la discusión de los resultados.

En el artículo de Nguyen Et AL., (2022) revisaron cuidadosamente las características de los LPTAP, la gestión limpia y sostenible de este recurso, teniendo en cuenta las posibilidades de reutilización y reciclaje. Se hizo una revisión literaria teniendo en cuenta los beneficios posibles y barreras sociales, económicas y ambientales de la implementación de un manejo ambiental de los LPTAP en un contexto de economía circular.

En el artículo de Bensitel Et Al., (2023) se tuvo como objetivo optimizarse la gestión de lodos mediante el reciclaje, para lo cual se realizaron varias pruebas para determinar una cantidad óptima de lodos que se podría reutilizar en una PTAP y una dosis mínima de sulfato de aluminio para lograr una buena coagulación de los lodos. El artículo es de tipo experimental, primeramente, se hace la recolección de muestra, pruebas de floculación y validación, posterior a ello, se discuten los resultados para definir las conclusiones.

En el artículo de Amakye & Abbey, (2021) presenta una revisión en profundidad de las particularidades y comportamiento de los suelos expansivos, este, se centra en la estabilización de

subrasante de pavimentos expansivos. Se han identificado los conceptos más relevantes relacionado a los lodos, se consideraron todas las alternativas de solución, se identifica la opción más efectiva, económica y sustentable, se concluye con los resultados.

En el artículo de Skibsted & Snellings,. (2019) se intenta resumir el progreso de los últimos 4 a 5 años en la reactividad de materiales cementantes suplementarios en mezclas de cemento. Se desarrolla una gama de nuevos materiales cementantes. Se hace una revisión literaria evaluando los mecanismos generales de reacción, propiedades de SCM que afectan la reactividad, Evaluación de la reactividad en cementos mezclados, arcillas calcinadas y finalmente las conclusiones.

En el artículo de Baghbahi Et Al,. (2023) el objetivo fue predecir el módulo de corte y relación de amortiguación para arena predominante dilatativa utilizando dos métodos de inteligencia artificial. Se hizo una recopilación de datos, un modelado basado en datos, regresión lineal y comparación de resultados con el fin de una medición precisa del módulo de corte del suelo.

En el artículo de Kumar Et Al,. (2020) se evaluó adsorbentes a base de aluminio y hierro para la remediación de la acuosa. El adsorbente a base de hierro se derivó de lodos de drenaje de minas de carbón, un subproducto del tratamiento de drenaje. Se hizo un análisis de reactivos en la investigación, caracterización del adsorbente y finalmente se define la conclusión.

En el artículo de Ahmad Et Al,. (2016) el objetivo principal fue presentar una revisión integral de los enfoques sostenibles y las tendencias prospectivas en el manejo de lodos que contribuyen a la reutilización. Se hizo una revisión literaria sobre la caracterización fisicoquímica, toxicidad y desafíos ambientales, reutilización sostenible y finalmente una discusión de los resultados.

En el artículo de Won Jung Et Al., (2016) se evaluó la viabilidad sobre la reutilización directa de residuos recuperados de coagulantes como adsorbentes para la eliminación de fosfatos de soluciones acuosas. En un estudio experimental se analiza los LPTAP y aguas residuales de textiles, para ello, se hace la determinación de rangos de parámetros clave para la recuperación de aluminio.

En el artículo de Xu Et Al., (2020) se hizo una revisión integral sobre el estado actual de lodos generados en el agua residual, un elemento reciclado que puede usarse como medio filtrante de biorretención para la eliminación de contaminantes clave de escorrentía de aguas pluviales. Comprende un breve resumen de las características de lodos, evaluación exhaustiva del desempeño de lodos en la eliminación de los principales contaminantes de la escorrentía de aguas pluviales, una discusión sobre los mecanismos de eliminación de fósforo mecanismos y finalmente se determinan las conclusiones.

En el artículo de Liu Et Al., (2020) se investigó la viabilidad de utilizar lodos en adoquines de hormigón, se evaluaron exhaustivamente las propiedades mecánicas y de durabilidad del adoquín con diferentes proporciones de reemplazo de arena con lodos secados en hornos. Se realizó una recolección de materiales, una observación microestructural para la proporción de mezcla en los adoquines.

En el artículo de De Carvalho Et Al., (2019) se evaluó los diferentes tipos de lodos y sus últimas aplicaciones en materiales de construcción como ladrillos, cerámicos, adoquines, áridos ligeros, cemento, hormigón y materiales compuestos. Se hizo una revisión crítica de los avances en la aplicación de lodos en materiales de construcción, sintetizando resultados recientes para definir conclusiones acertadas.

En el artículo Anburuvel Et Al., (2023) se pretende evaluar el efecto de la incorporación de residuos de cáscara de huevo y cáscara de arroz para estabilizar el suelo laterítico a base de geopolímeros para la construcción de bases de carreteras. Se hicieron pruebas de Proctor modificado, resistencia a la compresión, solución de hidróxido de sodio para determinar resultados óptimos.

En el artículo Graupner Et Al., (2020) se centró en la caracterización química, mineralógica, morfológica y física de muestras de lodos, recogidos en los lechos de secado en una PTAP y calcinadas a escala de laboratorio, para el desarrollo de un material cementoso suplementario. Se hizo una investigación experimental por lo que se hace la recolección, clasificación y calcinación de lodos para poder realizar una caracterización química, física, mineralógica y morfológica de residuos de plantas de tratamiento.

Actualmente, los estudios son limitados en cuanto al uso de LPTAP. Además, estos estudios se centran en otros tipos de lodos, mientras que la finalidad del estudio es investigar la mezcla de lodos en base a la composición existente en una planta de tratamiento de Arequipa, asimismo, se debe analizar el tipo de suelo sea arcilloso o arenoso con el cual se va a realizar la mezcla parcial. Como también, se debe evaluar las proporciones óptimas para el reemplazo. Dadas estas brechas, se considera una opción de alternativa de reciclaje de los lodos que puede resultar ambiental, socialmente aceptado y económicamente sostenible. Los resultados de este estudio harán una contribución significativa la promoción e incentivo del manejo sostenible de los LPTAP, la economía circular y las estrategias de cero residuos en el sector del agua, tanto dentro de Perú como a nivel mundial.

Bases teóricas

LPTAP

Los LPTAP, se refiere al material acuoso o pastoso que se forma al concentrarse los sólidos que se han sedimentado o decantado del agua, así como los residuos del lavado de filtros (MVCS, 2017).

Para solucionar las necesidades de agua de una población en aumento, y con los crecientes esfuerzos para suministrar agua potable limpia al 29% estimado de la población global que en la actualidad no tiene acceso a ella, existe una demanda cada vez mayor de agua potable limpia y segura. Para satisfacer esta creciente demanda, el agua cruda debe tratarse para eliminar cualquier microorganismo transmitido por el agua, el exceso de contenido mineral y los sedimentos suspendidos. Uno de los métodos más comunes empleados para eliminar partículas suspendidas y coloides del agua cruda es la adición de sales metálicas para iniciar un proceso de coagulación-floculación. Sin embargo, este proceso genera grandes cantidades de un residuo similar al lodo (o subproducto) conocido como LPTAP, que existe una brecha para su eliminación o el uso final del residuo.

Al ser subproductos del proceso de coagulación-floculación utilizado para eliminar partículas suspendidas y coloidales del agua potable, la composición de los lodos está determinada principalmente por el tipo de coagulantes empleados y los componentes del agua cruda que se está tratando. Dependiendo del diseño de una PTAP en particular, la eliminación de las impurezas se realiza a través de una simple floculación y sedimentación por gravedad o mediante un proceso de filtración más activo.

Los lodos recién producidos se encuentran en estado líquido con un alto contenido de agua, lo cual hace que su transporte sea costoso y su manejo un desafío, particularmente en los volúmenes generados por PTAP a gran escala; por lo tanto, se emplean comúnmente procesos de deshidratación o espesamiento (Dassanayake et al., 2015). La estrategia de deshidratación comunes incluyen el uso de lagunas o lechos de secado (Castaldi et al., 2014). El término "lodos de tratamiento de agua" es un término holístico que se aplica tanto al material cuando contiene de 2 a 4% de sólidos como cuando está seco o parcialmente seco. Estos términos son generalmente utilizados como tales por ingenieros y empresas de gestión de residuos. Sin embargo, dentro de la literatura científica, es solo el producto deshidratado al que más se hace referencia como residuos de tratamiento de agua. Esta discrepancia en la definición resalta algunas de las incertidumbres asociadas con el uso y la aplicación de los residuos de tratamiento de agua y con cómo se discuten en la literatura.

Propiedades físicas y química de LPTAP

Las muestras de LPTAP se caracterizan física y químicamente según los métodos estándar. Para la aplicación de residuos en obras geotécnicas, el requisito básico del material es que esté libre de cualquier elemento contaminante, impureza orgánica y componentes peligrosos. Para llevar a cabo la investigación debe utilizarse especificaciones técnicas para las capas de subrasante y carpeta asfáltica.

pH

el pH hace referencia a la acidez del lodo, este influye en la disponibilidad de nutrientes según los tipos de microorganismos presentes en los sustratos. Un pH alto (entre 7 y 8) y un contenido elevado de nitrógeno, favorecen el desarrollo de bacterias y actinomicetos. Por otro lado,

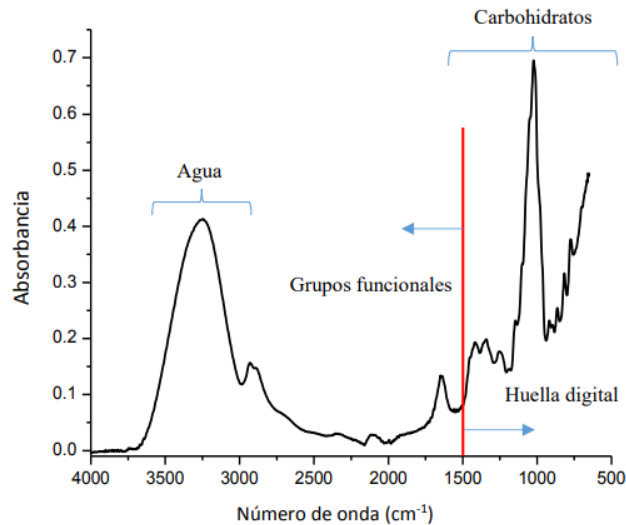
los hongos prosperan mejor en condiciones de pH bajo (entre 5 y 6). Muchos nutrientes como Fe, Mn y Zn tienden a ser menos disponibles en pH de 7.5 y 8.

Espectrometría infrarroja de transformada de Fourier – FTIR

La espectroscopia FTIR es una técnica espectral versátil y de amplio uso, que se basa en las vibraciones y rotaciones atómicas. Este principio permite la detección de moléculas que poseen un momento dipolar, dado que cada sustancia es única en cuanto al tipo, cantidad y disposición de sus átomos, lo que conduce a un espectro FTIR único. En términos simples, al dirigir un haz de luz infrarroja de longitud de onda continua hacia las moléculas que se estudian, se absorbe la luz correspondiente a un número de onda específico que indica una diferencia de energía entre dos niveles energéticos, generando así un espectro de absorbancia. Dado que las uniones químicas y los grupos funcionales de una molécula compuesta por átomos se encuentran en un estado de vibración permanente, la espectroscopia FTIR puede identificar las estructuras internas de las moléculas. Por lo general, con los avances en la técnica FTIR, las mediciones pueden llevarse a cabo en modalidad de transmisión o mediante reflexión total atenuada ATR.

Figura 2

Espectro de FTIR



Fuente: *Repos.universitario,mx/jspui*.

Nota. La figura 2 representa las primordiales zonas de un espectro infrarrojo, utilizado como ejemplo el espectro de una muestra de miel de abeja.

Subrasante

La subrasante se refiere al nivel del terreno que se prepara para recibir la estructura del pavimento o el afirmado, considerando las actividades de movimiento de tierras necesarias, como el corte y el relleno. Este nivel de suelo es esencial, ya que soportará el pavimento y, por consiguiente, las cargas producidas por el tránsito vehicular. Por lo tanto, es vital que el material de la subrasante sea capaz de resistir estas cargas a lo largo de toda la vida útil del pavimento.

Para asegurar esta capacidad de soporte, la subrasante debe estar formada por suelos seleccionados que cumplan con ciertas características técnicas y deben ser compactados en capas de manera adecuada. Según el MEM E 115 del MTC (2016), es necesario que la tierra en los últimos 30

centímetros debajo de la parte superior de la subrasante sea comprimida al 95% de la mayor densidad seca obtenida mediante la prueba Proctor modificado. Además, para evaluar la capacidad de carga de la capa subrasante, se emplea el índice CBR (Capacidad de Carga), que mide la resistencia del suelo en comparación con un material estándar de referencia, y se basa en el 95% de la máxima densidad seca del ensayo Proctor modificado. El valor obtenido del CBR permite clasificar la subrasante en diferentes categorías de capacidad portante, las cuales se detallan en la tabla 3 el Manual del MTC (2014). Esta clasificación es fundamental para garantizar que el pavimento construido sobre la subrasante pueda soportar de manera efectiva las cargas esperadas durante su uso.

Tabla 1

Condición de subrasante según valores de CBR

Categoría de subrasante	CBR
Subrasante inadecuada	CBR < 3%
Subrasante insuficiente	CBR ≥ 3% a CBR < 6%
Subrasante regular	CBR ≥ 6% a CBR < 10%
Subrasante buena	CBR ≥ 10% a CBR < 20%
Subrasante muy buena	CBR ≥ 20% a CBR < 30%
Subrasante excelente	CBR ≥ 30%

Nota. En la tabla 1, se visualizan valores de CBR que categorizan entre inadecuada hasta excelente a la capa de subrasante.

Por lo general, los suelos que presentan valores inferiores de 6% en CBR, representan a suelos que no son capaces de soportar cargas de tránsito transmitidas desde las capas superiores. En tal situación, es imperativo realizar un tratamiento o estabilización del suelo de acuerdo con su naturaleza.

Estabilización de suelos

De acuerdo con el *Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos* (2014) se comprende que la mejora de suelos es un procedimiento que tiene como objetivo perfeccionar sus características físicas; para ello se emplean métodos mecánicos y sustancias químicas, tanto de origen natural como artificial. Generalmente, en los suelos subyacentes que representan un CBR inferior al 6%, se implementan estas técnicas de estabilización, y se les denomina estabilización con materiales alternativos.

Estabilización de suelo con LPTAP

La Estabilización de suelo – lodo, busca optimizar las características del material sólido sin alterar su estructura y composición fundamentales. En este proceso, se emplea la compactación como una herramienta clave para disminuir la cantidad de vacíos en el suelo, mejorando así sus propiedades de ingeniería.

Para la estabilización de suelos con lodos provenientes del tratamiento de agua deben considerarse dos aspectos fundamentales en la elección de métodos.

Estabilización de suelo por mezcla de suelos

La estabilización por mezcla de suelos hace referencia a la integración del material del suelo existente con adiciones de material de préstamo. El proceso parte con la desintegración o escarificación del suelo existente a una profundidad de 15 centímetros, seguida de la incorporación del material de préstamo. Es crucial que el material de aporte se encuentre pre humedecido para alcanzar una humedad óptima de compactación antes y durante la mezcla. La humedad adecuada se obtendrá mediante la adición de agua, y se debe garantizar una mezcla homogénea en ambos

niveles del suelo, cumpliendo con las especificaciones de densidad y espesores establecidas en el proyecto.

Agregados

Son sólidos granulares e inertes que son usados en la construcción de pavimentos viales, tanto con la incorporación de elementos activos como sin ella, siempre que presenten granulometrías adecuadas. Estos materiales se emplean para productos de alta resistencia, a través de su combinación con aglomerantes que tengan la capacidad de realizar una activación hidráulica, tales como cementos y cales, o con ligantes asfálticos (Guo et al., 2024)

Propiedades de materiales pétreos

Las características de los agregados pueden ser conceptualizadas desde dos perspectivas: una, considerándolos como elementos individuales o aislados, y otra, evaluándolos en su conjunto o en agregado.

Propiedades en conjunto de muestra

Se refieren a sus características cuando se consideran en su totalidad. Entre estas, la angularidad o el desgaste del material pétreo es particularmente significativa, ya que impacta directamente en la fricción entre los diferentes elementos del agregado.

Filler

Es un producto utilizado en las composiciones asfálticas para mejorar la distribución de tamaños de los finos que no se ajustan a las normativas técnicas necesarias.

Pavimento

Es una construcción formada por diferentes estratos que se instala sobre la base de una vía con la finalidad de soportar y repartir las fuerzas producidas por los automóviles, aumentando la

seguridad y el confort en el tráfico. Normalmente, se clasifican en capas de subrasante, subbase y base.

Los tipos de pavimento según su sistema estructural son los siguientes:

- ✓ Pavimentos rígidos
- ✓ Pavimentos flexibles

Clasificación de los pavimentos

Pavimento Flexible

Se fabrican utilizando componentes de asfalto. Presentan un espesor de asfalto que usualmente se ubica sobre dos estratos flexibles: la base y subbase. No obstante, de acuerdo con los las condiciones especiales de proyectos, se puede omitir alguna de las capas.

Carpeta Asfáltica

Esta ofrece una superficie uniforme y estable para el tránsito, con textura y color adecuados, y ser capaz de resistir los efectos abrasivos del tráfico.

Pavimento Rígido

Los pavimentos rígidos se componen principalmente de losas de concreto hidráulico que se apoyan sobre la subrasante o sobre una subbase de material seleccionado. Gracias a la alta rigidez y al elevado coeficiente de elasticidad del concreto hidráulico, los esfuerzos se distribuyen en una zona más amplia.

Losa de Concreto

Soporte Estructural: La losa no solo cumple funciones similares a las de la carpeta flexible, sino que también proporciona soporte estructural, resistiendo y transmitiendo adecuadamente los esfuerzos aplicados.

Diseño de mezcla para pavimento

Diseño de mezcla asfáltica en caliente (MAC) por el método de Marshall

El concepto de diseño de mezcla Marshall se aplica ampliamente para determinar el contenido óptimo de asfalto de la mezcla. Se eligen cinco contenidos de asfalto distintos y la granulometría se elige de acuerdo con el estándar. El valor del contenido óptimo de asfalto (OAC) se determina por varios factores, incluyendo el número de flujo, los requisitos de estabilidad Marshall, los huecos en el agregado mineral (VMA), los huecos llenos de asfalto (VFA) y los huecos de aire (AV). Debido a que el MMD es empírico, su capacidad para pronosticar con precisión los efectos de las variaciones en la carga y los factores ambientales, así como los tipos y la calidad del material, en el desempeño del pavimento es limitada.

Diseño de mezcla de concreto hidráulico por el método del ACI

El comité ACI (American Concrete Institute) fue creado en 1904 en Michigan, Estados Unidos, con el objetivo de establecer estándares, normas y recomendaciones para el diseño y fabricación del concreto, ya que en ese momento solo se contaba con referencias sin un marco estándar definido. Por ello, un grupo de ingenieros se unió para fundar esta organización, siendo el ingeniero Richard Humphrey el primer líder. En 1910, lanzaron el primer código de construcción basado en concreto, titulado "Regulaciones estándar de construcción para el uso del hormigón armado". Con el tiempo, este comité, compuesto por ingenieros e investigadores de diversas áreas de la construcción, ha desarrollado normas y estándares que hoy son aplicados globalmente.

El diseño de mezclas mediante el método ACI es un procedimiento basado en la experiencia empírica. Utiliza tablas que han sido ajustadas con los años para calcular la dosificación de los componentes del concreto, utilizando dos tipos de agregados y considerando las propiedades y características de estos. Este método se aplica principalmente al concreto de peso normal, aunque puede utilizarse en otras condiciones si se realizan verificaciones con muestras adicionales





CAPÍTULO III
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Diseño metodológico

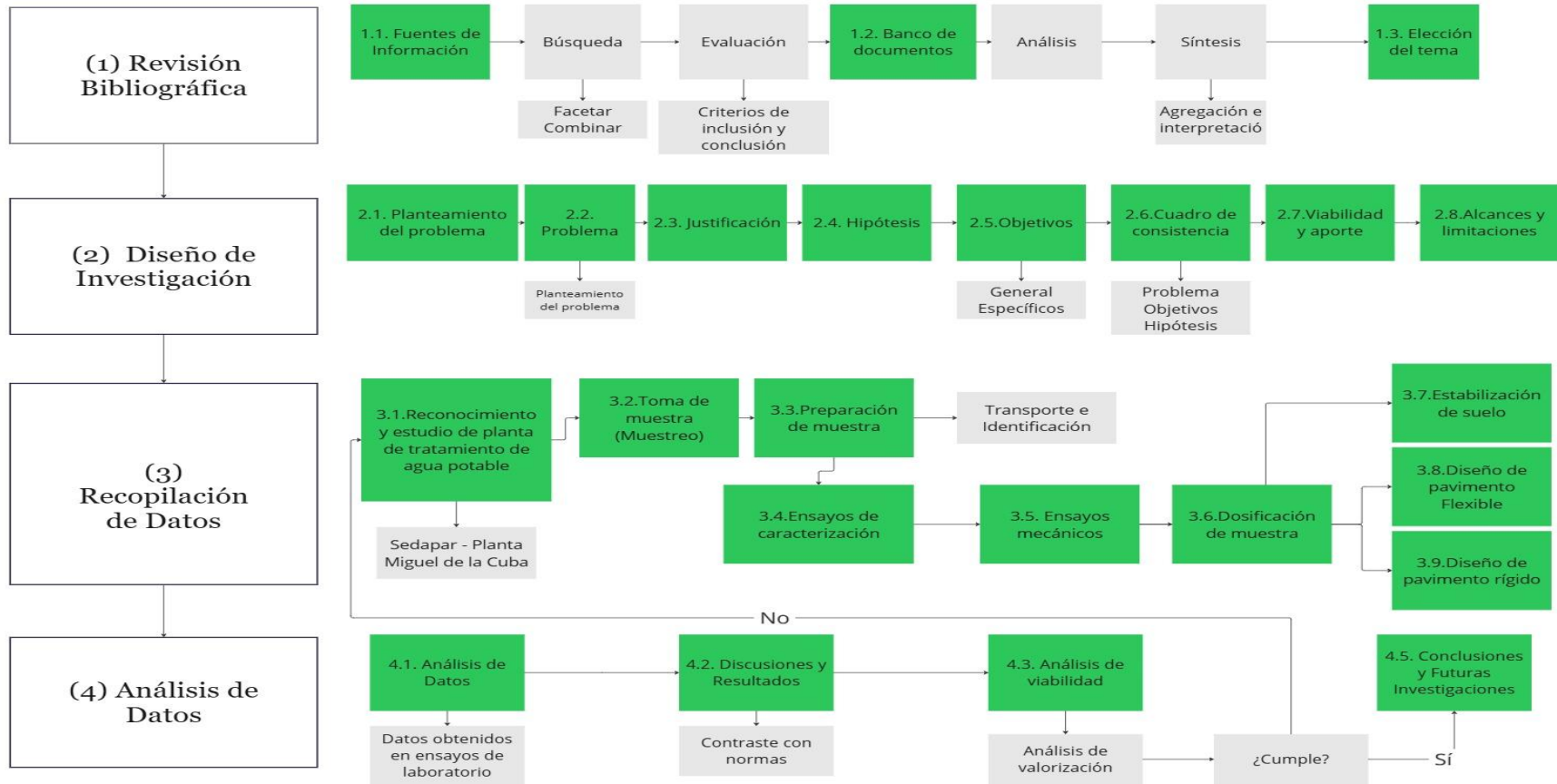
El presente estudio, se encuentra dentro del diseño experimental y evaluativo, estos se caracterizan porque la recolección de datos de una variable (independiente) ha sido modificada intencionalmente con el objetivo de predecir el comportamiento de otra variable (dependiente) (Hernández., 2014). El nivel, es sumamente explicativa y el propósito es validar de que los cambios producidos generan una relación de causa – efecto (Arias G., 2012).

Métodos de investigación

Se parte de la identificación del problema a través de una revisión bibliográfica contundente para adquirir las herramientas necesarias en la investigación. Una vez identificado, se procede al planteamiento de las hipótesis para las posibles soluciones. Realizado lo anterior se definen los objetivos de la investigación, metodología y demás trabajos preliminares en gabinete. Una vez en campo, se evalúa y selecciona los recursos necesarios para la recolección de muestras de lodos residuales provenientes de tratamiento de agua y suelo convencional. Durante una excursión, se obtienen los permisos necesarios, se examinan los materiales y se toma la muestra de los lodos residuales del PTAP. Los materiales deben ser transportados en bolsas o sacos que mantengan las condiciones naturales de la muestra, la cantidad de muestra variará según a la cantidad de ensayos a realizarse. Luego se prepara los materiales en laboratorio y se procede a realizar los respectivos ensayos para la identificación de los lodos residuales y ensayos químicos, físicos y mecánicos necesarios.

Figura 3

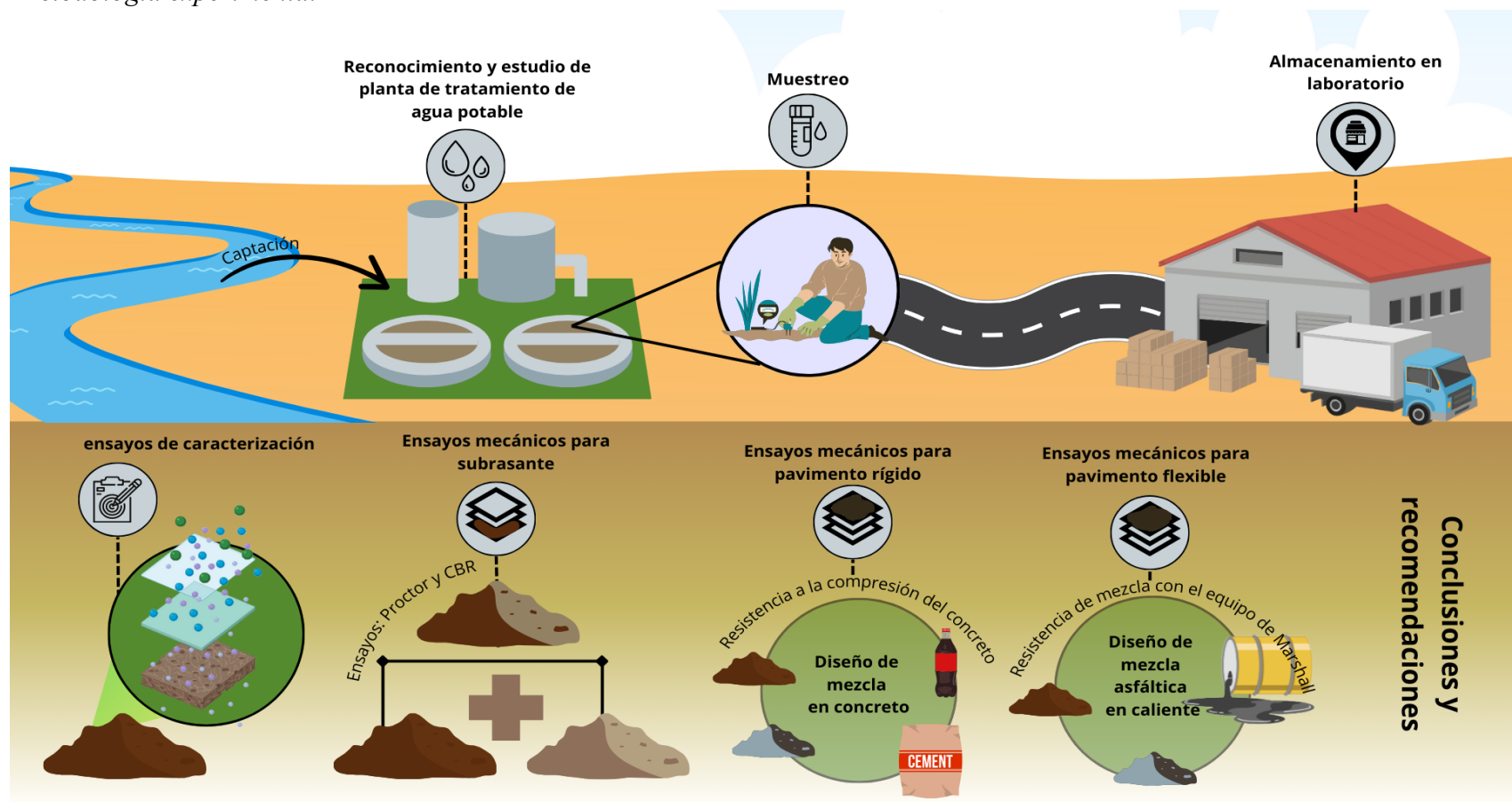
Metodología de estudio



Nota: En la figura 3, se detalla la organización del esquema metodológico.

Figura 4

Metodología experimental



Nota: en la figura 4, se detalla la organización del esquema experimental.

Población y muestra

Población

Los materiales que componen las muestras para la estabilización de suelo DM de pavimento rígido y flexible se emplearán en las pruebas de las capas estructurales del pavimento:

- ✓ Material de subrasante para ensayos de laboratorio
- ✓ Agregados provenientes de una cantera, La Poderosa.
- ✓ LPTAP
- ✓ Material para DM de concreto (cemento, agua y aditivo)
- ✓ Material para DM asfáltico (Bitumen)

Muestra

- ✓ LPTAP (SEDAPAR)
- ✓ Material para diseño de concreto (cemento, agua y aditivo) HIDRÁULICO
- ✓ Material para diseño asfáltico (Bitumen) PEN 85/100

Definición de variables

Se define como variable independiente a los LPTAP, ya que estos son los que serán caracterizados física y químicamente, más no se cambiarán sus propiedades para la investigación.

Se define como variable dependiente son los materiales en las que se puede adicionar el lodo residual para la construcción de vías. Siendo específicamente, la sustitución parcial de suelo para subrasante, DM de concreto (pavimento rígido) y DM asfáltica en caliente (pavimento flexible).

Operacionalización de variables

Variable independiente

Tabla 2

Variable independiente

Variable Independiente	Dimensiones	Indicadores
LPTAP	Propiedades físicas	Granulometría
		Límite de Atterberg
		Peso específico
		Contenido de sales y sulfatos
		Clasificación de suelos
		Contenido de humedad
	Propiedades químicas	FTIR

Nota. En la tabla 2, se presenta la variable independiente junto a sus dimensiones e indicadores.

Variable dependiente

Tabla 3

Variable Dependiente

Variable Dependiente	Dimensiones	Indicadores
Materiales para la construcción de vías	Desempeño mecánico de suelo con LPTAP (subrasante)	Próctor modificado
		CBR
	Desempeño mecánico de DM asfáltica con LPTAP (pavimento flexible)	DM por el método Marshall
		Bulk
		Rice
		Ensayo de estabilidad - flujo
		DM por el método ACI
	Desempeño mecánico de DM de concreto con LPTAP (pavimento flexible)	F'c del concreto

Nota. En la tabla 3, se especifica la variable dependiente junto a sus dimensiones e indicadores.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Diseño de investigación (Según Ghafoor et al., 2024)

Se parte de la identificación del problema a través de una revisión bibliográfica contundente para adquirir las herramientas necesarias en la investigación. Una vez identificado el problema, se procede al planteamiento de hipótesis para la solución del problema. Realizado lo anterior se definen los objetivos de la investigación, metodología y demás trabajos preliminares en gabinete.

Materiales y métodos de prueba

Como primer paso se evalúa y selecciona los recursos necesarios para la recolección de muestras de LPTAP y suelo convencional. Durante una excursión, se examinan los materiales, se obtienen los permisos necesarios y se toma la muestra de los lodos del PTAP. Los materiales deben ser transportados en bolsas o sacos, la cantidad de muestra variará según a la cantidad de ensayos a realizarse. Luego se prepara los materiales para diversos ensayos de laboratorio. Se procede a realizar los respectivos ensayos para la identificación del lodo. Se realiza el estudio de composición físico - químico en laboratorio. A continuación, se realizan las pruebas preliminares a los materiales, en los que se incluye el contenido de humedad, granulometría y el límite de Atterberg, entre otros.

Análisis físico – químico

Para la mezcla parcial, se deben hacer ensayos de reconocimiento y clasificación del suelo con el que se hará la mezcla, se recomienda que este sea elegido debido a su abundancia y disponibilidad para la construcción de vías. Estas muestras deben ser adoptadas localmente por contratistas para que sirvan como subrasantes en las vías.

Se recoge una muestra de suelo a aproximadamente 0,5 m por debajo de la superficie, después que se limpia la vegetación de la superficie. Se coloca la muestra en bolsas o sacos que mantengan las condiciones reales de la muestra. Se registra el número de muestras, la fecha, la hora y la ubicación. Los criterios de muestreo del suelo para la mezcla parcial, debe ser según sea la disponibilidad que se tenga para que sirvan como subrasante en las vías.

La percepción de reciclar un residuo como material sustituto es una actividad de alto riesgo, por lo que, se deben hacer con materiales y métodos correctos. En el contexto de lidiar con una cantidad cada vez mayor de lodos y fuertes impulsores hacia el desperdicio cero en el sector del agua, este estudio debe probar la mezcla parcial en el suelo, con una proporción significativamente más alta que estudios anteriores en la literatura. Por lo que, se recomienda en proporciones de 20 – 80, 40 – 60 y 60 – 40 para estudiar los cambios en el desempeño técnico de la mezcla y producir evidencia de que el uso de lodos como reemplazo del suelo es beneficioso.

Métodos de prueba

Según la tabla, se mencionan las pruebas respectivas para identificar las propiedades química y mecánicas.

Tabla 4

Pruebas de laboratorio

N°	Tipo de Prueba
1	Contenido de humedad
2	Granulometría
3	Límite de Attemberg
4	Ensayo de compactación (Proctor)
5	Ensayo CBR

Nota. En la tabla 4, especifican las pruebas a realizarse en laboratorio.

DM de Concreto – Método ACI (American Concrete Institute)

El procedimiento ACI es un procedimiento normado por el American Concrete Institute, este es utilizado para determinar la dosificación adecuada de los materiales necesarios para el concreto (cemento, agua, agregados finos, agregados gruesos y aditivos). Su principal objetivo es obtener un DM óptimo que cumpla con la resistencia, trabajabilidad y durabilidad requeridas para un objetivo determinado. Este método parte de f'_c a los 28 días, el cual debe ser tomado en cuenta como un criterio fundamental de diseño. A parte de ella, se determinará los siguientes parámetros:

1. Selección de la relación agua/cemento (a/c).
2. Contenido de aire incluido (SLUMP).
3. Determinación de la cantidad de agua de mezclado.
4. Cálculo del contenido de cemento.
5. Proporción de agregados finos y gruesos.
6. Correcciones por humedad y absorción de agregados.

Se ajusta la mezcla para obtener las cantidades reales de humedad de cada componente en estado de obra.

DM Asfáltica en Caliente – Método Marshall

Para el DM asfáltica en caliente se requiere la combinación de materiales pétreos y ligante asfáltico en proporciones adecuadas para obtener un producto que sea estable, fluido, durable, flexible, económico y trabajable. Por consiguiente, es de suma importancia realizar los siguientes ensayos de caracterización en agregados.

Técnicas de procesamiento de datos

Ensayos de laboratorio

Estudio de Suelo Natural de Arequipa

Tabla 5

Ensayos para suelo natural

Suelo Natural de Arequipa		
ítem	Cantidad	Norma Referencial
Granulometría	3	MTC E 107
Humedad natural	3	MTC E 108
Límite líquido	3	MTC E 110
Límite plástico	3	MTC E 111
Gravedad específica	3	MTC E 113
Contenido de Sales y sulfatos	3	MTC E 219
Próctor modificado	3	MTC E 115
CBR	3	MTC E 132
Total	24	

Nota. En la tabla 5, se presenta los ensayos a realizarse para el suelo natural.

Estudio de sedimento (LPTAP)

Tabla 6

Ensayos para sedimento (LPTAP)

LPTAP		
Ítem	Cantidad	Norma Referencial
Granulometría	1	MTC E 107
Humedad natural	3	MTC E 108
Límite líquido	3	MTC E 110
Límite plástico	3	MTC E 111
Gravedad específica	3	MTC E 113
Ftir	2	-
Total	15	

Nota. En la tabla 6, se presenta los ensayos a realizarse al sedimento (LPTAP)

Mezcla parcial de suelo y LPTAP – SUBRASANTE

Tabla 7

Ensayo para la mezcla parcial de suelo y sedimento para subrasante

Mezcla parcial de suelo y LPTAP - SUBRASANTE				
Ítem	Cantidad	Norma Referencial	% de suelo	% de Lodos
Próctor modificado	1	MTC E 115	80%	20%
CBR	1	MTC E 132	80%	20%
Próctor modificado	1	MTC E 115	60%	40%
CBR	1	MTC E 132	60%	40%
Próctor modificado	1	MTC E 115	40%	60%
CBR	1	MTC E 132	40%	60%
Total	6			

Nota. En la tabla 7, se muestran los ensayos para la mezcla parcial de suelo y sedimento para subrasante.

Caracterización de materiales para DM de concreto (Pavimento rígido) por el método

ACI

Tabla 8

Ensayos de caracterización de agregados finos para pavimento rígido

Caracterización de materiales para DM de concreto (Pavimento rígido) por el método ACI			
Agregado fino			
Descripción	Cantidad	Norma Referencial	
Granulometría	1	MTC E 204	
Contenido total de humedad	3	MTC E 215	
Peso unitario y vacíos de los agregados	3	MTC E 203	
Terrones de arcilla y partículas friables	1	NTP 400.015	
Impurezas orgánicas en agregados finos para concreto	1	MTC E 213	
Índice de plasticidad	3	MTC E 110 - MTC E 111	
Equivalente de arena	3	MTC E 114	
Partículas livianas en los agregados	1	MTC E 211	
Arcillas nocivas utilizando Azul de metileno	1	NTP 239.401	
Peso específico y absorción de agregados finos	3	NTP 400.022	
Cloruros y sulfatos solubles en agua para agregados en concreto	1	NTP 400.042	
Total	21		

Nota. En la tabla 8, se muestran los ensayos de caracterización del agregado fino para DM de concreto.

Caracterización de materiales para DM de concreto por el método ACI

Tabla 9

Ensayos de caracterización de agregados grueso para pavimento rígido

Caracterización de materiales para DM de concreto (Pavimento rígido) por el método ACI			
Agregado grueso			
	Descripción	Cantidad	Norma Referencial
	Granulometría	1	MTC E 204
	Abrasión máquina de los ángeles	1	MTC E 207
	Terrones de arcilla y partículas friables	1	MTC E 212
	Partículas livianas en los agregados	1	MTC E 211
	Porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso	1	MTC E 210
	Partículas chatas y alargadas en agregados	1	MTC E 223
	Total	6	

Nota. En la tabla 9, se muestran los ensayos de caracterización del agregado grueso para diseño de mezcla de concreto (Pavimento rígido) por el método ACI.

Diseño de mezclas

Tabla 10

Diseños de mezcla para pavimento rígido agregando porcentajes de sedimento

Diseño de mezclas			
	Ítem	Cantidad	Norma
	DM	1	ACI 211.1
	DM	1	
	DM	1	
	DM	1	
	f'c del concreto	18	NTP 339.034
	f'c del concreto	18	
	f'c del concreto	18	
	f'c del concreto	18	
	Total	76	

Nota. En la tabla 10, se muestran los diseños de mezcla para pavimento rígido agregando porcentajes de sedimento.

Caracterización de materiales para diseño de mezcla asfáltica (Pavimento flexible)
por el método Marshall

Tabla 11

Ensayos de caracterización de agregados finos para pavimento flexible

Caracterización de materiales para DM asfáltica (Pavimento flexible) por el método Marshall		
Agregado fino		
Descripción	Cantidad	Norma
Equivalente de arena	3	MTC E114
Angularidad del agregado fino	1	MTC E222
Arcillas nocivas utilizando Azul de metileno	1	NTP 239.401
Índice de plasticidad (en malla Nro. 40)	3	MTC E110 - E111
Durabilidad al sulfato de sodio y magnesio	1	MTC E209
Índice de durabilidad	1	MTC E214
Sales solubles totales	1	MTC E219
Peso específico y absorción de agregados finos	3	MTC E205
Granulometría	1	MTC E204
Contenido de humedad	3	MTC E215
Peso unitario y vacíos	3	MTC E203
Adhesividad de los ligantes bituminosos a los áridos finos (Procedimiento Riedel Weber)	1	MTC E220
Total	22	

Nota. En la tabla 11, se muestran los ensayos de caracterización del agregado fino para DM asfáltica (Pavimento flexible) por el método Marshall.

Caracterización de materiales para diseño de mezcla asfáltica (Pavimento flexible)

por el método Marshall

Tabla 12

Ensayos de caracterización de agregados grueso para pavimento flexible

Caracterización de materiales para DM asfáltica (Pavimento flexible) por el método Marshall		
Agregado grueso		
Descripción	Cantidad	Norma
Durabilidad al sulfato de sodio y magnesio	1	MTC E209
Abrasión máquina de los ángeles	1	MTC E207
Revestimiento y desprendimiento de mezclas agregado – bitumen	1	MTC E517
Índice de durabilidad	1	MTC E214
Partículas chatas y alargadas	1	MTC E223
Porcentaje de partículas fracturadas	1	MTC E210
Sales solubles	1	MTC E219
Peso específico y absorción	3	MTC E206
Granulometría	1	MTC E204
Contenido de humedad	3	MTC E215
Peso unitario y vacíos	3	MTC E203
Total	17	

Nota. En la tabla 12, se muestran los ensayos de caracterización del agregado grueso para diseño de mezcla asfáltica (Pavimento flexible) por el método Marshall.

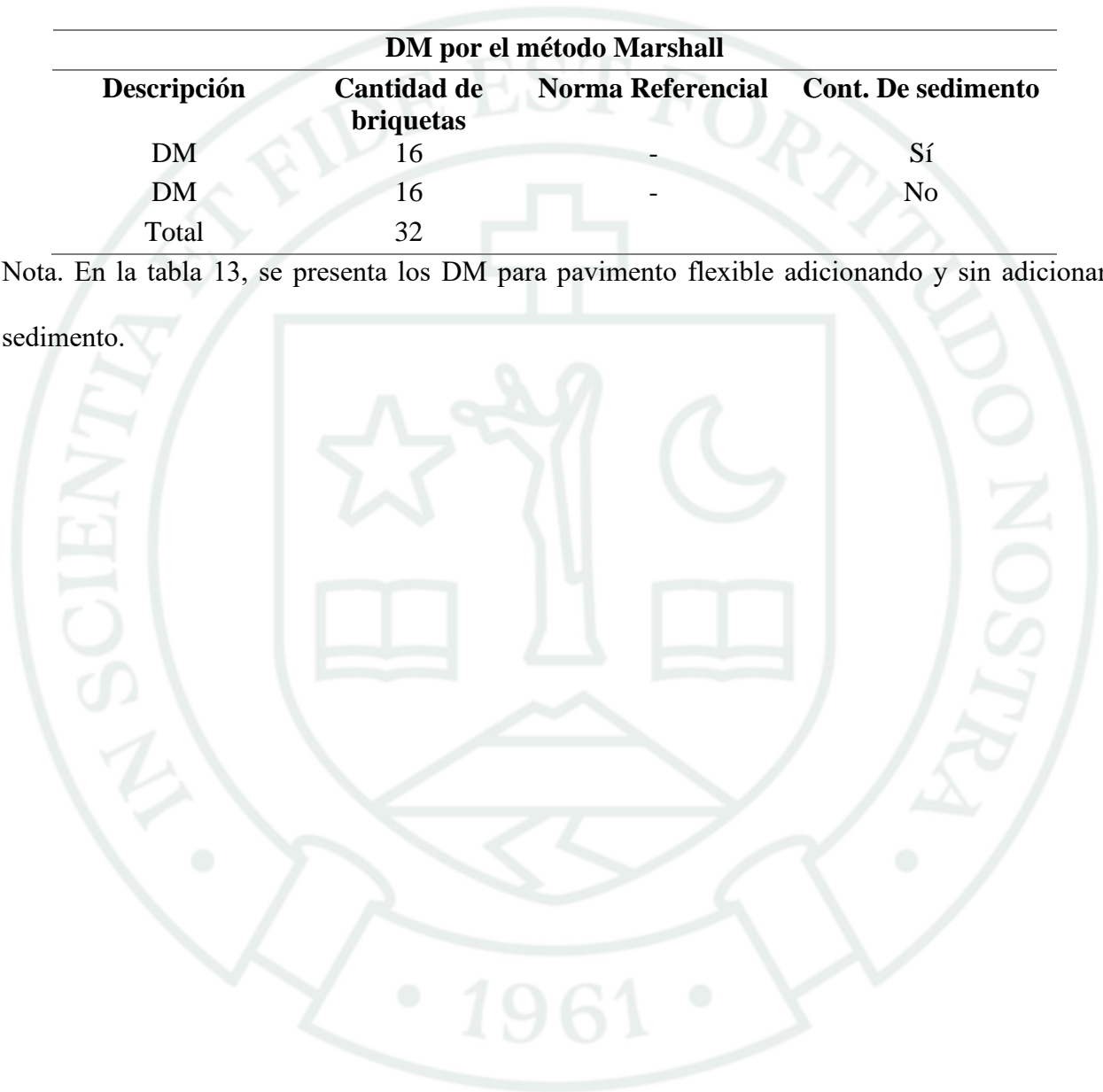
Diseño de mezclas por el método Marshall

Tabla 13

Diseños de mezcla para pavimento flexible

DM por el método Marshall			
Descripción	Cantidad de briquetas	Norma Referencial	Cont. De sedimento
DM	16	-	Sí
DM	16	-	No
Total	32		

Nota. En la tabla 13, se presenta los DM para pavimento flexible adicionando y sin adicionar sedimento.





CAPÍTULO IV
DESARROLLO

Ubicación de la muestra

Suelo

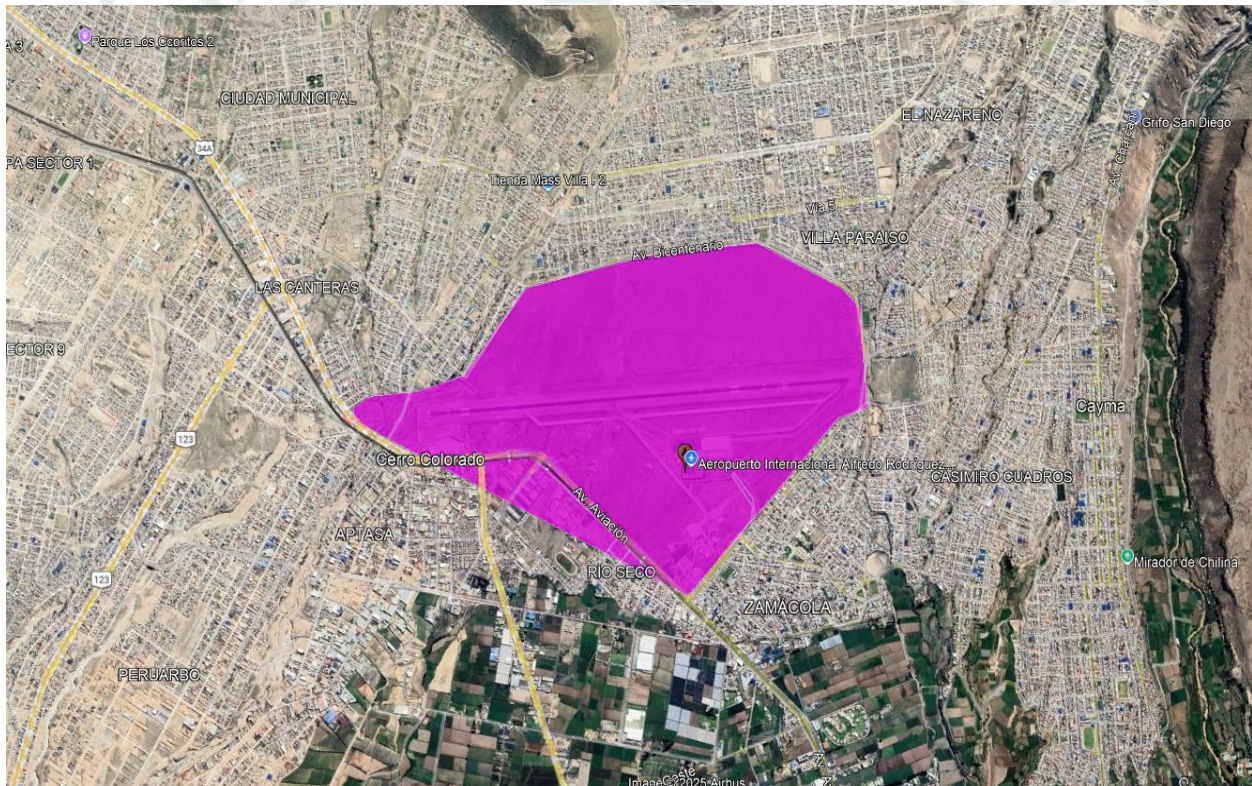
Zona: 19 K

Coordenada Este: 225466.69 m E

Coordenada Norte: 8191542.33 m S

Figura 5

Ubicación del muestreo de suelos (Aeropuerto Internacional Alfredo Rodríguez Ballón)



Nota. En la figura 5, se identifica la ubicación del sitio del cual se hicieron las calicatas y se extrajeron las muestras de sus estratos representativos, C2E2, C4E2 y C6E2. Fuente: Google Earth

Lodo

Muestra la ubicación de la PTAP “Miguel de la Cuba Ibarra” a cargo de SEDAPAR, cuyas coordenadas son los siguientes:

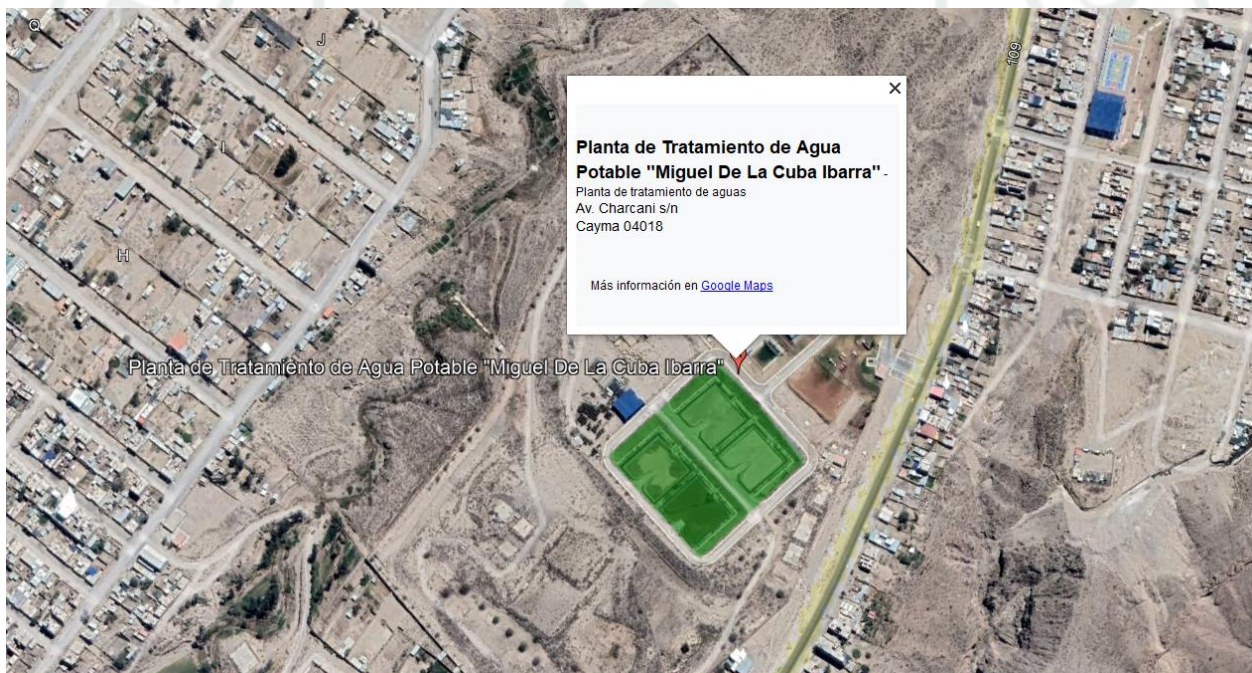
Zona: 19 K

Coordenada Este: 229654.41 m E

Coordenada Norte: 8194331.86 m S

Figura 6

Ubicación de PTAP



Nota. En la figura 6, se observa la ubicación de la PTAP. Fuente: Google Earth

Extracción de la muestra

Suelo

Conforme a los lineamientos establecidos en el “Manual de Ensayo de Materiales (MEM)” del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), específicamente el MTC E 101: Muestreo de Suelos y Rocas, se realizó el muestreo del suelo natural encontrado en el Aeropuerto Internacional Alfredo Rodríguez Ballón, se realizaron tres calicatas (C2, C4 y C6) de los cuales se obtuvo la muestra representativa del estrato de mayor cantidad, teniendo las siguientes codificaciones C2E2, C4E2 y C6E2, ubicada en el distrito de Cerro Colorado, Arequipa. La recolección de la muestra se efectuó el 2 de junio de 2025, a las 21:15 horas, bajo condiciones ambientales controladas.

Lodo

Conforme a los lineamientos establecidos en el MEM del MTC, específicamente el MTC E 101: Muestreo de Suelos y Rocas, se realizó el muestreo de lodos sedimentados en una poza de sedimentación perteneciente a la PTAP "Miguel de la Cuba Ibarra", ubicada en el distrito de Cayma, Arequipa. La recolección de la muestra se efectuó el 5 de junio de 2024, a las 09:21 horas, bajo condiciones ambientales controladas. El pH registrado fue de 7,12 y la temperatura del medio 12°C. Estos parámetros iniciales fueron medidos in situ, garantizando la precisión y representatividad de la muestra para los posteriores.

Figura 7

Pozas de sedimentación PTAP Miguel de la Cuba Ibarra



Nota. En la figura 7, se ilustra la poza de sedimentación del PTAP Miguel de la Cuba Ibarra



CAPÍTULO V

RESULTADOS

Estabilización Del Suelo Con Lodos De Tratamiento De Agua Potable

Ensayos Físicos

Suelos

Análisis Granulométrico por tamizado

Análisis Granulométrico por tamizado de C2-E2

Tabla 14

Análisis granulométrico de C2- E2

Tamiz	Abertura (mm)	Peso Ret. (g)	% Ret.	% Ret. Acum.	%Pas. Acum.
1"	50.00		0.0%	0.0%	100.0%
¾"	37.50		0.0%	0.0%	100.0%
½"	25.00	17.90	0.6%	0.6%	99.4%
⅜"	19.00	13.20	0.4%	1.1%	98.9%
#4	9.50	65.20	2.2%	3.3%	96.7%
#10	4.75	129.06	4.4%	7.7%	92.3%
#20	0.85	262.29	8.9%	16.6%	83.4%
#40	1.19	549.56	18.7%	35.3%	64.7%
#60	0.43	532.90	18.2%	53.5%	46.5%
#100	0.15	428.82	14.6%	68.1%	31.9%
#200	0.18	362.02	12.3%	80.4%	19.6%
<#200	0.08	574.35	19.6%	100.0%	0.0%
Total		2935.30	100.0%		

Nota. En la tabla 14, se presenta los resultados de C2-E2 para poder visualizar su composición física del suelo.

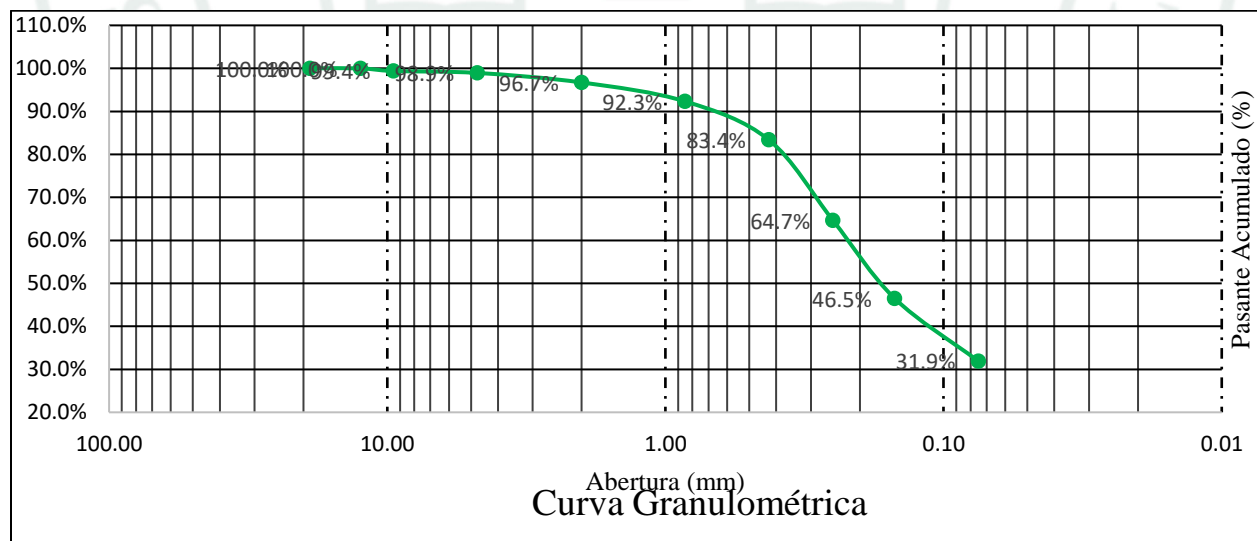
Tabla 15

Clasificación visual y manual de C2- E2

Clasificación Visual Manual	
Tamiz separador:	#4
Método de Tamizado:	Seco
Resultado de Ensayos	
Humedad Natural:	4.9
Límite Líquido:	NP
Límite Plástico:	NP
Índice de Plasticidad	NP
Composición Física del Suelo en Función al Tamaño de Partículas	
Grava (N°4 < ϕ < 3''):	1.10%
Arena (N°200 < ϕ < N°4):	79.40%
Filler (ϕ < N°200):	19.60%
Clasificación	
AASHTO:	A-2-4(0)
SUCS:	SM

Figura 8

Curva granulométrica de C2 - E 2



Nota. La figura 8, detalla la curva granulométrica del suelo C2 - E2, la cual presenta mayor cantidad de arena en un 79.40% y una menor cantidad de filler en un 19.60% y grava en un 1.10%.

Análisis Granulométrico por tamizado de C4-E2

Tabla 16

Análisis granulométrico de C4 - E2

Tamiz	Abertura (mm)	Peso Ret. (g)	% Ret.o	% Ret. Acum.	%Pas. Acum.
1 ½"	37.5	535.90	7.7%	7.7%	92.3%
1"	50.00	225.10	3.2%	10.9%	89.1%
¾"	37.50	211.90	3.0%	13.9%	86.1%
½"	25.00	376.30	5.4%	19.3%	80.7%
⅜"	19.00	251.90	3.6%	22.9%	77.1%
#4	9.50	735.70	10.5%	33.4%	66.6%
#10	4.75	695.03	9.9%	43.4%	56.6%
#20	0.85	925.27	13.2%	56.6%	43.4%
#40	1.19	837.57	12.0%	68.6%	31.4%
#60	0.43	680.16	9.7%	78.4%	21.6%
#100	0.15	587.20	8.4%	86.8%	13.2%
#200	0.18	423.90	6.1%	92.8%	7.2%
<#200	0.08	501.37	7.2%	100.0%	0.0%
Total		6987.30	100.0%		

Nota. La tabla 16, presenta el análisis granulométrico de C4-E2 para poder visualizar su composición física del suelo.

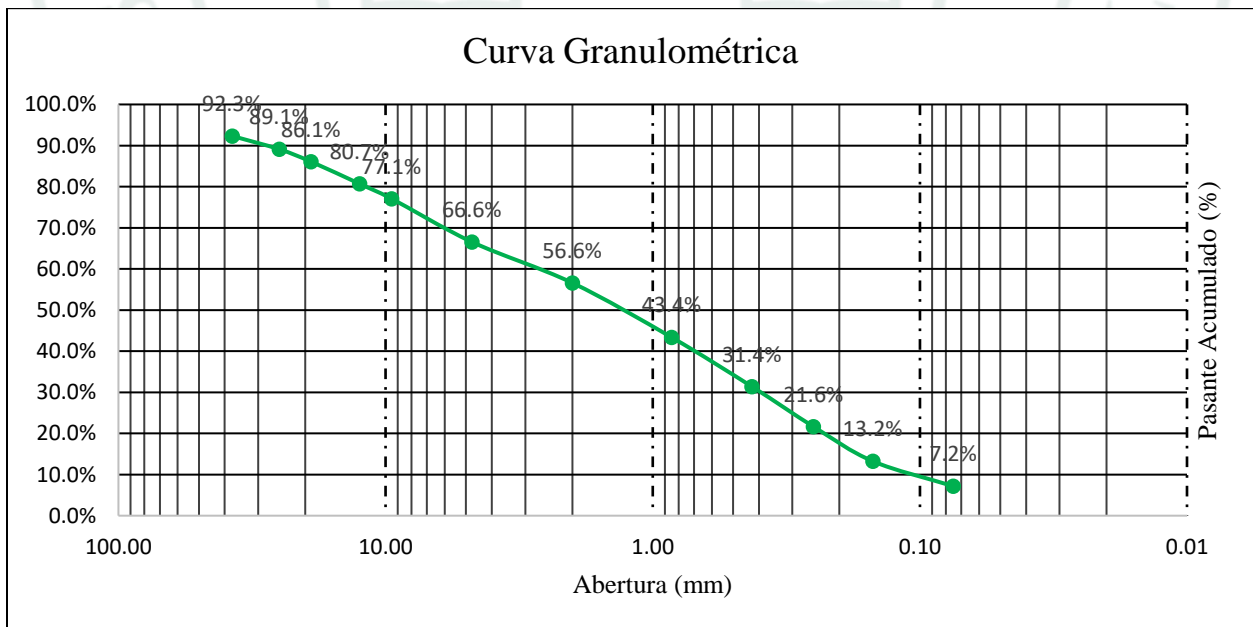
Tabla 17

Clasificación visual y manual de C4- E2

Clasificación Visual Manual	
Tamiz separador:	#4
Método de Tamizado:	Seco
Resultado de Ensayos	
Humedad Natural:	2.9
Límite Líquido:	NP
Límite Plástico:	NP
Índice de Plasticidad	NP
Composición Física del Suelo en Función al Tamaño de Partículas	
Grava (N°4 < ϕ < 3'') :	22.92%
Arena (N°200 < ϕ < N°4):	69.90%
Filler (ϕ < N°200):	7.18%
Clasificación	
AASHTO:	A-1-b(0)
SUCS:	SP-SM

Figura 9

Curva granulométrica de C4- E2



Nota. La figura 9, ilustra la curva granulométrica del suelo C4 - E2, la cual presenta mayor cantidad de arena en un 69.90% y una menor cantidad de grava en un 22.92% y filler en un 7.18%.

Análisis Granulométrico por tamizado de C6-E2

Tabla 18

Análisis granulométrico de C6 - E2

Tamiz	Abertura (mm)	Peso Ret. (g)	% Ret.	% Ret. Acum.	%Pas. Acum.
2"	50	331.50	5.4%	5.4%	94.6%
1 ½"	37.5	272.60	4.5%	9.9%	90.1%
1"	50.00	35.10	0.6%	10.5%	89.5%
¾"	37.50	29.30	0.5%	11.0%	89.0%
½"	25.00	116.60	1.9%	12.9%	87.1%
⅜"	19.00	125.80	2.1%	15.0%	85.0%
#4	9.50	274.10	4.5%	19.5%	80.5%
#10	4.75	341.04	5.6%	25.1%	74.9%
#20	0.85	572.98	9.4%	34.5%	65.5%
#40	1.19	661.18	10.9%	45.3%	54.7%
#60	0.43	664.12	10.9%	56.2%	43.8%
#100	0.15	922.19	15.1%	71.4%	28.6%
#200	0.18	729.13	12.0%	83.3%	16.7%
<#200	0.08	1014.96	16.7%	100.0%	0.0%
Total		6090.60	100.0%		

Nota: La tabla 18, presenta el análisis granulométrico de C6-E2 para poder visualizar su composición física del suelo.

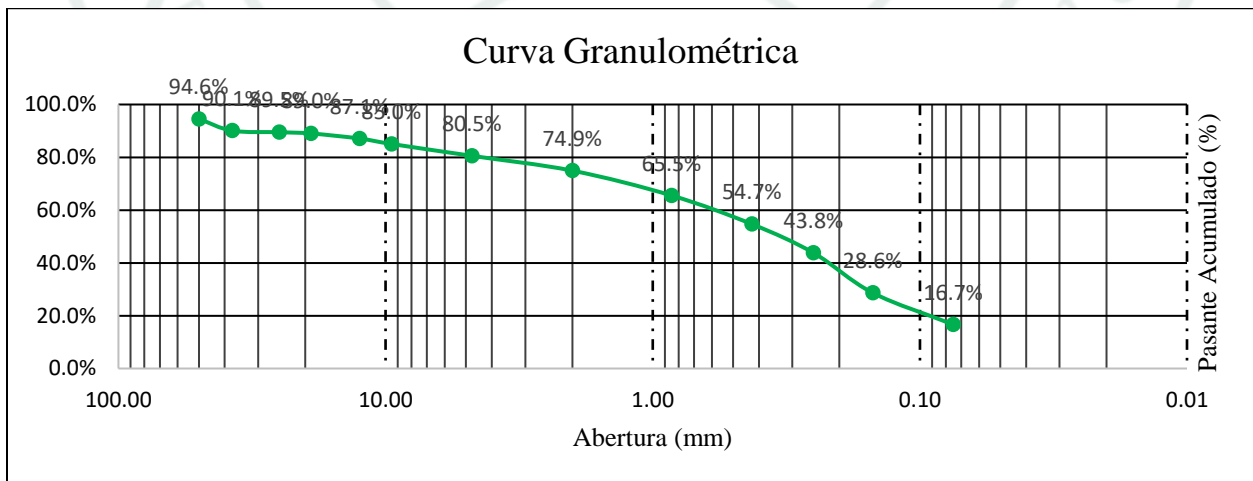
Tabla 19

Clasificación visual y manual de C6- E2

Clasificación Visual Manual	
Tamiz separador:	#4
Método de Tamizado:	Seco
Resultado de Ensayos	
Humedad Natural:	4.6
Límite Líquido:	NP
Límite Plástico:	NP
Índice de Plasticidad	NP
Composición Física del Suelo en Función al Tamaño de Partículas	
Grava ($N^{\circ}4 < \phi < 3''$):	14.96%
Arena ($N^{\circ}200 < \phi < N^{\circ}4$):	68.38%
Filler ($\phi < N^{\circ}200$):	16.66%
Clasificación	
AASHTO:	A-2-4(0)
SUCS:	SM

Figura 10

Curva granulométrica de C6-E2



Nota. La figura 10, ilustra la curva granulométrica del suelo C6 - E2, la cual presenta mayor cantidad de arena en un 68.38% y una menor cantidad de filler en un 16.66% y grava en un 14.96%.

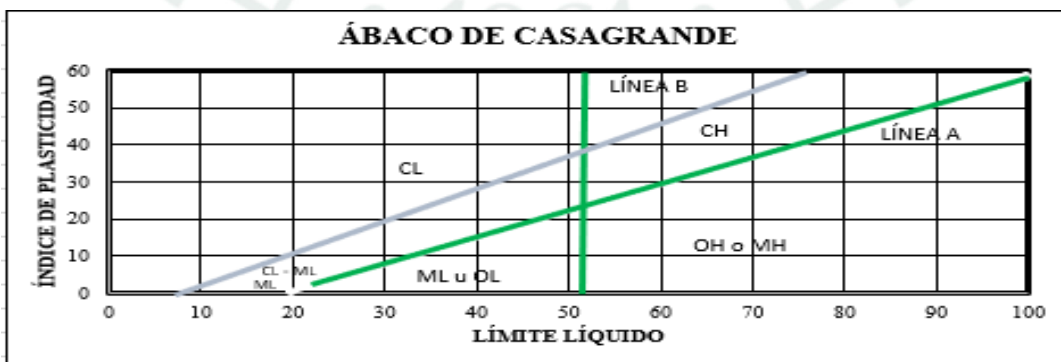
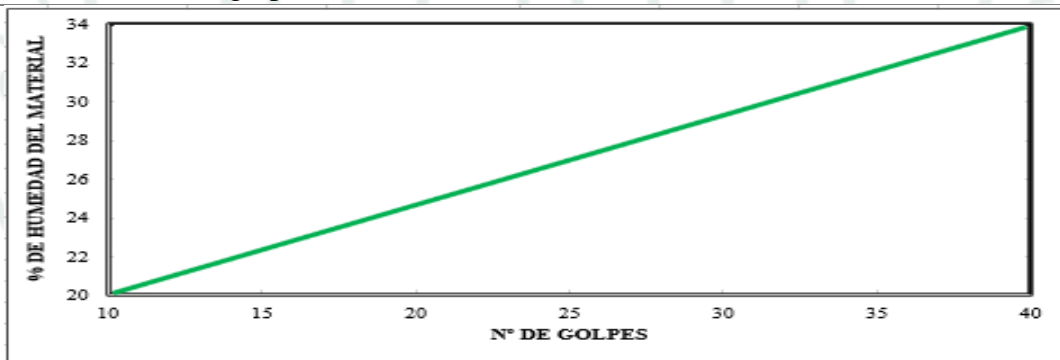
Índice de plasticidad

Índice de plasticidad de C2-E2

Tabla 20

Índices de plasticidad de C2-E2

	LÍMITE LÍQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO
n° de cápsula		
masa tara + suelo húmedo (a)		
masa tara + suelo seco (b)		
masa de la tara (c)		
masa del agua (a-b)	NP	NP
masa suelo seco (b-c)		
humedad ($w=(a-b)/(b-c)*100$)		
n° de golpes		



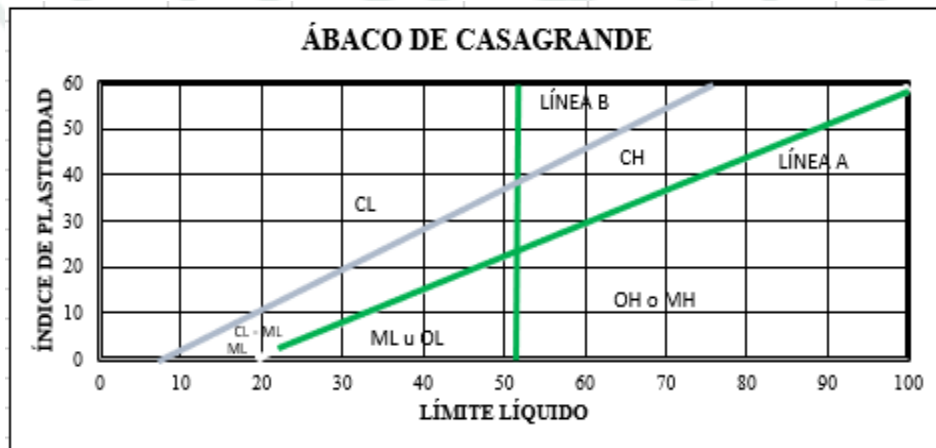
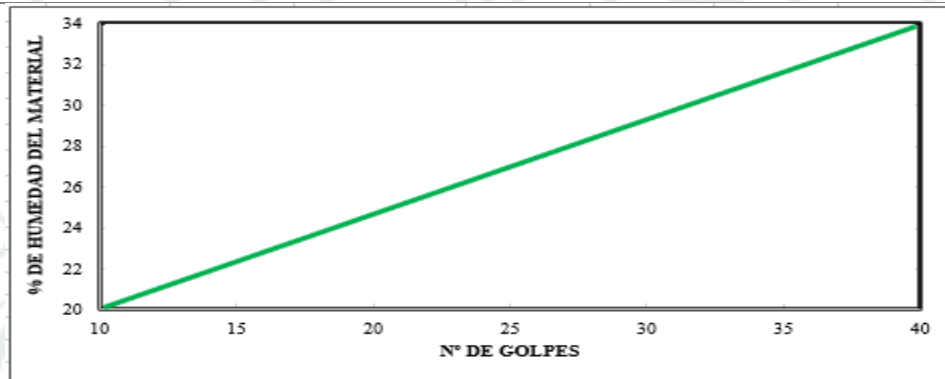
Nota. La tabla 20, detalla los valores de Índice de plasticidad realizado según el MEM del MTC para C2-E2.

Índice de plasticidad de C4-E2

Tabla 21

Índices de plasticidad de C4-E2

	LÍMITE LÍQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO
n° de cápsula		
masa tara + suelo húmedo (a)		
masa tara + suelo seco (b)		
masa de la tara (c)		
masa del agua (a-b)	NP	NP
masa suelo seco (b-c)		
humedad ($w=(a-b)/(b-c)*100$)		
n° de golpes		

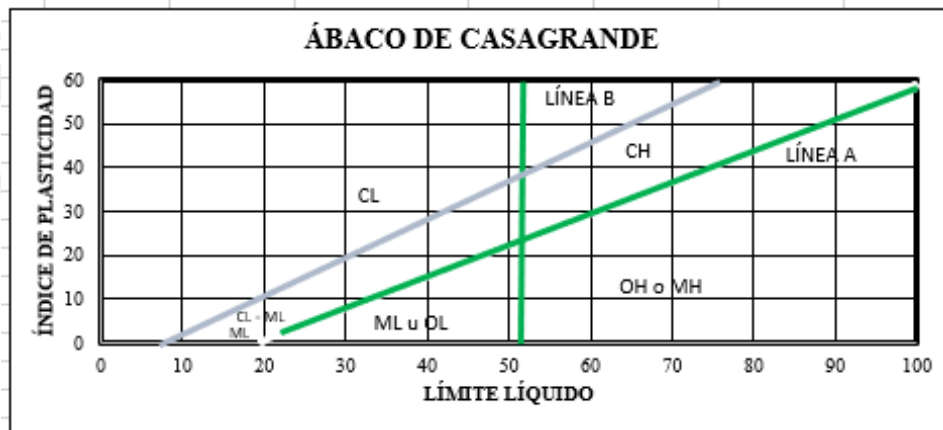
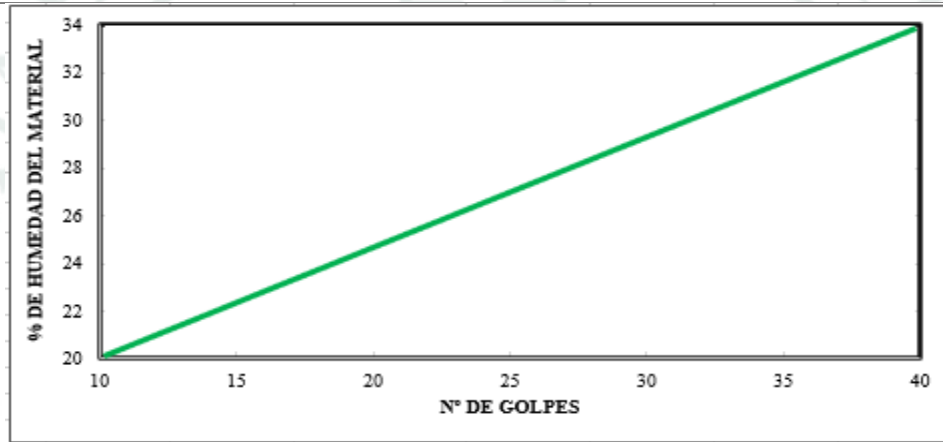


Índice de plasticidad de C6-E2

Tabla 22

Índices de plasticidad de C6-E2

	LÍMITE LÍQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO
n° de cápsula		
masa tara + suelo húmedo (a)		
masa tara + suelo seco (b)		
masa de la tara (c)	NP	NP
masa del agua (a-b)		
masa suelo seco (b-c)		
humedad ($w=(a-b)/(b-c)*100$)		



Nota. La tabla 22, detalla los datos y valores del ensayo de Índice de plasticidad realizado según el MEM del MTC para C6-E2.

Contenido de humedad

Contenido de humedad de C2-E2

Tabla 23

Contenido de humedad de C2-E2

1	Recipiente N°	A1	A2	A3
2	Masa suelo húmedo + masa recipiente (g)	3354.4	3356.1	3355.4
3	Masa suelo seco + masa recipiente (g)	3211.2	3212.3	3211.7
4	Masa de agua (g) (1-2)	143.2	143.8	143.7
5	Masa del recipiente (g)	275.1	275.1	275.1
6	Suelo Seco (g) (3-5)	2936.1	2937.2	2936.6
7	% de humedad	4.9	4.9	4.9
	PROM.		4.9	

Nota. La tabla 23, detalla los datos y valores obtenidos del ensayo de contenido de humedad para C2 - E2 realizado según el MEM del MTC.

Contenido de humedad de C4-E2

Tabla 24

Contenido de humedad de C4-E2

1	Recipiente N°	A1	A2	A3
2	Masa suelo húmedo + masa recipiente (g)	7701.7	7702.1	7701.3
3	Masa suelo seco + masa recipiente (g)	7498.1	7501.2	7500.7
4	Masa de agua (g) (1-2)	203.6	200.9	200.6
5	Masa del recipiente (g)	509.8	509.8	509.8
6	Suelo Seco (g) (3-5)	6988.3	6991.4	6990.9
7	% de humedad	2.9	2.9	2.9
	PROM.		2.9	

Nota. La tabla 24, muestra los datos y valores obtenidos del ensayo de contenido de humedad para C4 - E2 realizado según el MEM del MTC.

Contenido de humedad de C6-E2

Tabla 25

Contenido de humedad de C6-E2

1	Recipiente N°	A1	A2	A3
2	Masa suelo húmedo + masa recipiente (g)	6646.5	6647.1	6647.3
3	Masa suelo seco + masa recipiente (g)	6367.5	6363.1	6365.1
4	Masa de agua (g) (1-2)	279	284	282.2
5	Masa del recipiente (g)	276.3	276.3	276.3
6	Suelo Seco (g) (3-5)	6091.2	6086.8	6088.8
7	% de humedad	4.6	4.7	4.6
	PROM.		4.6	

Nota. La tabla 25, muestra los datos y valores obtenidos del ensayo de contenido de humedad para C2 - E2 realizado según el MEM del MTC.

Contenido de sales solubles, cloruros solubles y sulfatos solubles

Contenido de sales solubles, cloruros solubles y sulfatos solubles de C2-E2

Tabla 26

Contenido de sales solubles de C2-E2

Sales Solubles	
Descripción	Muestra 1
Peso de muestra (g)	100
P. de vaso de precipitado (g)	207.31
V. de agua (ml)	350
V. de Alícuota (ml)	100
Peso de vaso de precipitado + muestra (g)	207.36
Contenido de Sales Solubles (mg/kg)	1750
	0.18
	% de peso

Nota. La tabla 26, muestran los datos y valores obtenidos del ensayo para C2-E2.

Tabla 27*Contenido de Cloruros Solubles de C2 - E2*

Cantidad de Cloruros Solubles en la muestra	
Descripción	Muestra 1
V. de AgNO ₃ para la muestra (ml)	0.8
V. de alicuota (ml)	30
V. de agua destilada en solución (ml)	350
Peso de muestra (g)	100
Peso de muestra en alicuota (g)	8.571428571
D (g)	3.5
Contenido de Cloruros Solubles (g)	134.61525
	0.01 % de peso

Nota. La tabla 27, detalla los datos y valores obtenidos del ensayo de contenido de cloruros solubles para C2-E2 realizado según el MEM del MTC.

Tabla 28*Contenido de sulfatos solubles de C2-E2*

Contenido de Sulfatos Solubles	
Descripción	Muestra 1
Peso crisol (g)	30.27
Peso crisol + muestra (g)	30.28
Peso de alicuota (ml)	30
Peso de Ba SO ₄ (g)	0.0147
Volumen de agua en solución (ml)	350
Peso de muestra (g)	100
Peso de muestra en alicuota (g)	8.6
Contenido de Sulfatos Solubles	705.7
	0.07 % de peso

Nota. La tabla 28, detalla los datos y valores obtenidos del ensayo de contenido de sulfatos solubles para C2-E2 realizado según el MEM del MTC.

Contenido de sales solubles, cloruros solubles y sulfatos solubles de C4-E2

Tabla 29

Contenido de sales solubles de C4-E2

Contenido de Sales Solubles	
Descripción	Muestra 1
Peso de muestra (g)	100
Peso de vaso de precipitado (g)	207.33
Volúmen de agua (ml)	350
Volumen de Alicuota (ml)	100
Peso de vaso de precipitado + muestra (g)	207.38
Contenido de Sales Solubles (mg/kg)	1750
	0.17
	% de peso

Nota. La tabla 29, detalla los datos y valores obtenidos del ensayo de sales solubles totales para C4-E2 realizado según el MEM del MTC.

Tabla 30

Contenido de Cloruros Solubles de C4 - E2

Cantidad de Cloruros Solubles	
Descripción	Muestra 1
Volumen de AgNO ₃ para la muestra (ml)	0.7
Volumen de alícuota (ml)	30
Volumen de agua destilada en solución (ml)	350
P. de muestra (g)	100
P. de muestra en alícuota (g)	8.6
D (g)	3.5
Contenido de Cloruros Solubles (g)	89.7
	0.01
	% de peso

Nota. La tabla 30, detalla los datos y valores obtenidos del ensayo de contenido de cloruros solubles para C4-E2 realizado según el MEM del MTC.

Tabla 31*Contenido de sulfatos solubles de C4-E2*

Contenido de Sulfatos Solubles		
Descripción	Muestra 1	
Peso crisol (g)	92.1225	
Peso crisol + muestra (g)	92.1431	
Peso de alícuota (ml)	30	
Peso de Ba SO ₄ (g)	0.0206	
Volumen de agua en solución (ml)	350	
P. de muestra (g)	100	
P. de muestra en alícuota (g)	8.6	
Contenido de Sulfatos Solubles	989.0	
	0.10	% de peso

Nota. La tabla 31, detalla los datos y valores obtenidos del ensayo de contenido de sulfatos solubles para C4-E2 realizado según el MEM del MTC.

Contenido de sales solubles, cloruros solubles y sulfatos solubles de C6-E2

Tabla 32*Contenido de sales solubles de C6-E2*

Contenido de Sales Solubles		
Descripción	Muestra 1	
P. de muestra (g)	100	
P. de vaso de precipitado (g)	201.71	
V. de agua (ml)	350	
V. de alícuota (ml)	100	
P. de vaso de precipitado + muestra (g)	201.76	
Cont. de Sales Solubles (mg/kg)	1750	
	0.17	% de peso

Nota. La tabla 32, detalla los datos y valores obtenidos del ensayo de sales solubles totales para C6-E2 realizado según el MEM del MTC.

Tabla 33*Contenido de Cloruros Solubles de C6 - E2*

Contenido de Cloruros Solubles	
Descripción	Muestra 1
V. de AgNO ₃ para la muestra (ml)	0.7
V. de alicuota (ml)	30
V. de agua destilada en solución (ml)	350
P. de muestra (g)	100
P. de muestra en alicuota (g)	8.6
D (g)	3.5
Cont. de Cloruros Solubles (g)	89.7
	0.01
	% de peso

Nota. La tabla 33, detalla los datos y valores obtenidos del ensayo de contenido de cloruros solubles para C6-E2 realizado según el MEM del MTC.

Tabla 34*Contenido de sulfatos solubles de C6-E2*

Contenido de Sulfatos Solubles	
Descripción	Muestra 1
P. crisol (g)	77.9895
P. crisol + muestra (g)	77.9986
P. de alicuota (ml)	30
P. de Ba SO ₄ (g)	0.0091
V. de agua en solución (ml)	350
P. de muestra (g)	100
P. de muestra en alicuota (g)	8.6
Cont. de Sulfatos Solubles	436.9
	0.04
	% de peso

Nota. La tabla 34, detalla los datos y valores obtenidos del ensayo de contenido de sulfatos solubles para C6-E2 realizado según el MEM del MTC.

Gravedad específica de sólidos de suelo mediante picnómetro de agua

Gravedad específica de sólidos de suelo mediante picnómetro de agua de

C2-E2

Tabla 35

Ensayo estándar para la gravedad específica de sólidos de C2-E2

Muestra	1	2	
Temperatura (°C)	20.0	20.0	
p. de la muestra SSS (neto) (g)	100.00	100.00	
p. de fiola + agua + muestra SSS (g)	714.26	713.32	
p. calibrada de fiola + agua (g)	656.55	655.14	
p. de recipiente (g)	201.96	220.74	
p. de recipiente + muestra seca (g)	301.48	320.30	
Peso específico saturado superficialmente seco (g)	2.36	2.39	2.38
Peso específico de masa (g)	2.35	2.38	2.37
Peso específico aparente (g)	2.38	2.41	2.39

Nota. La tabla 35, presenta los resultados del ensayo para C2-E2.

Gravedad específica de sólidos de suelo mediante picnómetro de agua de

C4-E2

Tabla 36

Ensayo estándar para la gravedad específica de sólidos de C4-E2

Muestra	1	2	
Temperatura (°C)	20.0	20.0	
p. de la muestra SSS (neto) (g)	100.00	100.00	
p. de fiola + agua + muestra SSS (g)	716.41	715.13	
p. calibrada de fiola + agua (g)	656.55	655.14	
p. de recipiente (g)	208.95	216.80	
p. de recipiente + muestra seca (g)	308.60	316.41	
Peso específico saturado superficialmente seco (g)	2.49	2.50	2.50

Peso específico de masa (g)	2.48	2.49	2.49
Peso específico aparente (g)	2.50	2.51	2.51

Nota. La tabla 36, presenta los valores obtenidos del ensayo para C4-E2.

***Gravedad específica de sólidos de suelo mediante picnómetro de agua de
C6-E2***

Tabla 37

Ensayo estándar para la gravedad específica de sólidos de C6-E2

Muestra	1	2	
Temperatura (°C)	20.0	20.0	
p. de la muestra SSS (neto) (g)	100.00	100.00	
p. de fiola + agua + muestra SSS (g)	714.23	712.95	
p. calibrada de fiola + agua (g)	656.55	655.14	
p. de recipiente (g)	222.01	219.80	
p. de recipiente + muestra seca (g)	321.82	312.84	
Peso específico saturado superficialmente seco (g)	2.36	2.37	2.37
Peso específico de masa (g)	2.36	2.21	2.28
Peso específico aparente (g)	2.37	2.64	2.51

Nota. La tabla 37, presenta los valores obtenidos del ensayo para C6-E2.

Lodos

Análisis granulométrico por tamizado

Tabla 38

Análisis granulométrico de lodo

Tamiz	Abertura (mm)	P. Ret. (g)	% Ret.	% Ret. Acum.	%Pas. Acum.
1"	50.000		0.0%	0.0%	100.0%
¾"	37.500		0.0%	0.0%	100.0%
½"	25.000	0.00	0.0%	0.0%	100.0%
⅜"	19.000	0.00	0.0%	0.0%	100.0%
#4	4.760	23.31	3.8%	3.8%	96.2%
#10	2.000	17.04	2.8%	6.6%	93.4%
#20	0.840	32.02	5.2%	11.9%	88.1%
#40	0.425	126.10	20.7%	32.5%	67.5%
#60	0.260	155.70	25.5%	58.0%	42.0%
#200	0.075	169.12	27.7%	85.7%	14.3%
<#200	0.000	87.12	14.3%	100.0%	0.0%
Total		610.41	100.0%		

Nota. La tabla 38, muestra el análisis granulométrico del LPTAP.

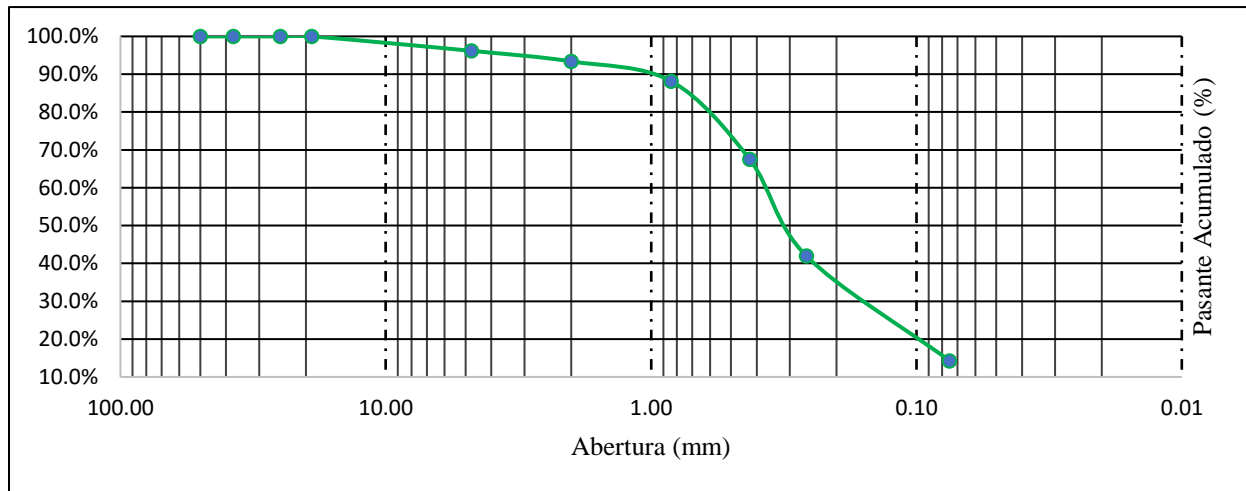
Tabla 39*Clasificación Visual y manual de lodo*

Clasificación Visual Manual	
Nota:	
Nivel Freático:	NO
Tamizado Compuesto:	SÍ
Tamiz separador:	#4
Método de Tamizado:	Manual
Resultado de Ensayos	
Humedad Natural:	1,4
Límite Líquido:	2
Límite Plástico:	2
Índice de Plasticidad	0
Composición Física del Suelo en Función al Tamaño de Partículas	
Grava ($N^{\circ}4 < \phi < 3''$):	0.00%
Arena ($N^{\circ}200 < \phi < N^{\circ}4$):	85.73%
Filler ($\phi < N^{\circ}200$):	14.27%
Clasificación	
AASHTO:	A-2-4(0)
SUCS:	SC
NOMBRE DEL GRUPO:	A2

Nota. La tabla 39, muestra la clasificación del lodo residual proveniente del tratamiento de agua potable, siendo A-2-4(0) según la clasificación AASHTO, lo cual representa un suelo granular con poco contenido de limo o arcilla, al tener el índice de plasticidad de 0, indica que el suelo puede ser un material de buena calidad para subrasante y subbase. Asimismo, se tiene un suelo SC según la clasificación SUCS el cual representa a un suelo arenoso con una cantidad de finos arcillosos, pueden usarse para subrasante siempre y cuando se tenga un CBR aceptable.

Figura 11

Curva granulométrica de lodo



Nota. La figura 11, ilustra la curva granulométrica del lodo, la cual presenta mayor cantidad de arena en un 85.73% y una menor cantidad de filler en un 14.27%.

Contenido de humedad

Tabla 40

Contenido de humedad de lodo

1	Recipiente	AA	AB	AC
2	p. suelo húmedo + masa recipiente (g)	425.60	420.10	428.30
3	p. suelo seco + masa recipiente (g)	420.90	416.10	424.13
4	p. de agua (g) (1-2)	4.70	4.00	4.17
5	p. del recipiente (g)	71.62	68.90	72.13
6	Suelo Seco (g) (3-5)	349.28	347.20	352.00
7	% de humedad	1.3	1.2	1.2

1.2

Nota. La tabla 40, muestra el contenido de humedad del lodo residual proveniente del tratamiento de agua potable, siendo este de 1.2%.

Índice plástico

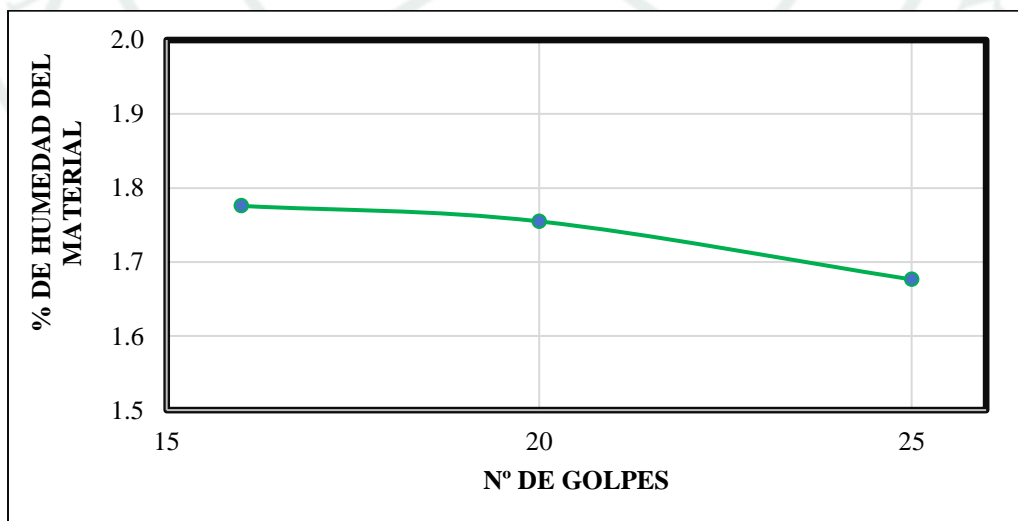
Tabla 41

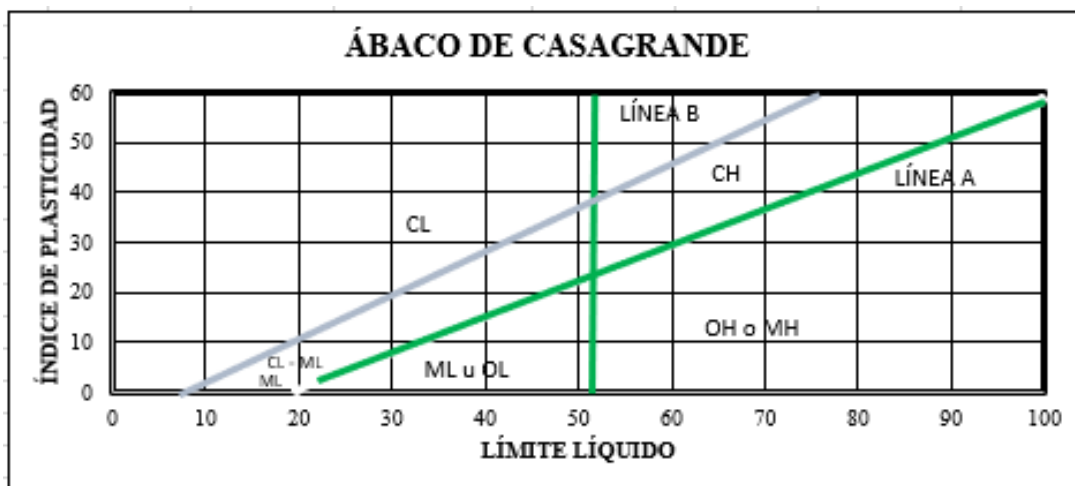
Índices de plasticidad de lodo

	LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO	
	N1	N2	N3	N1	N2
n° de cápsula					
p. tara + suelo húmedo (a)	310.04	312.65	325.13	9.45	9.39
p. tara + suelo seco (b)	305.34	307.95	320.43	9.41	9.36
p. de la tara (c)	40.69	40.14	40.09	7.02	7.06
p. del agua (a-b)	4.70	4.70	4.70	0.04	0.03
p. suelo seco (b-c)	264.65	267.81	280.34	2.39	2.30
humedad ($w=(a-b)/(b-c)*100$)	1.8	1.8	1.7	2	1
n° de golpes	16	20	25	2	

LÍMITE LÍQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO	ÍNDICE PLÁSTICO
2	2	0

Nota. La tabla 41, muestra el índice de plasticidad del lodo residual proveniente del tratamiento de agua potable, siendo 0 su resultado final.





Gravedad específica de LPTAP.

Tabla 42

Gravedad específica de sólidos de lodo

Muestra	1	2	
Temperatura (°C)	20	20	
p. de la muestra SSS (neto) (g)	101.30	100.67	
p. de fiola + agua + muestra SSS (g)	715.82	696.91	
p. calibrada de fiola + agua (g)	649.28	649.28	
p. de recipiente (g)	219.80	219.80	
p. de recipiente + muestra seca (g)	315.57	312.84	
Peso específico saturado superficialmente seco (g)	2.91	1.90	2.41
Peso específico de masa (g)	2.76	1.75	2.25
Peso específico aparente (g)	3.28	2.05	2.66

Nota. La tabla 42, muestra los valores obtenidos del ensayo estándar para LPTAP.

Ensayos Mecánicos

Proctor Suelo natural

Proctor Suelo Natural de C2-E2

Tabla 43

Características de la muestra C2-E2 para el ensayo de Proctor

I. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA			
1	% retenido acumulado en tamiz Nro. 3/4"	0.01%	0.00
2	% retenido acumulado en tamiz 3/8"	0.01%	1.06
3	% retenido acumulado en tamiz Nro. 4	0.01%	3.28
4	Clasificación SUCS de suelo	-	SM
5	Tiempo de curado	1h	3.00
6	Procedimiento de ensayo a realizar	-	A
7	Diámetro nominal del molde	1pilg	4
8	Tipo de pisón	-	Manual
9	Peso nominal de pisón	0.01kg	4.54
10	Altura nominal de caída de pisón	0.001m	0.4572

Nota. En la tabla 43, se detalla las características principales de la muestra y consideraciones para el ensayo de Proctor de C2-E2.

Tabla 44

Compactación y determinación de densidad húmeda de C2-E2

II. COMPACTACION Y DETERMINACION DE LA DENSIDAD HUMEDA DE LA FRACCION DE ENSAYO					
N°	Parámetro	Especímenes			
		#1	#2	#3	#4
1	Código de molde	A	A	A	A
2	Volumen de molde calibrado (cm ³)	947	947	947	947
3	Nro. De capas	5	5	5	5
4	Nro. De golpes	25	25	25	25
5	P. de suelo compactado + molde(g)	5470	5520	5548	5576
6	P. de molde (g)	3816	3816	3816	3816
7	P. del suelo compactado (g)	1654	1704	1732	1760
8	Densidad húmeda (g/cm ³)	1.75	1.80	1.83	1.86

Nota. En la tabla 44, se detalla los datos de la compactación y la determinación de la densidad húmeda de C2-E2.

Tabla 45

Determinación de la humedad y densidad de C2-E2

III. DETERMINACION DE HUMEDAD Y DENSIDAD SECA						
1	Peso del recipiente	0.1g	46.8	45.4	64.6	46.9
2	Peso del material húmedo + recipiente	0.1g	325.8	277.8	259.3	237
3	Peso de material seco + recipiente	0.1g	299	251.3	235.2	209.5
4	Peso del agua	0.1g	26.8	26.5	24.1	27.5
5	Peso del material seco	0.1g	252.2	205.9	170.6	162.6
6	Contenido de humedad	0.1g	10.6	12.9	14.1	16.9
7	Densidad seca	0.01g/cm ³	1.58	1.59	1.60	1.59
8	Peso unitario seco	0.1kN/m ³	15.5	15.6	15.7	15.6

Nota. En la tabla 45, se presenta los datos para el cálculo de la húmeda y densidad seca de C2-E2.

Tabla 46

Corrección del peso unitario y contenido de humedad de C2-E2

IV. corrección del P.U y C.H.		
Corrección por sobre medida	-	NO APLICA
% en peso de la fracción sobremedida	0.01%	-
% de humedad de la fracción sobre medida	0.1%	-
Gravedad específica de maso OD a 20°C de la fracción sobremedida	0.01	-
% en peso de la fracción de ensayo "Pf"	0.01%	-

Nota. En la tabla 46, se muestra los valores obtenidos para C2-E2.

Tabla 47*Datos de humedad optima - peso unitario seco - saturación de C2-E2*

V. CURVA HUMEDAD OPTIMA – P.U. SECO MAXIMO - SATURACION DE LA FRACCION DE ENSAYO			
1	Optimo cont. de humedad	0.1%	15.3
2	Peso unitario seco máximo	0.1kN/m ³	15.7
		0.01g/cm ³	1.60
3	Gravedad especifica aparente (Gs)	0.01	2.39
4	Densidad del agua (Yw)	0.1kN/m ³	9.81
		0.01g/cm ³	0.99821

Nota. En la tabla 47, se detalla los datos principales para la curva de humedad optima – peso unitario seco – saturación para C2-E2.

Tabla 48*Intervalos para cálculo de línea de saturación de C2-E2*

INTTervalos	
Yd min	15.5
Yd max	15.7
Intervalo	0.04

Nota. En la tabla 65, se muestra todos los intervalos del peso unitario seco máximo y mínimo con el cual se obtendrá el dato para poder realizar el caculo para las líneas de saturación de C2-E2.

Tabla 49*Cálculos para línea de saturación al 100% de C2-E2*

Yd (kN/m³)	Ys (kN/m³)	%Sr=100%	Yw (kN/m³)	%w
15.50	23.40	100	9.789	21.32
15.54	23.40	100	9.789	21.15
15.58	23.40	100	9.789	20.99
15.62	23.40	100	9.789	20.83
15.66	23.40	100	9.789	20.67
15.70	23.40	100	9.789	20.51
15.76	23.40	100	9.789	20.27

Nota. En la tabla 49, se detalla los datos con los cuales se graficará (% de húmedas vs. Peso unitario seco) la línea de saturación al 100% para C2-E2.

Tabla 50*Cálculos para línea de saturación al 80% de C2-E2*

Yd (kN/m3)	Ys (kN/m3)	%Sr=80%	Yw (kN/m3)	%w
15.50	23.40	80	9.789	17.05
15.54	23.40	80	9.789	16.92
15.58	23.40	80	9.789	16.79
15.62	23.40	80	9.789	16.67
15.66	23.40	80	9.789	16.54
15.70	23.40	80	9.789	16.41
15.76	23.40	80	9.789	16.22

Nota. En la tabla 50, se detalla los datos con los cuales se graficará (% de húmedas vs. Peso unitario seco) la línea de saturación al 80% para C2-E2.

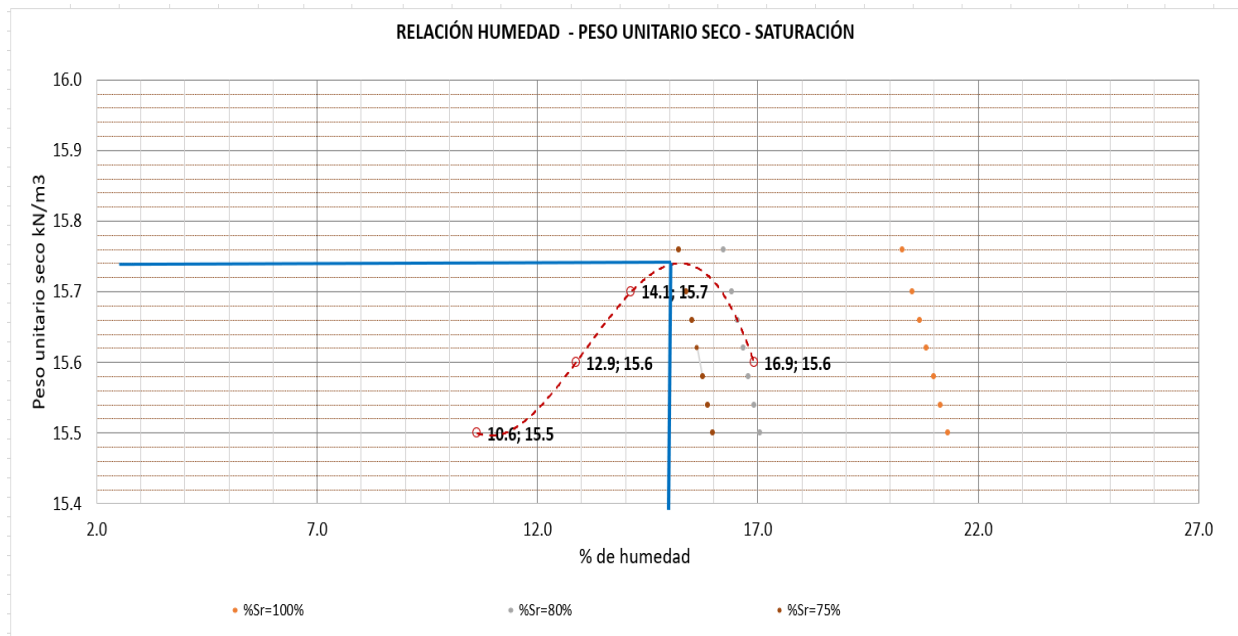
Tabla 51*Cálculos para línea de saturación al 75% de C2-E2*

Yd (kN/m3)	Ys (kN/m3)	%Sr=75%	Yw (kN/m3)	%w
15.50	23.40	75	9.789	15.99
15.54	23.40	75	9.789	15.87
15.58	23.40	75	9.789	15.74
15.62	23.40	75	9.789	15.62
15.66	23.40	75	9.789	15.50
15.70	23.40	75	9.789	15.38
15.76	23.40	75	9.789	15.21

Nota. En la tabla 51, se detalla los datos con los cuales se graficará (% de húmedas vs. Peso unitario seco) la línea de saturación al 75% para C2-E2.

Figura 12

Curva relación humedad - Peso unitario seco - Saturación de C2-E2



Nota. En la figura 12, se ilustra la curva de la relación entre el % de húmedas – peso unitario – saturación (75%, 80% y 100%) de C2-E2.

Proctor Suelo Natural de C4-E2

Tabla 52

Características de la muestra C4-E2 para el ensayo de Proctor

I. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA			
1	% retenido acumulado en tamiz Nro. 3/4"	0.01%	13.92
2	% retenido acumulado en tamiz 3/8"	0.01%	22.91
3	% retenido acumulado en tamiz Nro. 4	0.01%	33.44
4	Clasificación SUCS de suelo	-	SP - SM
5	Tiempo de curado	1h	3.00
6	Procedimiento de ensayo a realizar	-	C
7	Diámetro nominal del molde	1pilg	6
8	Tipo de pisón	-	Manual
9	Peso nominal de pisón	0.01kg	4.54
10	Altura nominal de caída de pisón	0.001m	0.4572

Nota. En la tabla 52, se detalla las características principales de la muestra y consideraciones para el ensayo de Proctor de C4-E2.

Tabla 53

Compactación y determinación de densidad húmeda de C4-E2

II. COMPACTACION Y DENSIDAD HUMEDA						
N°	Parámetro		Especímenes			
			#1	#2	#3	#4
1	Código de molde	1	D	D	D	D
2	Volumen de molde calibrado	1cm ³	2134	2134	2134	2134
3	Nro. De capas	1	5	5	5	5
4	Nro. De golpes	1	56	56	56	56
5	P. de suelo compactado + molde	1g	10340	10531	10688	10670
6	P. de molde	1g	6271	6271	6271	6271
7	P. del suelo compactado	1g	4069	4260	4417	4399
8	Densidad húmeda	0.01g/cm ³	1.91	2.00	2.07	2.06

Nota. En la tabla 53, se detalla los datos de la compactación y la determinación de la densidad húmeda de C4-E2.

Tabla 54*Determinación de la humedad y densidad de C4-E2*

III. DETERMINACION DE LA HUMEDAD Y DENSIDAD SECA						
1	Peso del recipiente	0.1g	97.2	33.8	37.7	36.5
2	Peso del material húmedo + recipiente	0.1g	300.7	283.7	433.5	382.1
3	Peso de material seco + recipiente	0.1g	288.6	264.4	398.8	346.9
4	Peso del agua	0.1g	12.1	19.3	34.7	35.2
5	Peso del material seco	0.1g	191.4	230.6	361.1	310.4
6	Contenido de humedad	0.1g	6.3	8.4	9.6	11.3
7	Densidad seca	0.01g/cm ³	1.8	1.8	1.9	1.9
8	Peso unitario seco	0.1kN/m ³	17.6	18.1	18.5	18.2

Nota. En la tabla 54, se presenta los datos para el cálculo de la húmeda y densidad seca de C4-E2.

Tabla 55*Corrección del peso unitario y contenido de humedad de C4-E2*

IV. corrección del p.u. y c.h.		
1	Corrección por sobre medida	- NO APLICA
2	% en peso de la fracción sobremedida	0.01%
3	% de humedad de la fracción sobre medida	0.1%
4	Gravedad especifica de maso OD a 20°C de la fracción sobremedida	0.01
5	% en peso de la fracción de ensayo "Pf"	0.01%

Nota. En la tabla 55, se muestra los valores obtenidos para C4-E2.

Tabla 56*Datos de humedad optima - peso unitario seco - saturación de C4-E2*

V. CURVA HUMEDAD OPTIMA – P.U. SECO MAXIMO - SATURACION DE LA FRACCION DE ENSAYO			
1	Optimo cont. de humedad	0.1%	11.3
2	P.U. seco máximo	0.1kN/m3	18.5
		0.01g/cm3	1.89
3	Gravedad especifica aparente (Gs)	0.01	2.53
4	Densidad del agua (Yw)	0.1kN/m3	9.81
		0.01g/cm3	0.99821

Nota. En la tabla 56, se detalla los datos principales para la curva de humedad optima – peso unitario seco – saturación para C4-E2.

Tabla 57*Intervalos para cálculo de línea de saturación de C4-E2*

INTERVALOS	
Yd min	17.6
Yd max	18.5
Intervalo	0.186305208

Nota. En la tabla 57, se detalla todos los intervalos del peso unitario seco máximo y mínimo con el cual se obtendrá el dato para poder realizar el caculo para las líneas de saturación de C4-E2.

Tabla 58*Cálculos para línea de saturación al 100% de C4-E2*

Yd (kN/m3)	Ys (kN/m3)	%Sr=100%	Yw (kN/m3)	%w
17.59	24.77	100	9.789	16.14
17.77	24.77	100	9.789	15.55
17.96	24.77	100	9.789	14.98
18.15	24.77	100	9.789	14.42
18.33	24.77	100	9.789	13.87
18.52	24.77	100	9.789	13.34
15.76	24.77	100	9.789	22.59

Nota. En la tabla 58, se detalla los datos con los cuales se graficará (% de húmedas vs. Peso unitario seco) la línea de saturación al 100% para C4-E2.

Tabla 59

Cálculos para línea de saturación al 80% de C4-E2

Yd (kN/m3)	Ys (kN/m3)	%Sr=80%	Yw (kN/m3)	%w
17.59	24.77	80	9.789	12.91
17.77	24.77	80	9.789	12.44
17.96	24.77	80	9.789	11.98
18.15	24.77	80	9.789	11.54
18.33	24.77	80	9.789	11.10
18.52	24.77	80	9.789	10.67
15.76	24.77	80	9.789	18.07

Nota. En la tabla 59, se detalla los datos con los cuales se graficará (% de húmedas vs. Peso unitario seco) la línea de saturación al 80% para C4-E2.

Tabla 60

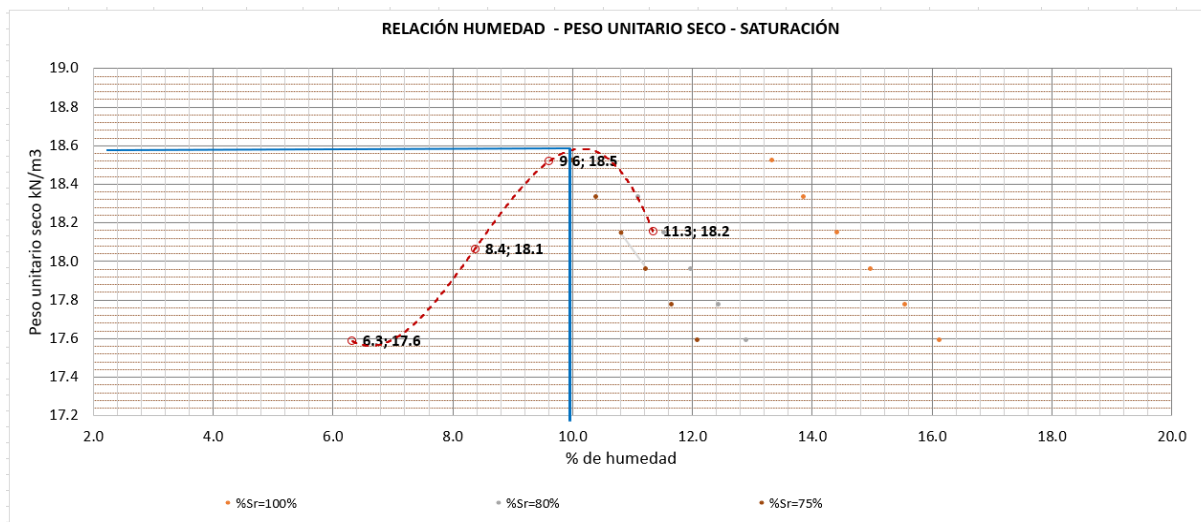
Cálculos para línea de saturación al 75% de C4-E2

Yd (kN/m3)	Ys (kN/m3)	%Sr=75%	Yw (kN/m3)	%w
17.59	24.77	75	9.789	12.10
17.77	24.77	75	9.789	11.66
17.96	24.77	75	9.789	11.24
18.15	24.77	75	9.789	10.82
18.33	24.77	75	9.789	10.40
18.52	24.77	75	9.789	10.00
15.76	24.77	75	9.789	16.94

Nota. En la tabla 60, se detalla los datos con los cuales se graficará (% de húmedas vs. Peso unitario seco) la línea de saturación al 75% para C4-E2.

Figura 13

Curva relación humedad - Peso unitario seco - Saturación de C4-E2



Nota. En la figura 13, se ilustra la curva de la relación entre el % de húmedas – peso unitario – saturación (75%, 80% y 100%) de C4-E2.

Proctor Suelo Natural de C6-E2

Tabla 61

Características de la muestra C6-E2 para el ensayo de Proctor

I. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA			
1	% retenido acumulado en tamiz Nro. 3/4"	0.01%	10.98
2	% retenido acumulado en tamiz 3/8"	0.01%	14.96
3	% retenido acumulado en tamiz Nro. 4	0.01%	19.46
4	Clasificación SUCS de suelo	-	SM
5	Tiempo de curado	1h	3.00
6	Procedimiento de ensayo a realizar	-	A
7	Diámetro nominal del molde	1pilg	4
8	Tipo de pisón	-	Manual
9	Peso nominal de pisón	0.01kg	4.54
10	Altura nominal de caída de pisón	0.001m	0.4572

Nota. En la tabla 61, se detalla las características principales de la muestra y consideraciones para el ensayo de Proctor de C6-E2.

Tabla 62

Compactación y determinación de densidad húmeda de C6-E2

II. COMPACTACION Y DETERMINACION DE LA DENSIDAD HUMEDA						
N°	Parámetro		Especímenes			
			#1	#2	#3	#4
1	Código de molde	1	D	D	D	D
2	Volumen de molde calibrado	1cm ³	942	942	942	942
3	Nro. De capas	1	5	5	5	5
4	Nro. De golpes	1	25	25	25	25
5	Peso de suelo compactado + molde	1g	5498	5575	5620	5630
6	Peso de molde	1g	3816	3816	3816	3816
7	Peso del suelo compactado	1g	1682	1759	1804	1814
8	Densidad húmeda	0.01g/cm ³	1.79	1.87	1.92	1.93

Nota. En la tabla 62, se detalla los datos de la compactación y la determinación de la densidad húmeda de C6-E2.

Tabla 63

Determinación de la humedad y densidad de C6-E2

III. DETER. DE LA HUMEDAD Y DENSIDAD SECA						
1	Peso del recipiente	0.1g	45.4	46.9	46.8	33.7
2	Peso del material húmedo + recipiente	0.1g	242.2	328.0	251.8	389.4
3	Peso de material seco + recipiente	0.1g	226.9	301.5	229.9	345.5
4	Peso del agua	0.1g	15.3	26.5	21.9	43.9
5	Peso del material seco	0.1g	181.5	254.6	183.1	311.8
6	Contenido de humedad	0.1g	8.4	10.4	12.0	14.1
7	Densidad seca	0.01g/cm ³	1.6	1.7	1.7	1.7
8	Peso unitario seco	0.1kN/m ³	16.1	16.6	16.8	16.6

Nota. En la tabla 63, se presenta los datos para el cálculo de la húmeda y densidad seca de C6-E2.

Tabla 64*Corrección del peso unitario y contenido de humedad de C6-E2*

IV. corrección del p.u. y c.h.			
1	Corrección por sobre medida	-	SI APLICA
2	% en peso de la fracción sobremedida	0.01%	19.46
3	% de humedad de la fracción sobre medida	0.1%	1.0
4	Gravedad específica de maso OD a 20°C de la fracción sobremedida	0.01	2.16
5	% en peso de la fracción de ensayo "Pf"	0.01%	80.54

Nota. En la tabla 64, se muestra la corrección para C6-E2.

Tabla 65*Datos de humedad optima - peso unitario seco - saturación de C6-E2*

V. CURVA HUMEDAD OPTIMA – P.U. SECO MAXIMO - SATURACION DE LA FRACCION DE ENSAYO			
1	Optimo cont. de humedad	0.1%	12.5
2	P. U. seco maximo	0.1kN/m3	16.6
		0.01g/cm3	1.69
3	Gravedad específica aparente (Gs)	0.01	2.37
4	Densidad del agua (Yw)	0.1kN/m3	9.81
		0.01g/cm3	0.99821

Nota. En la tabla 65, se muestra los datos principales para la curva de humedad optima – peso unitario seco – saturación para C6-E2.

Tabla 66*Intervalos para cálculo de línea de saturación de C6-E2*

INTERVALOS	
Yd min	16.1
Yd max	16.8
Intervalo	0.125024142

Nota. En la tabla 66, se muestra todos los intervalos del peso unitario seco máximo y mínimo con el cual se obtendrá el dato para poder realizar el caculo para las líneas de saturación de C6-E2.

Tabla 67*Cálculos para línea de saturación al 100% de C6-E2*

Yd (kN/m3)	Ys (kN/m3)	%Sr=100%	Yw (kN/m3)	%w
16.15	23.20	100	9.789	18.42
16.27	23.20	100	9.789	17.96
16.40	23.20	100	9.789	17.50
16.52	23.20	100	9.789	17.05
16.65	23.20	100	9.789	16.60
16.77	23.20	100	9.789	16.16
15.76	23.20	100	9.789	19.92

Nota. En la tabla 67, se detalla los datos con los cuales se graficará (% de húmedas vs. Peso unitario seco) la línea de saturación al 100% para C6-E2.

Tabla 68*Cálculos para línea de saturación al 80% de C6-E2*

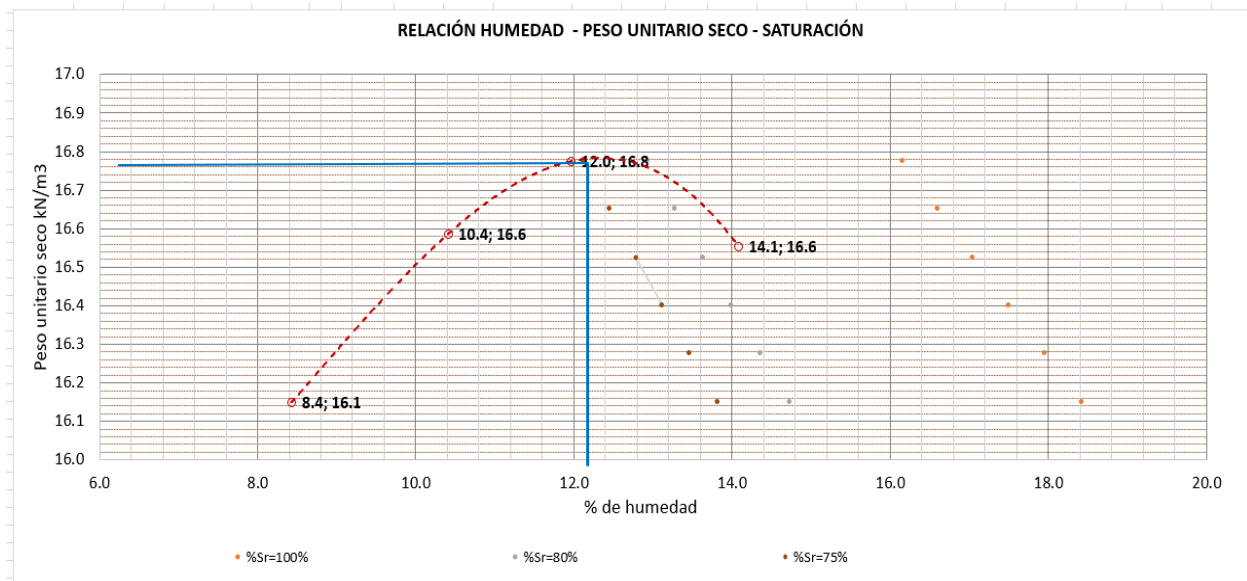
Yd (kN/m3)	Ys (kN/m3)	%Sr=80%	Yw (kN/m3)	%w
16.15	23.20	80	9.789	14.74
16.27	23.20	80	9.789	14.37
16.40	23.20	80	9.789	14.00
16.52	23.20	80	9.789	13.64
16.65	23.20	80	9.789	13.28
16.77	23.20	80	9.789	12.93
15.76	23.20	80	9.789	15.94

Nota. En la tabla 68, se detalla los datos con los cuales se graficará (% de húmedas vs. Peso unitario seco) la línea de saturación al 80% para C6-E2.

Tabla 69*Cálculos para línea de saturación al 75% de C6-E2*

Yd (kN/m3)	Ys (kN/m3)	%Sr=75%	Yw (kN/m3)	%w
16.15	23.20	75	9.789	13.82
16.27	23.20	75	9.789	13.47
16.40	23.20	75	9.789	13.12
16.52	23.20	75	9.789	12.79
16.65	23.20	75	9.789	12.45
16.77	23.20	75	9.789	12.12
15.76	23.20	75	9.789	14.94

Nota. En la tabla 69, se detalla los datos con los cuales se graficará (% de húmedas vs. Peso unitario seco) la línea de saturación al 75% para C6-E2.

Figura 14*Curva relación humedad - Peso unitario seco - Saturación de C6-E2*

Nota. En la figura 14, se ilustra la curva de la relación entre el % de húmedas – peso unitario – saturación (75%, 80% y 100%) de C6-E2

Proctor mezcla parcial

Proctor mezcla parcial C2-E2 (20%)

Tabla 70

Características de la muestra C2-E2 (20% de lodo) para el ensayo de Proctor

I. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA			
1	% retenido acumulado en tamiz Nro. 3/4"	0.01%	0.00
2	% retenido acumulado en tamiz 3/8"	0.01%	1.06
3	% retenido acumulado en tamiz Nro. 4	0.01%	3.28
4	Clasificación SUCS de suelo	-	SM
5	Tiempo de curado	1h	3.00
6	Procedimiento de ensayo a realizar	-	A
7	Diámetro nominal del molde	1pilg	4
8	Tipo de pisón	-	Manual
9	Peso nominal de pisón	0.01kg	4.54
10	Altura nominal de caída de pisón	0.001m	0.4572

Nota. En la tabla 70, se detalla las características principales de la muestra y consideraciones para el ensayo de Proctor de C2-E2 (20%).

Tabla 71

Compactación y determinación de densidad húmeda de C2-E2 (20%)

II. COMPACTACION Y DETERMINACION DE LA DENSIDAD HUMEDA					
N°	Parámetro	Especímenes			
		#1	#2	#3	#4
1	Código de molde	A	A	A	A
2	Volumen de molde calibrado (cm ³)	947	947	947	947
3	Nro. De capas	5	5	5	5
4	Nro. De golpes	25	25	25	25
5	P. de suelo compactado + molde (g)	5470	5520	5548	5576
6	P. de molde (g)	3816	3816	3816	3816
7	Peso del suelo compactado (g)	1654	1704	1732	1723
8	Densidad húmeda (g/cm ³)	1.75	1.80	1.83	1.82

Nota. En la tabla 71, se detalla los datos de la compactación y la determinación de la densidad húmeda de C2-E2 (20%).

Tabla 72*Determinación de la humedad y densidad de C2-E2 (20%)*

III. DETERMINACION DE LA HUMEDAD Y DENSIDAD SECA						
1	Peso del recipiente	0.1g	72	70.5	110.5	70
2	Peso del material húmedo + recipiente	0.1g	440	269	506	366.5
3	Peso de material seco + recipiente	0.1g	385	238.5	438	314
4	Peso del agua	0.1g	55	31	68	53
5	Peso del material seco	0.1g	313.0	168.0	327.5	244.0
6	Contenido de humedad	0.1g	17.6	18.2	20.8	21.5
7	Densidad seca	0.01g/cm ³	1.49	1.52	1.51	1.50
8	Peso unitario seco	0.1kN/m ³	14.6	14.9	14.9	14.7

Nota. En la tabla 72, se presenta los datos para el cálculo de la húmeda y densidad seca de C2-E2 (20%).

Tabla 73*Corrección del peso unitario y contenido de humedad de C2-E2 (20%)*

IV. corrección del p.u. y c.h.		
1	Corrección por sobre medida	- NO APLICA
2	% en peso de la fracción sobremedida	0.01% -
3	% de humedad de la fracción sobre medida	0.1% -
4	Gravedad especifica de maso OD a 20°C de la fracción sobremedida	0.01 -
5	% en peso de la fracción de ensayo "Pf"	0.01% -

Nota. En la tabla 73, se muestra la corrección para C2-E2 (20%).

Tabla 74*Datos de humedad optima - peso unitario seco - saturación de C2-E2 (20%)*

V. CURVA HUMEDAD OPTIMA – P.U. SECO MAXIMO - SATURACION DE LA FRACCION DE ENSAYO			
1	Optimo cont. de humedad	0.1%	19.8
2	P.U. seco máximo	0.1kN/m ³	14.3
		0.01g/cm ³	1.46
3	Gravedad especifica aparente (Gs)	0.01	2.54
4	Densidad del agua (Yw)	0.1kN/m ³	9.81
		0.01g/cm ³	0.99821

Nota. En la tabla 74, se detalla los datos principales para la curva de humedad optima – peso unitario seco – saturación para C2-E2 (20%).

Tabla 75*Intervalos para cálculo de línea de saturación de C2-E2 (20%)*

INTERVALOS	
Yd min	14.6
Yd max	14.9
Intervalo	0.07

Nota. En la tabla 75, se detalla todos los intervalos del peso unitario seco máximo y mínimo con el cual se obtendrá el dato para poder realizar el caculo para las líneas de saturación de C2-E2 (20%).

Tabla 76*Cálculos para línea de saturación al 100% de C2-E2 (20%)*

Yd (kN/m3)	Ys (kN/m3)	%Sr=100%	Yw (kN/m3)	%w
14.57	24.87	100	9.789	27.83
14.64	24.87	100	9.789	27.49
14.72	24.87	100	9.789	27.16
14.79	24.87	100	9.789	26.83
14.86	24.87	100	9.789	26.50
14.93	24.87	100	9.789	26.18
15.76	24.87	100	9.789	22.75

Nota. En la tabla 76, se detalla los datos con los cuales se graficará (% de húmedas vs. Peso unitario seco) la línea de saturación al 100% para C2-E2 (20%).

Tabla 77*Cálculos para línea de saturación al 80% de C2-E2 (20%)*

Yd (kN/m3)	Ys (kN/m3)	%Sr=80%	Yw (kN/m3)	%w
14.57	24.87	80	9.789	22.26
14.64	24.87	80	9.789	21.99
14.72	24.87	80	9.789	21.72
14.79	24.87	80	9.789	21.46
14.86	24.87	80	9.789	21.20
14.93	24.87	80	9.789	20.94
15.76	24.87	80	9.789	18.20

Nota. En la tabla 77, se detalla los datos con los cuales se graficará (% de húmedas vs. Peso unitario seco) la línea de saturación al 80% para C2-E2 (20%).

Tabla 78

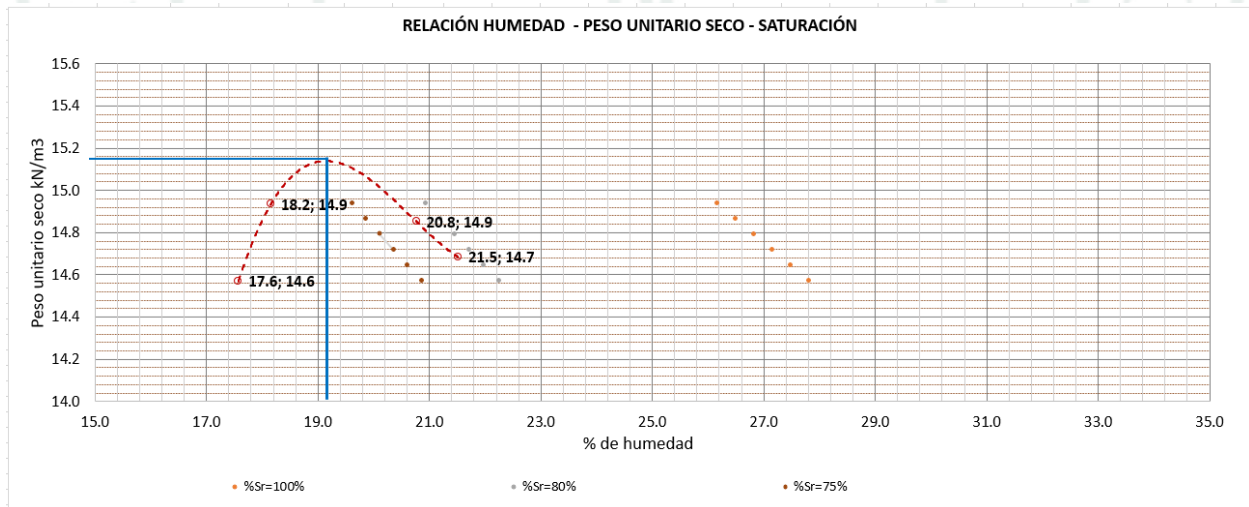
Cálculos para línea de saturación al 75% de C2-E2 (20%)

Yd (kN/m3)	Ys (kN/m3)	%Sr=75%	Yw (kN/m3)	%w
14.57	24.87	75	9.789	20.87
14.64	24.87	75	9.789	20.62
14.72	24.87	75	9.789	20.37
14.79	24.87	75	9.789	20.12
14.86	24.87	75	9.789	19.88
14.93	24.87	75	9.789	19.63
15.76	24.87	75	9.789	17.06

Nota. En la tabla 78, se detalla los datos con los cuales se graficará (% de húmedas vs. Peso unitario seco) la línea de saturación al 75% para C2-E2 (20%).

Figura 15

Curva relación humedad - Peso unitario seco - Saturación de C2-E2 (20%)



Nota. En la figura 15, se ilustra la curva de la relación entre el % de húmedas – peso unitario – saturación (75%, 80% y 100%) de C2-E2 (20%).

Proctor mezcla parcial C4-E2 (60%)

Tabla 79

Características de la muestra C4-E2 (60% de lodo) para el ensayo de Proctor

I. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA			
1	% retenido acumulado en tamiz Nro. 3/4"	0.01%	0.00
2	% retenido acumulado en tamiz 3/8"	0.01%	1.06
3	% retenido acumulado en tamiz Nro. 4	0.01%	3.28
4	Clasificación SUCS de suelo	-	SM
5	Tiempo de curado	1h	3.00
6	Procedimiento de ensayo a realizar	-	A
7	Diámetro nominal del molde	1pilg	4
8	Tipo de pisón	-	Manual
9	Peso nominal de pisón	0.01kg	4.54
10	Altura nominal de caída de pisón	0.001m	0.4572

Nota. En la tabla 79, se detalla las características principales de la muestra y consideraciones para el ensayo de Proctor de C4-E2 (60%).

Tabla 80

Compactación y determinación de densidad húmeda de C4-E2 (60%)

II. COMPACTACION Y DETERMINACION DE LA DENSIDAD HUMEDA					
N°	Parámetro	Especímenes			
		#1	#2	#3	#4
1	Código de molde	A	A	A	A
2	Volumen de molde calibrado (cm ³)	2131	2131	2131	2131
3	Nro. De capas	5	5	5	5
4	Nro. De golpes	56	56	56	56
5	Peso de suelo compactado + molde (g)	10024	10115	10172	10171
6	Peso de molde (g)	6531	6531	6531	6531
7	Peso del suelo compactado (g)	3493	3584	3641	3640
8	Densidad húmeda (g/cm ³)	1.64	1.68	1.71	1.71

Nota. En la tabla 80, se detalla los datos de la compactación y la determinación de la densidad húmeda de C4-E2 (60%).

Tabla 81*Determinación de la humedad y densidad de C4-E2 (60%)*

III. DETERMINACION DE LA HUMEDAD Y DENSIDAD SECA						
1	Peso del recipiente	0.1g	119	115.5	146.5	118.5
2	Peso del material húmedo + recipiente	0.1g	613	445	610.5	756
3	Peso de material seco + recipiente	0.1g	545.5	395.5	534	641.5
4	Peso del agua	0.1g	68	50	77	115
5	Peso del material seco	0.1g	426.5	280.0	387.5	523.0
6	Contenido de humedad	0.1g	15.8	17.7	19.7	21.9
7	Densidad seca	0.01g/cm ³	1.4	1.4	1.4	1.4
8	Peso unitario seco	0.1kN/m ³	13.9	14.0	14.0	13.7

Nota. En la tabla 81, se presenta los datos para el cálculo de la húmeda y densidad seca de C4-E2 (60%).

Tabla 82*Corrección del peso unitario y contenido de humedad de C4-E2 (60%)*

IV. Corrección del p.u. y c.h.		
1	Corrección por sobre medida	- NO APLICA
2	% en peso de la fracción sobre medida	0.01 % -
3	% de humedad de la fracción sobre medida	0.1% -
4	Gravedad específica de maso OD a 20°C de la fracción sobre medida	0.01 -
5	% en peso de la fracción de ensayo "Pf"	0.01 % -

Nota. En la tabla 82, se muestra la corrección para C4-E2 (60%).

Tabla 83*Datos de humedad optima - peso unitario seco - saturación de C4-E2 (60%)*

V. CURVA HUMEDAD OPTIMA – P.U. SECO MAXIMO - SATURACION DE LA FRACCION DE ENSAYO			
1	Optimo cont. de humedad	0.1%	18.3
2	P.U. seco máximo	0.1kN/m ³	14.05
		0.01g/cm ³	1.43265
3	Gravedad especifica aparente (Gs)	0.01	2.65
4	Densidad del agua (Yw)	0.1kN/m ³	9.81
		0.01g/cm ³	0.99821

Nota. En la tabla 83, se detalla los datos principales para la curva de humedad optima – peso unitario seco – saturación para C4-E2 (60%).

Tabla 84*Intervalos para cálculo de línea de saturación de C4-E2 (60%)*

INTERVALOS	
Yd min	13.7
Yd max	14.0
Intervalo	0.05

Nota: En la tabla 84, se detalla todos los intervalos del p.u. seco máximo y mínimo con el cual se obtendrá el dato para poder realizar el caculo para las líneas de saturación de C4-E2 (60%).

Tabla 85*Cálculos para línea de saturación al 100% de C4-E2 (60%)*

Yd (kN/m³)	Ys (kN/m³)	%Sr=100%	Yw (kN/m³)	%w
13.74	25.94	100	9.789	33.50
13.80	25.94	100	9.789	33.22
13.85	25.94	100	9.789	32.94
13.91	25.94	100	9.789	32.66
13.96	25.94	100	9.789	32.38
14.02	25.94	100	9.789	32.11
15.76	25.94	100	9.789	24.38

Nota. En la tabla 85, se detalla los datos con los cuales se graficará (% de húmedas vs. Peso unitario seco) la línea de saturación al 100% para C4-E2 (60%).

Tabla 86

Cálculos para línea de saturación al 80% de C4-E2 (60%)

Yd (kN/m3)	Ys (kN/m3)	%Sr=80%	Yw (kN/m3)	%w
13.74	25.94	80	9.789	26.80
13.80	25.94	80	9.789	26.57
13.85	25.94	80	9.789	26.35
13.91	25.94	80	9.789	26.13
13.96	25.94	80	9.789	25.91
14.02	25.94	80	9.789	25.69
15.76	25.94	80	9.789	19.50

Nota. En la tabla 86, se detalla los datos con los cuales se graficará (% de húmedas vs. Peso unitario seco) la línea de saturación al 80% para C4-E2 (60%).

Tabla 87

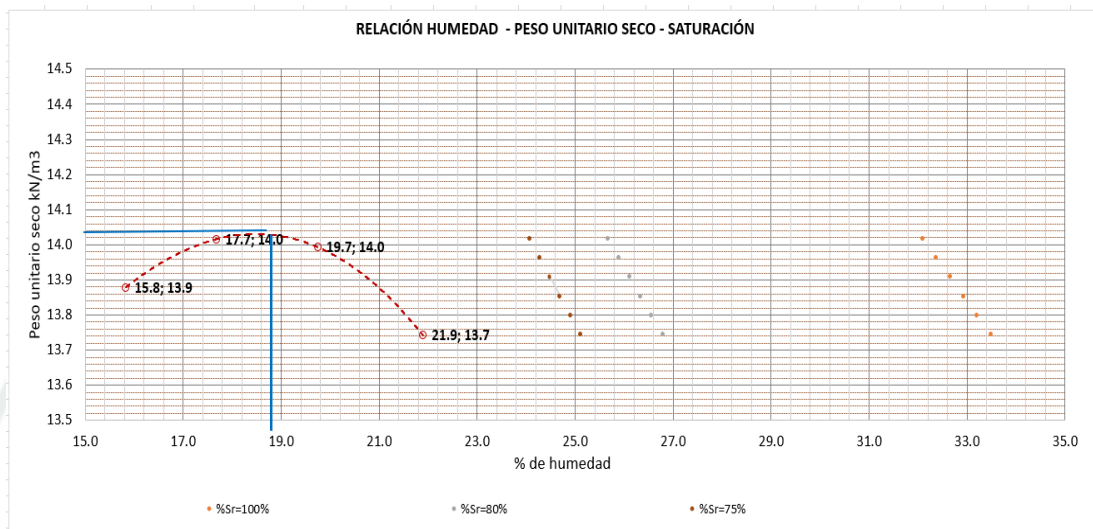
Cálculos para línea de saturación al 75% de C4-E2 (60%)

Yd (kN/m3)	Ys (kN/m3)	%Sr=75%	Yw (kN/m3)	%w
13.74	25.94	75	9.789	25.12
13.80	25.94	75	9.789	24.91
13.85	25.94	75	9.789	24.70
13.91	25.94	75	9.789	24.49
13.96	25.94	75	9.789	24.29
14.02	25.94	75	9.789	24.08
15.76	25.94	75	9.789	18.28

Nota. En la tabla 87, se detalla los datos con los cuales se graficará (% de húmedas vs. Peso unitario seco) la línea de saturación al 75% para C4-E2 (60%).

Figura 16

Curva relación humedad - Peso unitario seco - Saturación de C4-E2 (60%)



Nota. En la figura 16, se ilustra la curva de la relación entre el % de húmedas – peso unitario – saturación (75%, 80% y 100%) de C4-E2 (60%).

Proctor mezcla parcial C6-E2 (40%)

Tabla 88

Características de la muestra C6-E2 (40% de lodo) para el ensayo de Proctor

I. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA		
1	% retenido acumulado en tamiz Nro. 3/4"	0.01% 0.00
2	% retenido acumulado en tamiz 3/8"	0.01% 1.06
3	% retenido acumulado en tamiz Nro. 4	0.01% 3.28
4	Clasificación SUCS de suelo	- SM
5	Tiempo de curado	1h 3.00
6	Procedimiento de ensayo a realizar	- A
7	Diámetro nominal del molde	1pilg 4
8	Tipo de pisón	- Manual
9	Peso nominal de pisón	0.01kg 4.54
10	Altura nominal de caída de pisón	0.001m 0.4572

Nota. En la tabla 88, se detalla las características principales de la muestra y consideraciones para el ensayo de Proctor de C6-E2 (40%).

Tabla 89

Compactación y determinación de densidad húmeda de C6-E2 (40%)

II. COMPACTACION Y DETERMINACION DE LA DENSIDAD HUMEDA						
N°	Parámetro	Especímenes				
		#1	#2	#3	#4	
1	Código de molde	1	A	A	A	A
2	Volumen de molde calibrado	1cm ³	947	947	947	947
3	Nro. De capas	1	5	5	5	5
4	Nro. De golpes	1	25	25	25	25
5	P. de suelo compactado + molde	1g	5202	5282	5363	5360
6	P. de molde	1g	3702	3702	3702	3702
7	P. del suelo compactado	1g	1501	1580	1661	1658
8	Densidad húmeda	0.01g/cm ³	1.58	1.67	1.75	1.75

Nota. En la tabla 89, se muestra los datos de la compactación y la determinación de la densidad húmeda de C6-E2 (40%).

Tabla 90

Determinación de la humedad y densidad de C6-E2 (40%)

III. DETERMINACION DE LA HUMEDAD Y DENSIDAD SECA						
1	Peso del recipiente	0.1g	112	86.5	83	82
2	Peso del material húmedo + recipiente	0.1g	508	632	600.5	456
3	Peso de material seco + recipiente	0.1g	450	548	506	386
4	Peso del agua	0.1g	58	84	95	70
5	Peso del material seco	0.1g	338.0	461.5	423.0	304.0
6	Contenido de humedad	0.1g	17.2	18.2	22.3	23.0
7	Densidad seca	0.01g/cm ³	1.4	1.4	1.4	1.4
8	Peso unitario seco	0.1kN/m ³	13.3	13.8	14.1	14.0

Nota. En la tabla 90, se presenta los datos para el cálculo de la húmeda y densidad seca de C6-E2 (40%).

Tabla 91

Corrección del peso unitario y contenido de humedad de C6-E2 (40%)

IV. corrección del p.u. y c.h.		
1	Corrección por sobre medida	- NO APLICA
2	% en peso de la fracción sobremedida	0.01% -
3	% de humedad de la fracción sobre medida	0.1% -
4	Gravedad especifica de maso OD a 20°C de la fracción sobremedida	0.01 -
5	% en peso de la fracción de ensayo "Pf"	0.01% -

Nota. En la tabla 91, se muestra la corrección para C6-E2 (40%).

Tabla 92

Datos de humedad optima - peso unitario seco - saturación de C6-E2 (40%)

V. CURVA HUMEDAD OPTIMA – P.U. SECO MAXIMO - SATURACION DE LA FRACCION DE ENSAYO		
1	Optimo cont. de humedad	0.1% 20.4
2	P.U. seco máximo	0.1kN/m3 14.2 0.01g/cm3 1.45
3	Gravedad especifica aparente (Gs)	0.01 2.51
4	Densidad del agua (Yw)	0.1kN/m3 9.81 0.01g/cm3 0.99821

Nota. En la tabla 92, se detalla los datos principales para la curva de humedad optima – peso unitario seco – saturación para C6-E2 (40%).

Tabla 93

Intervalos para cálculo de línea de saturación de C6-E2 (40%)

INTERVALOS	
Yd min	13.3
Yd max	14.1
Intervalo	0.16

Nota. En la tabla 93, se detalla todos los intervalos del peso unitario seco máximo y mínimo con el cual se obtendrá el dato para poder realizar el caculo para las líneas de saturación de C6-E2 (40%).

Tabla 94

Cálculos para línea de saturación al 100% de C6-E2 (40%)

Yd (kN/m3)	Ys (kN/m3)	%Sr=100%	Yw (kN/m3)	%w
13.26	24.57	100	9.789	33.97
13.42	24.57	100	9.789	33.09
13.58	24.57	100	9.789	32.24
13.74	24.57	100	9.789	31.40
13.90	24.57	100	9.789	30.58
14.06	24.57	100	9.789	29.79
15.76	24.57	100	9.789	22.28

Nota. En la tabla 94, se detalla los datos con los cuales se graficará (% de húmedas vs. Peso unitario seco) la línea de saturación al 100% para C6-E2 (40%).

Tabla 95

Cálculos para línea de saturación al 80% de C6-E2 (40%)

Yd (kN/m3)	Ys (kN/m3)	%Sr=80%	Yw (kN/m3)	%w
13.26	24.57	80	9.789	27.18
13.42	24.57	80	9.789	26.47
13.58	24.57	80	9.789	25.79
13.74	24.57	80	9.789	25.12
13.90	24.57	80	9.789	24.47
14.06	24.57	80	9.789	23.83
15.76	24.57	80	9.789	17.82

Nota. En la tabla 95, se muestra los datos con los cuales se graficará (% de húmedas vs. Peso unitario seco) la línea de saturación al 80% para C6-E2 (40%).

Tabla 96

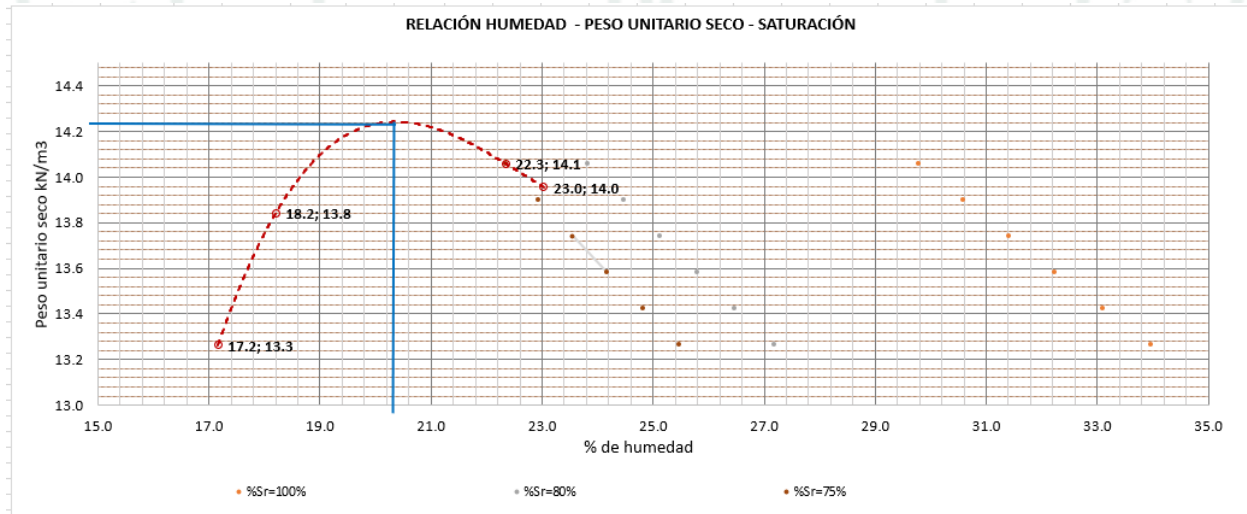
Cálculos para línea de saturación al 75% de C6-E2 (40%)

Yd (kN/m3)	Ys (kN/m3)	%Sr=75%	Yw (kN/m3)	%w
13.26	24.57	75	9.789	25.48
13.42	24.57	75	9.789	24.82
13.58	24.57	75	9.789	24.18
13.74	24.57	75	9.789	23.55
13.90	24.57	75	9.789	22.94
14.06	24.57	75	9.789	22.34
15.76	24.57	75	9.789	16.71

Nota. En la tabla 96, se detalla los datos con los cuales se graficará (% de húmedas vs. Peso unitario seco) la línea de saturación al 75% para C6-E2 (40%).

Figura 17

Curva relación humedad - Peso unitario seco - Saturación de C6-E2 (40%)



Nota. En la figura 17, se ilustra la curva de la relación entre el % de humedad – p.u. – saturación (75%, 80% y 100%) de C6-E2 (40%).

Cuadro resumen de ensayos Proctor

Tabla 97

Resumen de ensayos Proctor para suelo natural y con mezcla parcial de lodo

N°	MUESTRA	TIPO DE PROCTOR	METODO	P.U. SECO MAXIMO (kN/m3)	C.H. OPTIMO (0.1%)
1	C2-E2	Modificado	C	15.7	15.3
2	C4-E2	Modificado	C	18.5	11.3
3	C6-E2	Modificado	C	16.6	12.5
4	C2-E2 (20%)	Modificado	C	14.3	19.8
5	C4-E2 (60%)	Modificado	C	14.05	18.3
6	C6-E2 (40%)	Modificado	C	14.2	20.4

CBR

CBR DE C2-E2

Tabla 98

Compactación y determinación de la densidad húmeda de C2-E2

I.- COMPACTACION Y DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD HÚMEDA							
Espécimen		Espécimen 1 Sin saturar	Espécimen 2 Para saturar	Espécimen 3 Sin saturar	Espécimen 4 Para saturar	Espécimen 5 Sin saturar	Espécimen 6 Para saturar
Nro. De capas		Nro.	5		5		5
Golpes por capa		Nro.	10		25		56
Nro. De molde calibrado	-		F		U		180
Diámetro interior promedio del molde SIN ANILLO		152.28	152.28	152.66	152.66	152.56	152.56
Altura promedio del molde calibrado SIN ANILLO		180.73	180.73	180.27	180.27	178.73	178.73
Peso de molde calibrado SIN ANILLO SIN DISCO ESP.	1g	7780	7780	7965	7965	8286	8286
Nro. De disco espaciador calibrado	-		C		C		C
Altura del disco espaciador calibrado	0.01mm	61.93	61.93	61.93	61.93	61.93	61.93
Volumen total del molde calibrado SIN ANILLO	1cm3	3292	3292	3300	3300	3267	3267
Volumen del disco espaciador	1cm3	1128	1128	1134	1134	1132	1132
Volumen neto del molde calibrado SIN ANILLO	1cm3	2164	2164	2166	2166	2135	2135
Volumen neto máx. del molde calibrado SIN ANILLO	1cm3	2149	2149	2149	2149	2149	2149
Volumen neto mín. del molde calibrado SIN ANILLO	1cm3	2099	2099	2099	2099	2099	2099
Peso de molde + suelo húmedo SIN ANILLO, SIN DISCO ESP.	1g	11733	11935	12130	12275	12475	12615

Nota. En la tabla 98, se presenta los datos tomados en laboratorio de compactación para determinar la densidad humedad de C2-E2, teniendo en cuenta que se debe trabajar con el Método C.

Tabla 99

Humedad y densidad seca de C2-E2

II.- DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD Y DENSIDAD SECA						
	Sin saturar	Saturado	Sin saturar	Saturado	Sin saturar	Saturado
Recipiente Nro.	1	1	2	2	3	3
P. del recipiente (g)	37.8	67.0	45.5	45.3	47.0	46.8
P. del material húmedo + recipiente (g)	328.0	450.1	411.1	656.5	371.7	630.8
P. de material seco +recipiente (g)	300.6	398.8	376.6	580.0	341.0	567.8
P. de agua (g)	27.4	51.3	34.5	76.5	30.7	63.0
P. de material seco (g)	262.8	331.8	331.1	534.7	294.0	521.0
C.h. (%)	10.4	15.5	10.4	14.3	10.4	12.1
Densidad Seca (g/cm ³)	1.65	1.66	1.74	1.74	1.78	1.81
Peso unitario seco γ_d (kN/m ³)	16.2	16.3	17.1	17.1	17.4	17.7

Tabla 100

Expansión de C2- E2

III.- DETERMINACIÓN DE LA EXPANSION													
Fecha y hora de lectura dd/mm/aaaa hhmm	Tiempo 1h	Dial Espécimen 2				Dial Espécimen 4				Dial Espécimen 6			
		Lectura acumulada		Expansión		Lectura acumulada		Expansión		Lectura acumulada		Expansión	
		Directa	mm (0.01mm)	mm (0.01mm)	% 0.1%	Directa	mm (0.01mm)	mm (0.01mm)	% 0.1%	Directa	mm (0.01mm)	mm (0.01mm)	%
18/08/2025 12:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/2025 12:00	24	-	0.02	0.02	0.0	-	0.01	0.01	0.0	-	0.01	0.01	0.0
20/08/2025 12:00	28	-	0.02	0.02	0.0	-	0.01	0.01	0.0	-	0.01	0.01	0.0
21/08/2025 12:00	72	-	0.02	0.02	0.0	-	0.01	0.01	0.0	-	0.01	0.01	0.0
22/08/2025 12:00	96	-	0.04	0.04	0.0	-	0.01	0.01	0.0	-	0.01	0.01	0.0

Nota. En la tabla 100, se presenta las días y fechas realizado el ensayo junto a sus lecturas de diales durante los 4 días de ensayo de C2-E2.

Tabla 101

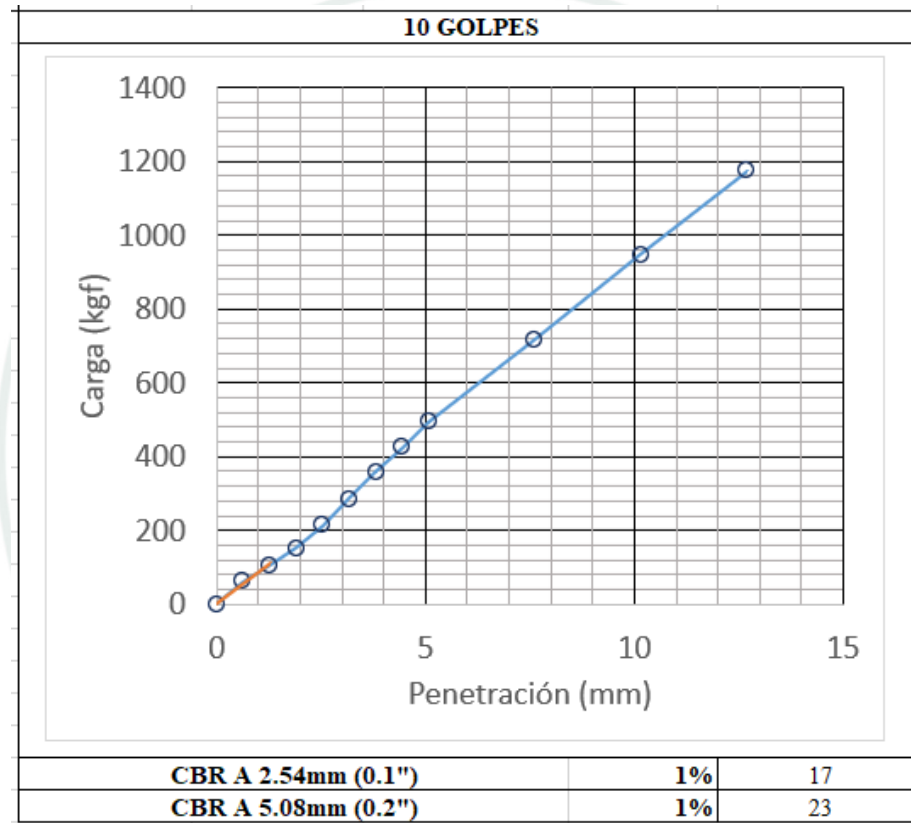
Expansión de C2- E2

IV.- PENETRACION																
Penetración		Velocidad de ensayo	Tiempo de carga	Esfuerzo Estándar	Especímen 2 Saturado				Especímen 4 Saturado				Especímen 6 Saturado			
0.001 in	0.01 mm	0.01mm/min	0.1mi n	0.1Mp a	Dial (div)	Carga 0.1k gf	Corrección 0.1kgf	% CBR 1%	Dial (div)	Carga 0.1kg f	Corrección 0.1kgf	% CBR 1%	Dial (div)	Carga 0.1kg f	Corrección 0.1kgf	% CBR 1%
0.000	0.00	1.27	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.025	0.64	1.27	0.5	-	-	61.7	-	-	-	231.9	-	-	-	143.9	-	-
0.050	1.27	1.27	1.0	-	-	105.4	-	-	-	450.1	-	-	-	361.0	-	-
0.075	1.91	1.27	1.5	-	-	150.8	-	-	-	685.8	-	-	-	645.4	-	-
0.100	2.54	1.27	2.0	6.9	-	214.0	228.9	17	-	915.5	921.2	67	-	994.4	1287.4	93
0.125	3.18	1.27	2.5	-	-	284.0	-	-	-	1106.9	-	-	-	1372.3	-	-
0.150	3.81	1.27	3.0	-	-	358.5	-	-	-	1281.6	-	-	-	1746.5	-	-
0.175	4.45	1.27	3.5	-	-	425.2	-	-	-	1424.2	-	-	-	2120.5	-	-
0.200	5.08	1.27	4.0	10.3	-	492.9	475.5	23	-	1535.8	1524.3	74	-	2440.3	2473.1	120
0.300	7.62	1.27	6.0	-	-	717.4	-	-	-	1892.4	-	-	-	3328.8	-	-
0.400	10.16	1.27	8.0	-	-	947.7	-	-	-	2150.3	-	-	-	3832.7	-	-
0.500	12.70	1.27	10.0	-	-	1174.0	-	-	-	2486.1	-	-	-	4227.8	-	-

V.- GRÁFICAS CBR

Figura 18

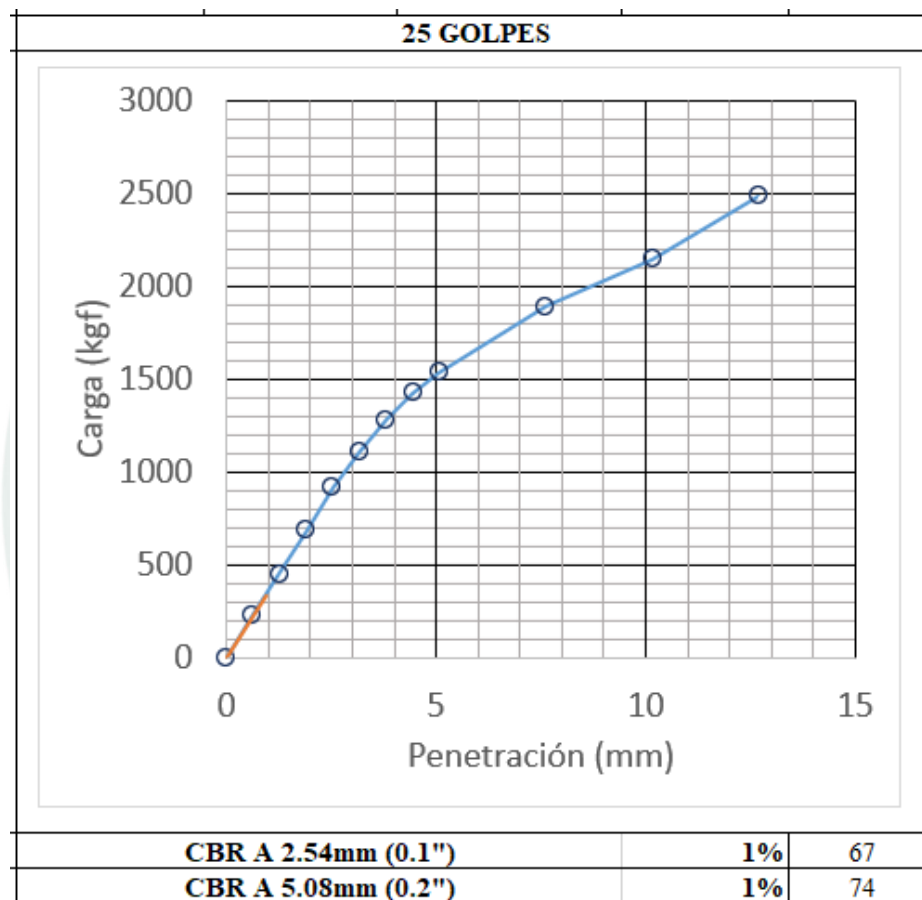
Curvas CBR de 10 golpes de C2-E2



Nota. En la figura 18, se presenta la curva de CBR (penetración vs. Carga) de 10 golpes para C2-E2.

Figura 19

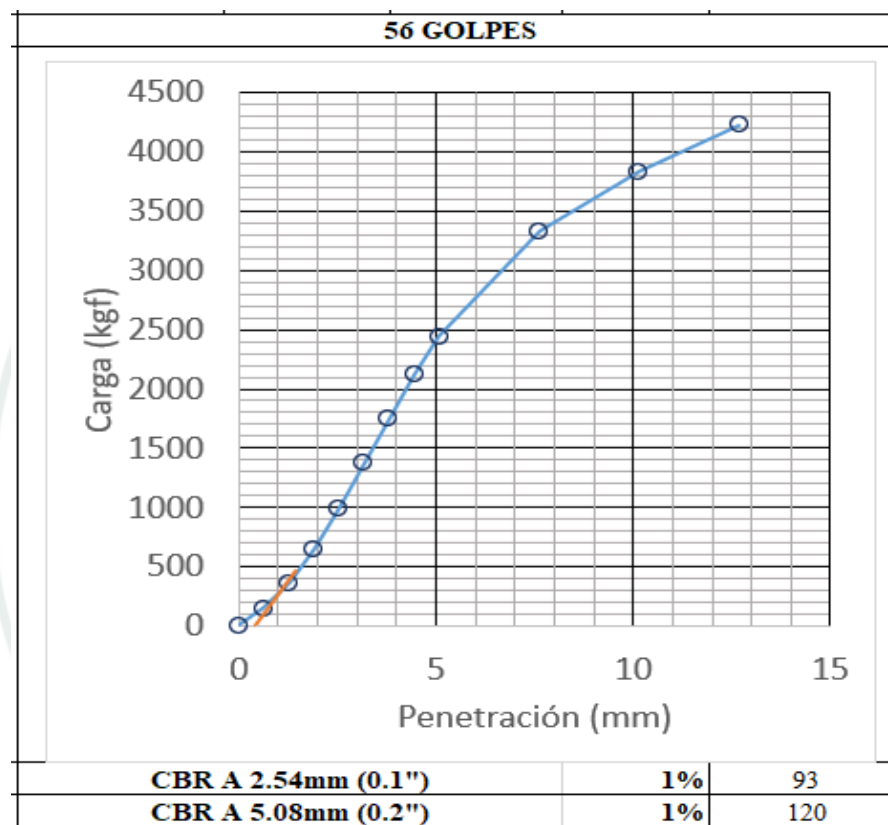
Curvas CBR de 25 golpes de C2-E2



Nota. En la figura 19, se presenta la curva de CBR (penetración vs. Carga) de 25 golpes para C2-E2.

Figura 20

Curvas CBR de 56 golpes de C2-E2



Nota. En la figura 20, se presenta la curva de CBR (penetración vs. Carga) de 56 golpes para C2-E2.

Tabla 102*Resultados de compactación de C2-E2*

VI.- RESULTADOS DE COMPACTACION		
Método de compactación	-	Proctor Modificado
Peso unitario seco máximo	0.1kN/m3	15.7
95% del Peso unitario máximo	0.1kN/m3	14.9
Optimo contenido de humedad	0.1%	15.3

Nota. En la tabla 102, se detalla los resultados de compactación para el CBR de C2-E2.

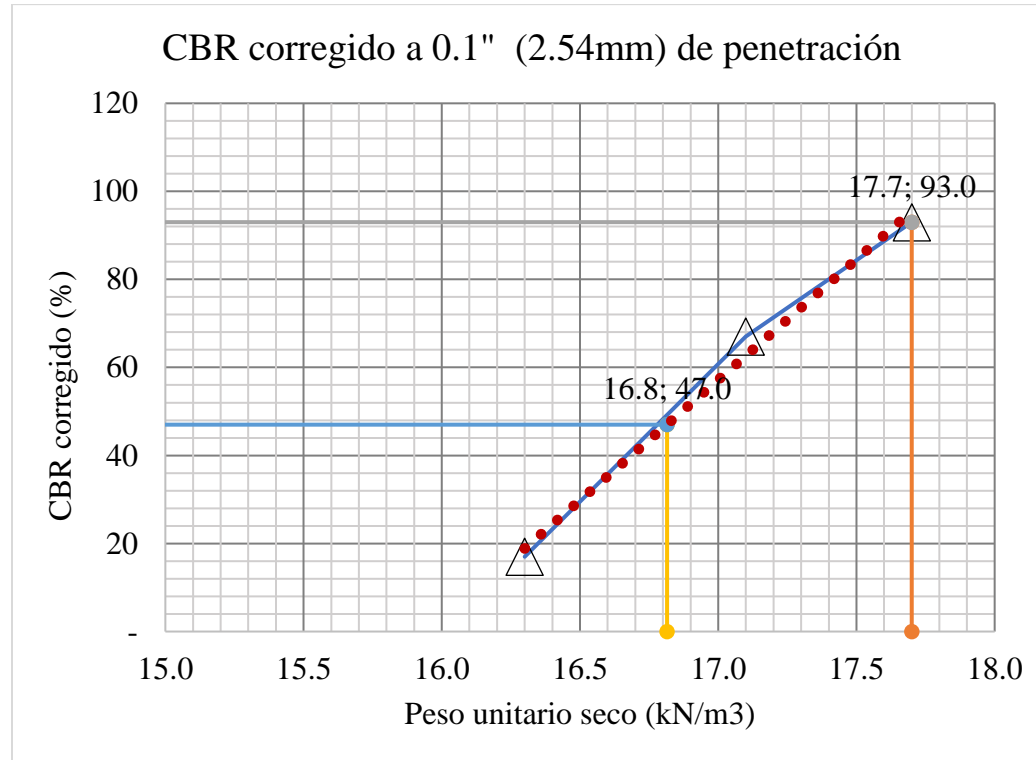
Tabla 103*Resultados de CBR de C2-E2*

VII.- RESULTADOS DE CBR						
Nro. De golpes	CBR corregido a 0.1"	CBR corregido a 0.2"	Peso unitario seco	Contenido de Humedad	% Compactación	% de expansión
1	1%	1%	0.1kN/m3	0.1%	1%	0.1%
10	17	23	16.3	15.5	104	0.0
25	67	74	17.1	14.3	109	0.0
56	93	120	17.7	12.1	113	0.0

Nota. En la tabla 110, se detalla los resultados de CBR de C2-E2.

Figura 21

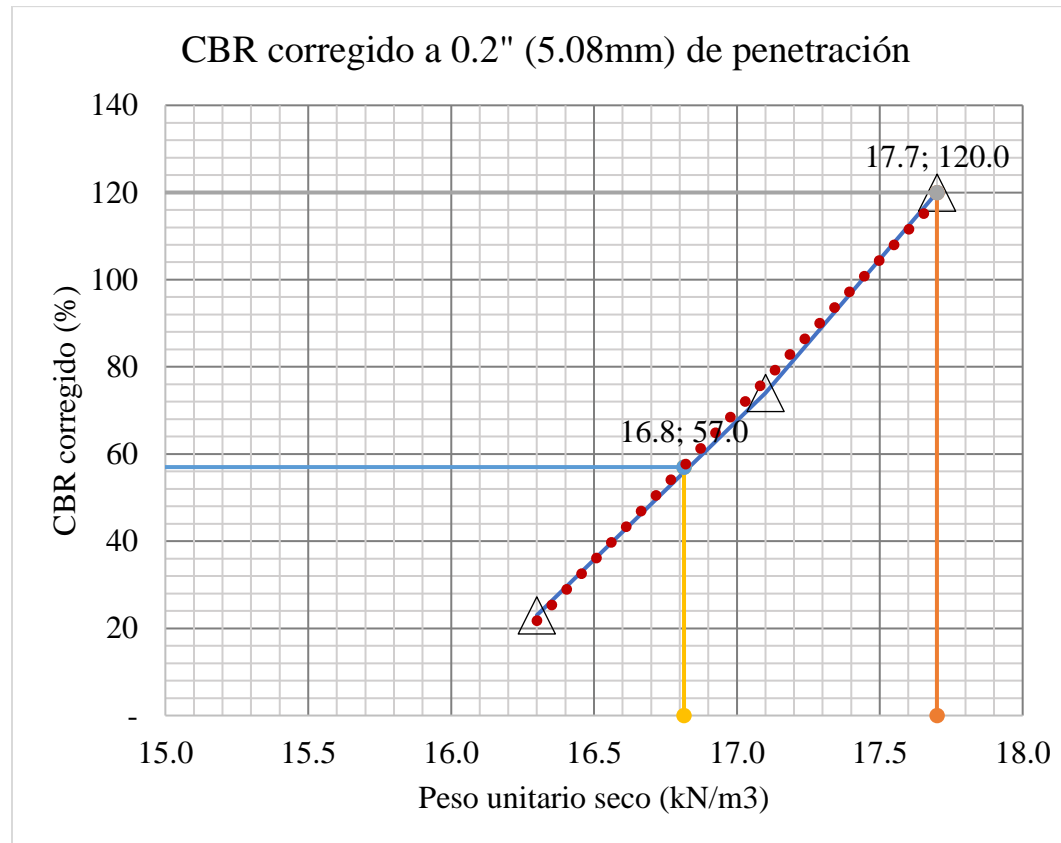
Línea de CBR corregido para 0.1" de penetración de C2-E2



Nota. En la figura 21, se detalla la línea de CBR corregido para 0.1" de penetración del suelo C2-E2.

Figura 22

Línea de CBR corregido para 0.2" de penetración de C2-E2



Nota. En la figura 22, se presenta la gráfica de CBR corregido Vs. El peso unitario seco y como resultado la línea de CBR corregido para 0.2" de penetración del suelo C2-E2.

CBR de C4-E2

Tabla 104

Curva relación humedad - Peso unitario seco - Saturación de C4-E2

I.- COMPACTACION Y DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD HÚMEDA								
Espécimen	-	Espécimen 1	Espécimen 2	Espécimen 3	Espécimen 4	Espécimen 5	Espécimen 6	
		Sin saturar	Para saturar	Sin saturar	Para saturar	Sin saturar	Para saturar	
Nro. De capas		Nro.	5		5		5	
Golpes por capa		Nro.	10		25		56	
Diámetro interior promedio del molde SIN ANILLO		152.28	152.28	152.66	152.66	152.56	152.56	
Altura promedio del molde calibrado SIN ANILLO		180.73	180.73	180.27	180.27	178.73	178.73	
Peso de molde calibrado SIN ANILLO SIN DISCO ESP.	1g	7976	7976	7932	7932	8254	8254	
Nro. De disco espaciador calibrado	-		C		C		C	
Volumen total del molde calibrado SIN ANILLO	1cm ³	3292	3292	3300	3300	3267	3267	
Volumen del disco espaciador	1c m ³	1128	1128	1134	1134	1132	1132	
Volumen neto del molde calibrado SIN ANILLO	1cm ³	2164	2164	2166	2166	2135	2135	
Volumen neto máx. del molde calibrado SIN ANILLO	1cm ³	2149	2149	2149	2149	2149	2149	
Volumen neto mín. del molde calibrado SIN ANILLO	1cm ³	2099	2099	2099	2099	2099	2099	
Peso de molde + suelo húmedo SIN ANILLO, SIN DISCO ESP.	1g	11821	12134	11880	12117	12468	12675	
Peso del suelo húmedo	1g	3845	4158	3948	4185	4214	4421	
Densidad húmeda		0.01g/c m ³	1.78	1.92	1.82	1.93	1.97	2.0 7

Nota. En la tabla 104, se presenta los datos tomados en laboratorio de compactación para determinar la densidad humedad de C4-E2,

teniendo en cuenta que se debe trabajar con el Método C.

Tabla 105

Humedad y densidad seca de C4-E2

II.- DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD Y DENSIDAD SECA							
		Sin saturar	Saturado	Sin saturar	Saturado	Sin saturar	Saturado
Recipiente Nro.	Nro.	1	1	2	2	3	3
Peso del recipiente	0.1g	66.3	37.6	33.7	40.7	36.4	41.9
Peso del material húmedo + recipiente	0.1g	360.9	311.7	327.8	409.6	353.6	348.6
Peso de material seco + recipiente	0.1g	336.3	274.0	303.3	363.1	327.2	312.4
Peso de agua	0.1g	24.6	37.7	24.5	46.5	26.4	36.2
Peso de material seco	0.1g	270.0	236.4	269.6	322.4	290.8	270.5
Contenido de humedad	0.1%	9.1	15.9	9.1	14.4	9.1	13.4
Densidad Seca	0.01g/cm3	1.63	1.66	1.67	1.69	1.81	1.83
Peso unitario seco γ_d	0.1kN/m3	16.0	16.3	16.4	16.6	17.7	17.9

Nota. En la tabla 105, se presenta los datos de contenido de humedad, densidad seca y el peso unitario seco de C4-E2

Tabla 106

Expansión de C4-E2

III.- DETERMINACIÓN DE LA EXPANSION													
Fecha y hora de lectura dd/mm/aaaa hhmm	Tiempo 1h	Dial Espécimen 2			Dial Espécimen 4			Dial Espécimen 6					
		Lectura acumulada		Expansión	Lectura acumulada		Expansión	Lectura acumulada		Expansión			
		Directa	mm (0.01mm)	mm (0.01mm)	% 0.1%	Directa	mm (0.01mm)	mm (0.01mm)	% 0.1%	Directa	mm (0.01mm)	mm (0.01mm)	%
18/08/2025 12:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
19/08/2025 12:00	24	-	0.02	0.02	0.0	-	0.01	0.01	0.0	-	0.01	0.01	0.0
20/08/2025 12:00	28	-	0.02	0.02	0.0	-	0.01	0.01	0.0	-	0.01	0.01	0.0
21/08/2025 12:00	72	-	0.02	0.02	0.0	-	0.01	0.01	0.0	-	0.01	0.01	0.0
22/08/2025 12:00	96	-	0.04	0.04	0.0	-	0.01	0.01	0.0	-	0.01	0.01	0.0

Nota. En la tabla 106, se presenta las días y fechas realizado el ensayo junto a sus lecturas de diales durante los 4 días de ensayo de C4-

E2.

Tabla 107

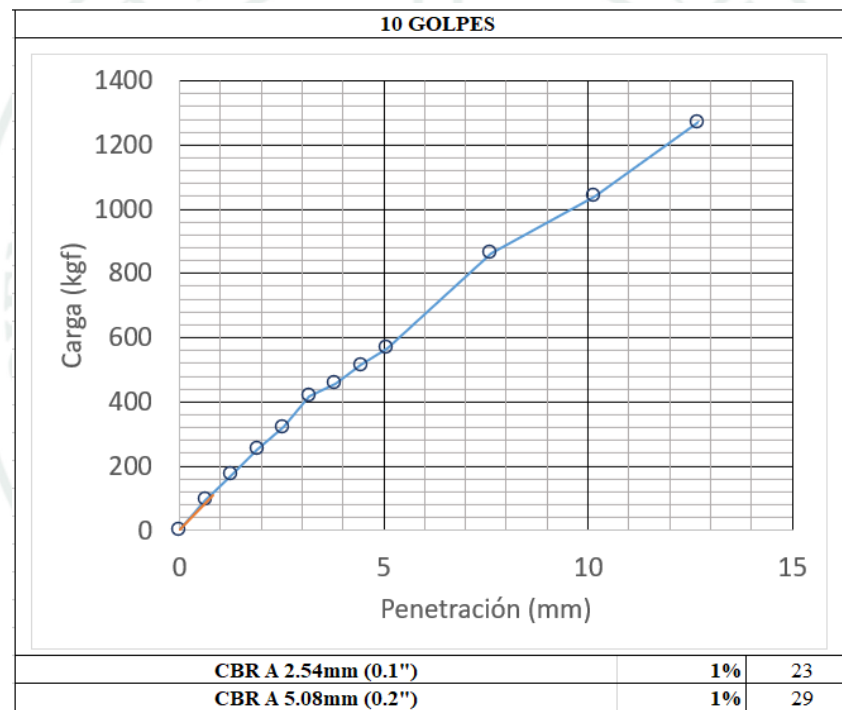
Penetración C4-E2

IV.- PENETRACION																
Penetración		Velocidad de ensayo	Tiempo de carga	Esfuerzo Estándar	Especimen 2 Saturado			Especimen 4 Saturado			Especimen 6 Saturado					
					Carga	Corrección	% CBR	Carga	Corrección	% CBR	Carga	Corrección	% CBR			
0.001 in	0.01 mm	0.01mm /min	0.1m in	0.1M pa	Dial (div)	0.1k gf	0.1kgf	1%	Dial (div)	0.1k gf	0.1kgf	1%	Dial (div)	0.1k gf	0.1kgf	1%
0.000	0.00	1.27	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.025	0.64	1.27	0.5	-	-	95.7	-	-	-	265.2	-	-	-	198.8	-	-
0.050	1.27	1.27	1.0	-	-	172.7	-	-	-	535.4	-	-	-	572.7	-	-
0.075	1.91	1.27	1.5	-	-	253.3	-	-	-	798.8	-	-	-	102.4	-	-
0.100	2.54	1.27	2.0	6.9	-	321.7	323.0	23	-	102.0	1010.6	73	-	144.0	1598.8	116
0.125	3.18	1.27	2.5	-	-	419.1	-	-	-	121.8	-	-	-	183.4	-	-
0.150	3.81	1.27	3.0	-	-	458.2	-	-	-	138.6	-	-	-	218.5	-	-
0.175	4.45	1.27	3.5	-	-	514.6	-	-	-	155.8	-	-	-	248.9	-	-
0.200	5.08	1.27	4.0	10.3	-	567.4	593.6	29	-	171.7	1710.0	83	-	274.8	2745.9	133
0.300	7.62	1.27	6.0	-	-	864.3	-	-	-	216.7	-	-	-	342.6	-	-
0.400	10.16	1.27	8.0	-	-	103.9	-	-	-	248.1	-	-	-	390.6	-	-
0.500	12.70	1.27	10.0	-	-	127.1	-	-	-	271.2	-	-	-	433.5	-	-

V.- GRÁFICAS CBR

Figura 23

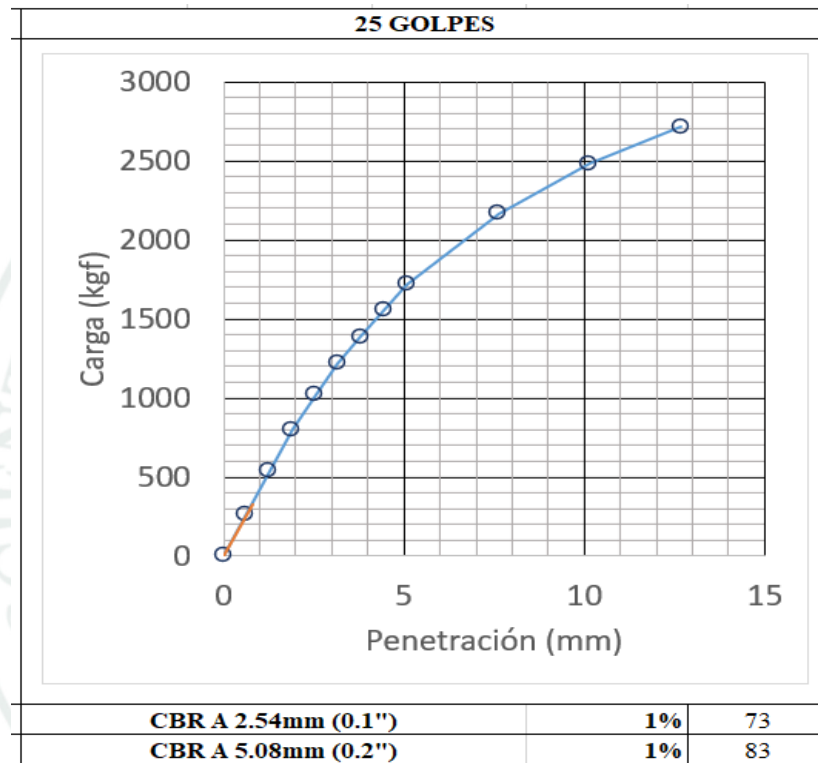
Curvas CBR de 10 golpes de C4-E2



Nota. En la figura 23, se ilustra la curva de CBR (penetración vs. Carga) de 10 golpes para C4-E2.

Figura 24

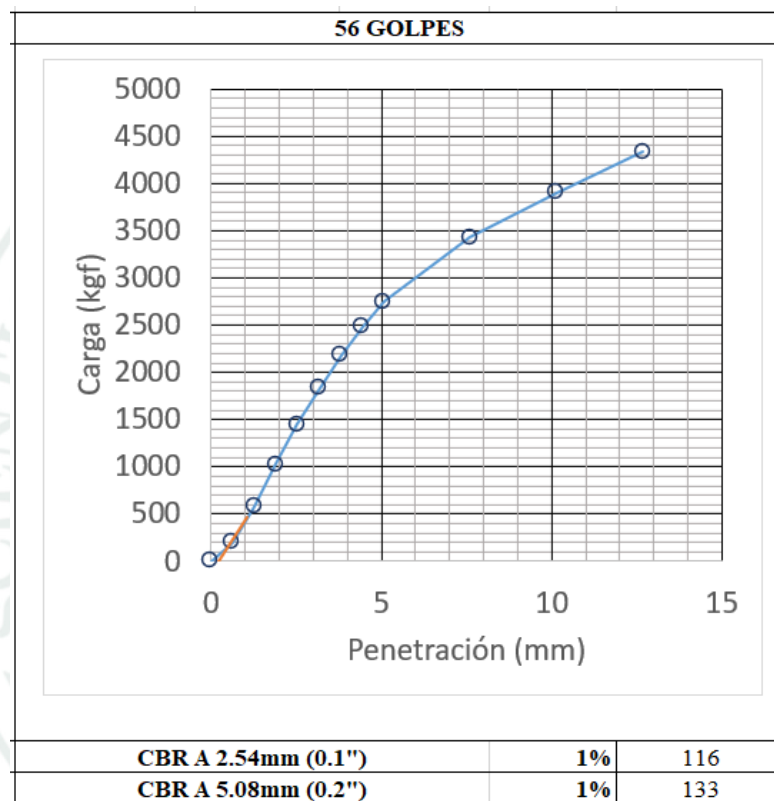
Curvas CBR de 25 golpes de C4-E2



Nota. En la figura 24, se ilustra la curva de CBR (penetración vs. Carga) de 25 golpes para C4-E2.

Figura 25

Curvas CBR de 56 golpes de C4-E2



Nota. En la figura 25, se ilustra la curva de CBR (penetración vs. Carga) de 56 golpes para C4-E2.

Tabla 108*Resultados de compactación C4-E2*

VI.- RESULTADOS DE COMPACTACION		
Método de compactación	-	Proctor Modificado
Peso unitario seco máximo	0.1kN/m3	18.5
95% del Peso unitario máximo	0.1kN/m3	17.6
Optimo contenido de humedad	0.1%	11.3

Nota. En la tabla 108, se muestra los resultados de compactación para el CBR de C4-E2.

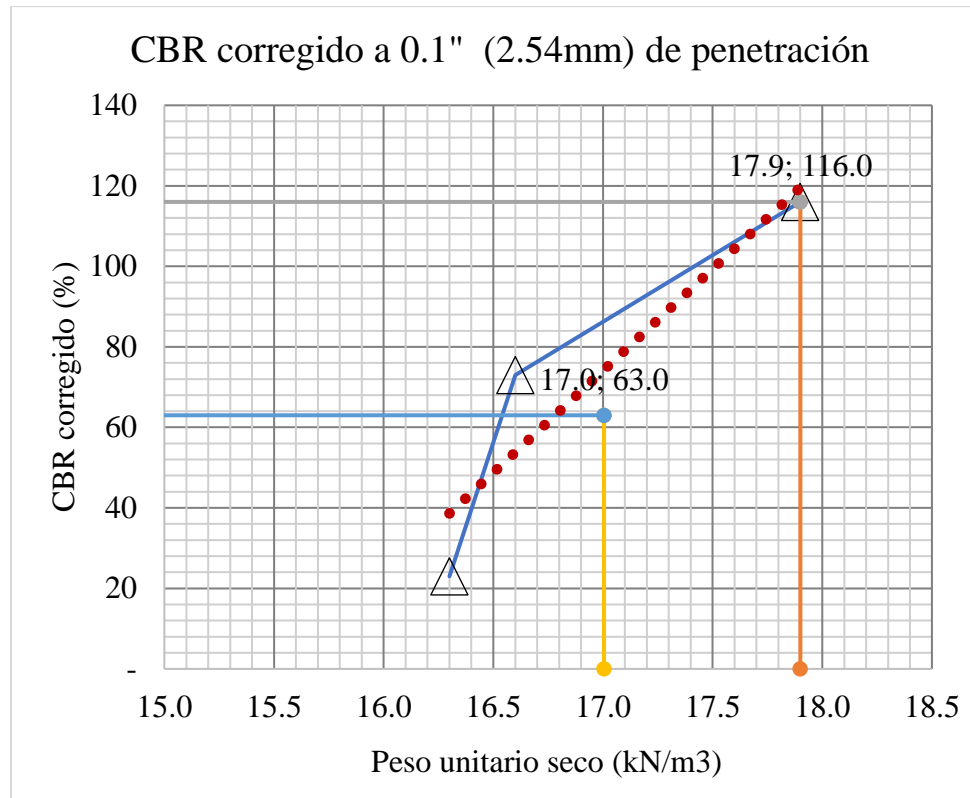
Tabla 109*Resultados de CBR de C4-E2*

VII.- RESULTADOS DE CBR							
Nro. golpes	De	CBR corregido a 0.1"	CBR corregido a 0.2"	Peso unitario seco	Contenido de Humedad	% Compactación	% de expansión
1		1%	1%	0.1kN/m3	0.1%	1%	0.1%
10		23	29	16.3	15.9	88	0.0
25		73	83	16.6	14.4	90	0.0
56		116	133	17.9	13.4	97	0.0

Nota. En la tabla 109, se detalla los resultados de CBR de C4-E2 mostrando los datos de CBR corregido para 0.1" y 0.2" junto al contenido de humedad, p.u. seco, % de compactación y % de expansión.

Figura 26

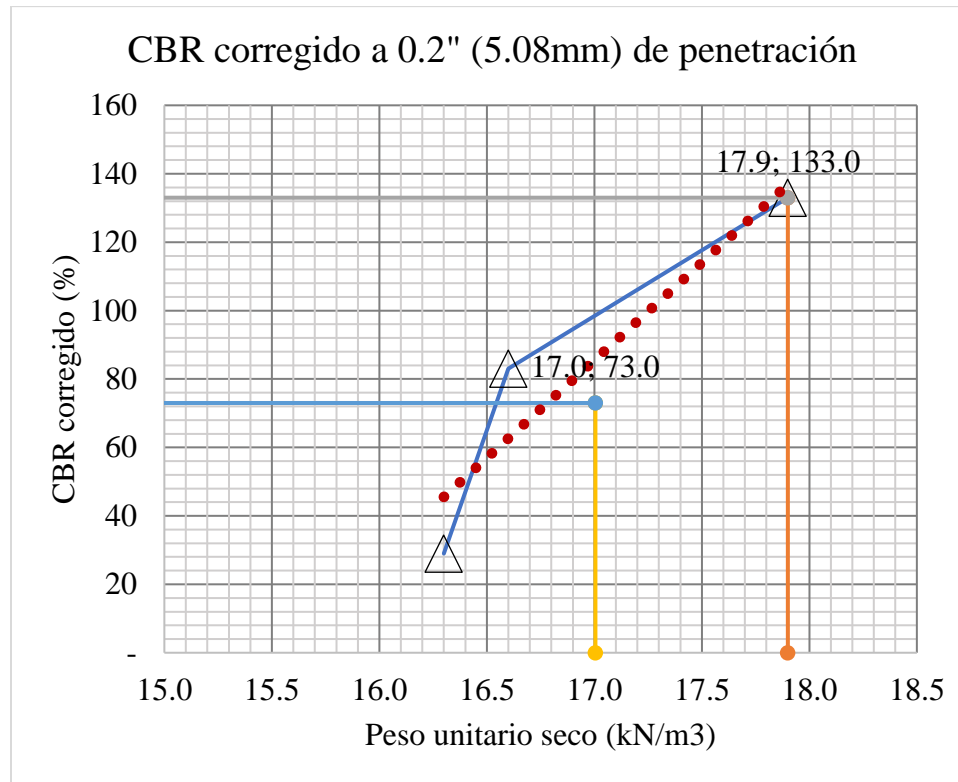
Línea de CBR corregido para 0.1" de penetración de C4-E2



Nota. En la figura 26, se ilustra la gráfica de CBR corregido Vs. El peso unitario seco y como resultado la línea de CBR corregido para 0.1" de penetración del suelo C4-E2.

Figura 27

Línea de CBR corregido para 0.2" de penetración de C4-E2



Nota. En la figura 27, se ilustra la gráfica de CBR corregido Vs. El peso unitario seco y como resultado la línea de CBR corregido para 0.2" de penetración del suelo C4-E2.

CBR de C6-E2

Tabla 110

Curva relación humedad - Peso unitario seco - Saturación de C6-E2

I.- COMPACTACION Y DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD HÚMEDA							
Espécimen	-	Espécimen 1 Sin saturar	Espécimen 2 Para saturar	Espécimen 3 Sin saturar	Espécimen 4 Para saturar	Espécimen 5 Sin saturar	Espécimen 6 Para saturar
Nro. De capas	Nro.		5		5		5
Golpes por capa	Nro.		10		25		56
Nro. De molde calibrado	-		F		U		180
Diámetro interior promedio del molde SIN ANILLO		152.60	152.60	152.74	152.74	152.48	152.48
Altura promedio del molde calibrado SIN ANILLO		180.13	180.13	180.17	180.17	180.00	180.00
Peso de molde calibrado SIN ANILLO SIN DISCO ESP.	1g	7972	7972	7863	7863	7950	7950
Nro. De disco espaciador calibrado	-		C		C		C
Altura del disco espaciador calibrado	0.01m m	61.63	61.63	61.63	61.63	61.63	61.63
Volumen total del molde calibrado SIN ANILLO	1cm3	3294	3294	3301	3301	3287	3287
Volumen del disco espaciador	1cm3	1127	1127	1129	1129	1125	1125
Volumen neto del molde calibrado SIN ANILLO	1cm3	2167	2167	2172	2172	2162	2162
Volumen neto máx. del molde calibrado SIN ANILLO	1cm3	2149	2149	2149	2149	2149	2149
Volumen neto mín. del molde calibrado SIN ANILLO	1cm3	2099	2099	2099	2099	2099	2099
Peso de molde + suelo húmedo SIN ANILLO, SIN DISCO ESP.	1g	11966	12072	12194	12335	12373	12422
Peso del suelo húmedo	1g	3994	4100	4331	4472	4423	4472
Densidad húmeda	0.01g/c m3	1.84	1.89	1.99	2.06	2.05	2.07

Nota. En la tabla 110, se presenta los datos tomados en laboratorio de compactación para determinar la densidad humedad de C6-E2,

teniendo en cuenta que se debe trabajar con el Método C.

Tabla 111*Humedad y densidad seca de C6-E2*

II.- DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD Y DENSIDAD SECA							
		Sin saturar	Saturado	Sin saturar	Saturado	Sin saturar	Saturado
Recipiente Nro.	Nro.	1	1	2	2	3	3
Peso del recipiente	0.1g	41.4	46.9	64.6	39.2	66.5	82.7
Peso del material húmedo + recipiente	0.1g	198.9	615.0	286.0	352.3	440.1	638.8
Peso de material seco + recipiente	0.1g	184.6	549.9	265.8	317.5	406.2	580.6
Peso de agua	0.1g	14.3	65.1	20.2	34.8	33.9	58.2
Peso de material seco	0.1g	143.2	503.0	201.2	278.3	339.7	497.9
Contenido de humedad	0.1%	10.0	12.9	10.0	12.5	10.0	11.7
Densidad Seca	0.01g/cm ³	1.68	1.67	1.81	1.83	1.86	1.85
Peso unitario seco γ_d	0.1kN/m ³	16.4	16.4	17.8	17.9	18.2	18.2

Nota. En la tabla 111, se presenta los datos de contenido de humedad, densidad seca y el peso unitario seco de C6-E2.

Tabla 112*Expansión de C6-E2*

III.- DETERMINACIÓN DE LA EXPANSION													
Fecha y hora de lectura dd/mm/aaaa hhmm	Tiempo lh	Dial Espécimen 2				Dial Espécimen 4				Dial Espécimen 6			
		Lectura acumulada		Expansión		Lectura acumulada		Expansión		Lectura acumulada		Expansión	
		Directa	mm (0.01mm)	mm (0.01mm)	% 0.1%	Directa	mm (0.01mm)	mm (0.01mm)	% 0.1%	Directa	mm (0.01mm)	mm (0.01mm)	%
18/08/2025 12:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/2025 12:00	24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20/08/2025 12:00	28	-	0.01	0.01	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-
21/08/2025 12:00	72	-	0.01	0.01	0.0	-	0.01	0.01	0.0	-	0.01	0.01	0.0
22/08/2025 12:00	96	-	0.01	0.01	0.0	-	0.01	0.01	0.0	-	0.01	0.01	0.0

Nota. En la tabla 112, se presenta las días y fechas realizado el ensayo junto a sus lecturas de diales durante los 4 días de ensayo de C6-

E2.

Tabla 113

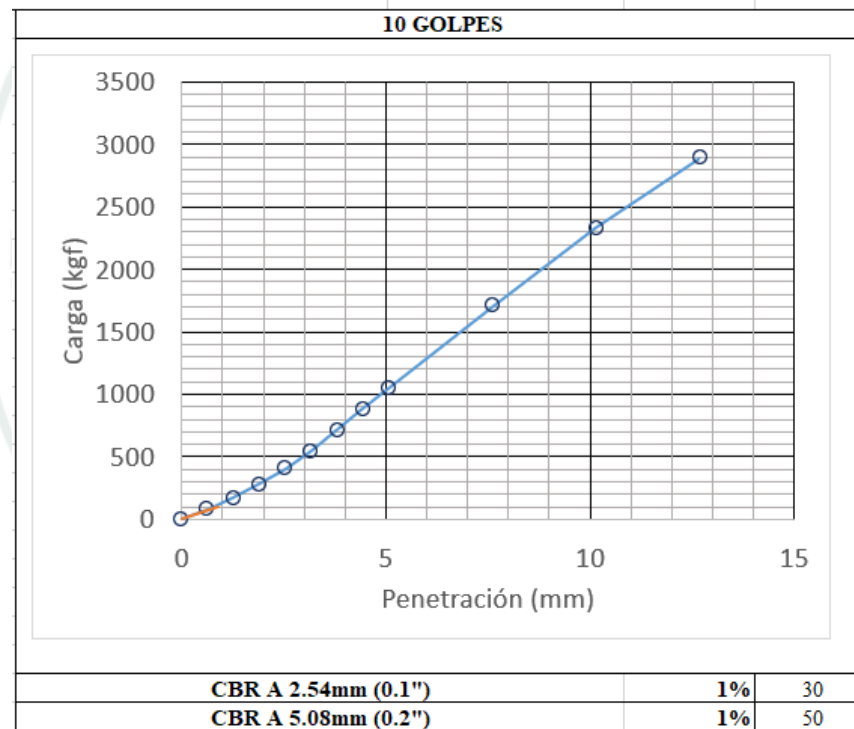
Penetración de C6-E2

IV.- PENETRACION																
Penetración	Velocidad de ensayo	Tiempo de carga	Esfuerzo Estándar	Especimen 2 Saturado					Especimen 4 Saturado				Especimen 6 Saturado			
				Carga	Corrección	% CBR	Carga	Corrección	% CBR	Carga	Corrección	% CBR				
0.001 in	0.01 mm	0.01mm /min	0.1m in	0.1M pa	Dial (div)	0.1k gf	0.1kgf	1%	Dial (div)	0.1k gf	0.1kgf	1%	Dial (div)	0.1k gf	0.1kgf	1%
0.000	0.00	1.27	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.025	0.64	1.27	0.5	-	-	82.0	-	-	-	156.4	-	-	-	103.9	-	-
0.050	1.27	1.27	1.0	-	-	171.2	-	-	-	421.9	-	-	-	269.8	-	-
0.075	1.91	1.27	1.5	-	-	275.6	-	-	-	706.5	-	-	-	567.7	-	-
0.100	2.54	1.27	2.0	6.9	-	405.3	421.4	30	-	1027.6	1074.9	78	-	923.7	1241.6	90
0.125	3.18	1.27	2.5	-	-	543.3	-	-	-	1334.4	-	-	-	1309.2	-	-
0.150	3.81	1.27	3.0	-	-	714.4	-	-	-	1660.7	-	-	-	1701.8	-	-
0.175	4.45	1.27	3.5	-	-	879.9	-	-	-	1983.2	-	-	-	2135.3	-	-
0.200	5.08	1.27	4.0	10.3	-	1050.6	1026.1	50	-	2280.3	2310.7	112	-	2513.2	2910.0	141
0.300	7.62	1.27	6.0	-	-	1708.8	-	-	-	3428.9	-	-	-	3974.0	-	-
0.400	10.16	1.27	8.0	-	-	2330.6	-	-	-	4533.3	-	-	-	-	-	-

V.- GRÁFICAS CBR

Figura 28

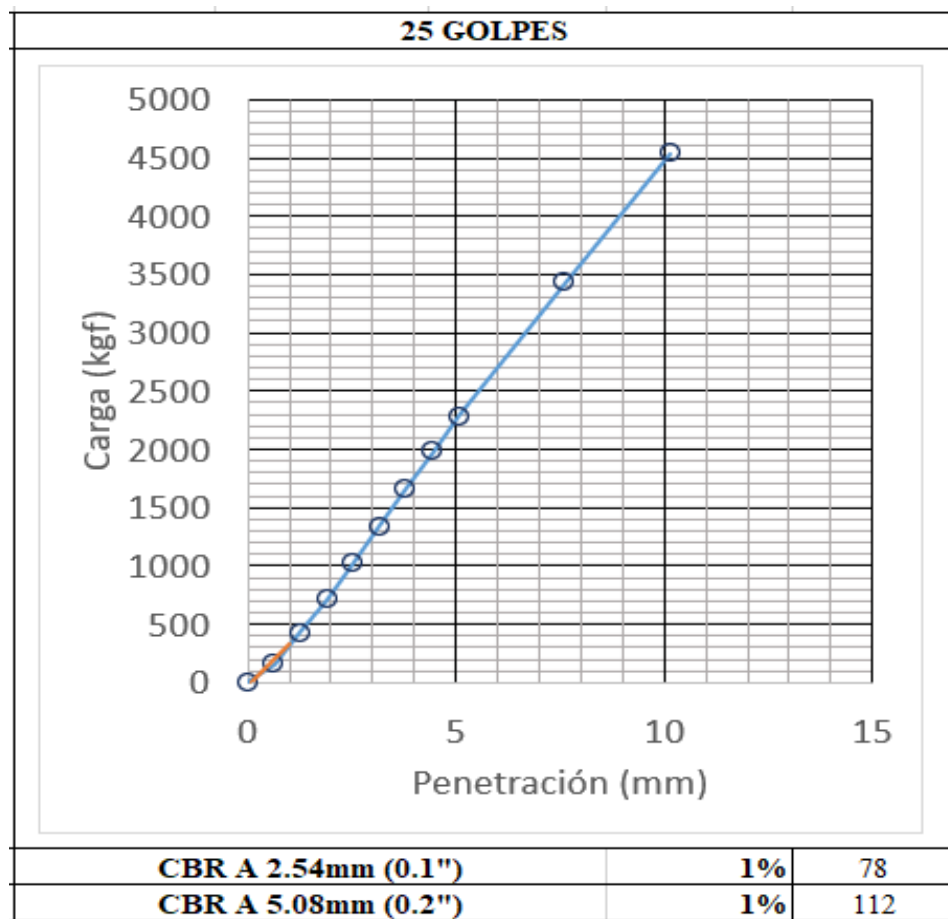
Curvas CBR de 10 golpes de C6-E2



Nota. En la figura 28, se presenta la curva de CBR (penetración vs. Carga) de 10 golpes para C6-E2.

Figura 29

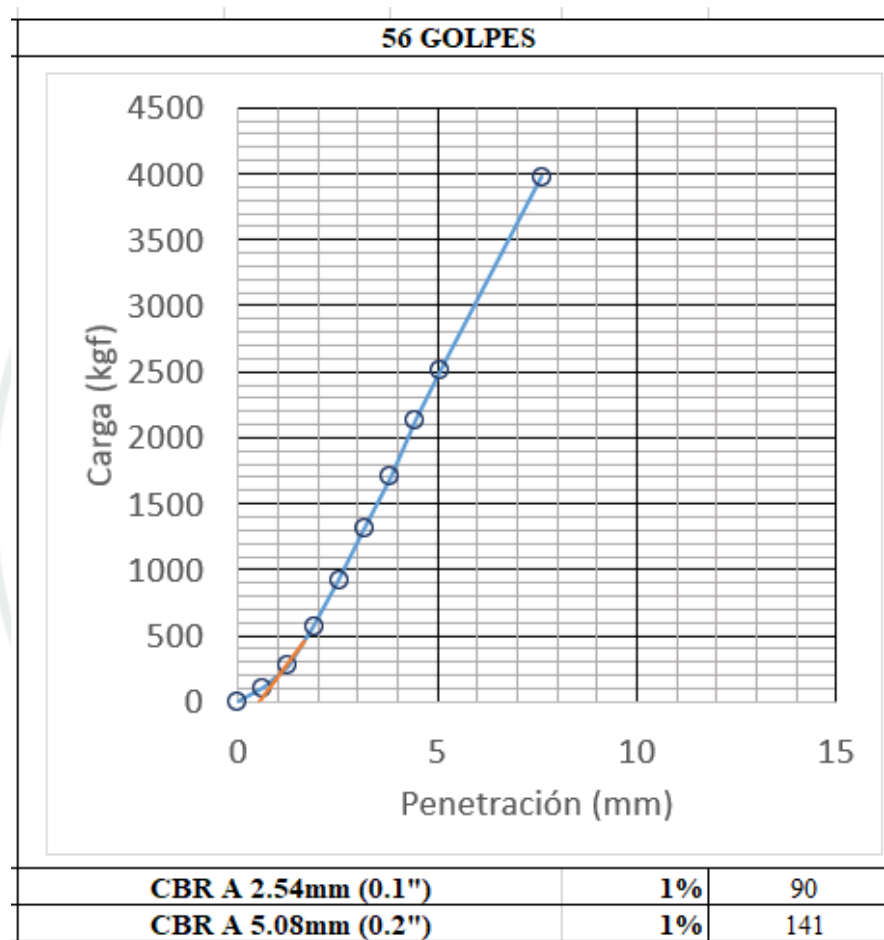
Curvas CBR de 25 golpes de C6-E2



Nota. En la figura 29, se presenta la curva de CBR (penetración vs. Carga) de 25 golpes para C6-E2.

Figura 30

Curvas CBR de 56 golpes de C6-E2



Nota. En la figura 30, se presenta la curva de CBR (penetración vs. Carga) de 56 golpes para C6-E2.

Tabla 114*Resultados de compactación de C6-E2*

VI.- RESULTADOS DE COMPACTACION	
Método de compactación	Proctor Modificado
Peso unitario seco máximo	0.1kN/m3 16.6
95% del Peso unitario máximo	0.1kN/m3 15.8
Optimo contenido de humedad	0.1% 12.5

Nota. En la tabla 114, se detalla los resultados de compactación para el CBR de C6-E2.

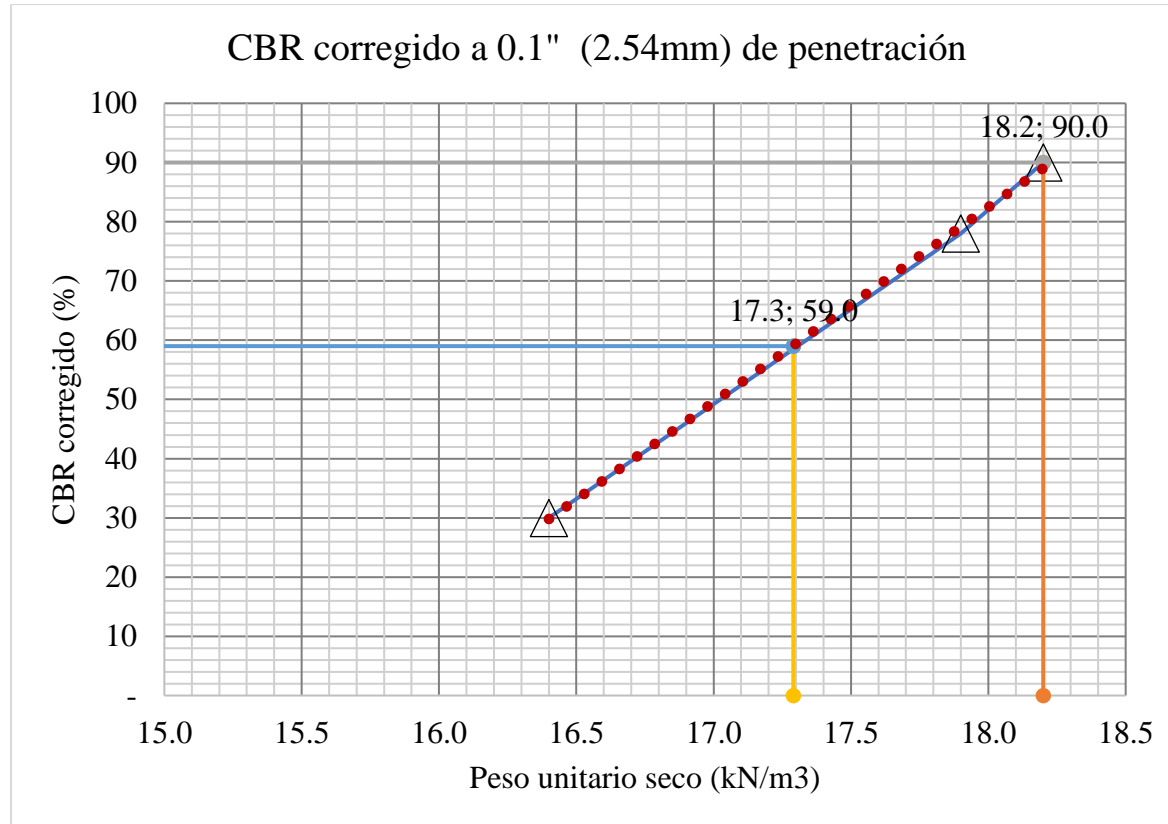
Tabla 115*Resultados de CBR de C6-E2*

VII.- RESULTADOS DE CBR						
Nro. De golpes	CBR corregido a 0.1"	CBR corregido a 0.2"	Peso unitario seco	Contenido de Humedad	% Compactación	% de expansión
1	1%	1%	0.1kN/m3	0.1%	1%	0.1%
10	30	50	16.4	12.9	99	0.0
25	78	112	17.9	12.5	108	0.0
56	90	141	18.2	11.7	110	0.0

Nota. En la tabla 115, se presenta los resultados de CBR de C6-E2 mostrando los datos de CBR corregido para 0.1" y 0.2" junto al contenido de humedad, peso unitario seco, % de compactación y % de expansión.

Figura 31

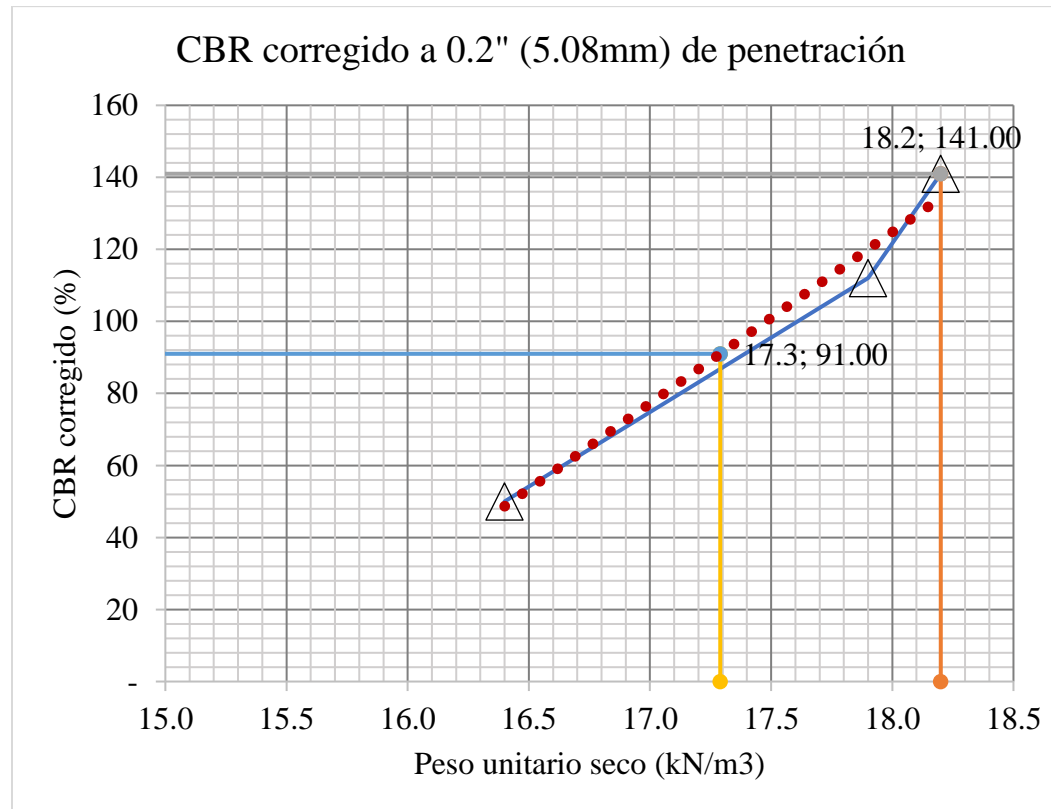
Línea de CBR corregido para 0.1" de penetración de C6-E2



Nota. En la figura 31, se presenta la gráfica de CBR corregido Vs. El peso unitario seco y como resultado la línea de CBR corregido para 0.1" de penetración del suelo C6-E2.

Figura 32

Línea de CBR corregido para 0.2" de penetración de C6-E2



Nota. En la figura 32, se presenta la gráfica de CBR corregido Vs. El peso unitario seco y como resultado la línea de CBR corregido para 0.2" de penetración del suelo C6-E2.

CBR mezcla parcial

CBR de C2-E2 (20%)

Tabla 116

Curva relación humedad - Peso unitario seco - Saturación de C2-E2 (20%)

I.- COMPACTACION Y DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD HÚMEDA							
Espécimen	-	Espécimen 1 Sin saturar	Espécimen 2 Para saturar	Espécimen 3 Sin saturar	Espécimen 4 Para saturar	Espécimen 5 Sin saturar	Espécimen 6 Para saturar
Nro. De capas	Nro.	5	5	5	5	5	5
Golpes por capa	Nro.	10	10	25	25	56	56
Nro. De molde calibrado	-	F	F	U	U	180	180
Diámetro interior promedio del molde SIN ANILLO		152.28	152.28	152.66	152.66	152.56	152.56
Altura promedio del molde calibrado SIN ANILLO		180.73	180.73	180.27	180.27	178.73	178.73
Peso de molde calibrado SIN ANILLO SIN DISCO ESP.	1g	7780	7780	7965	7965	8286	8286
Nro. De disco espaciador calibrado	-	C	C	C	C	C	C
Altura del disco espaciador calibrado	0.01mm	61.93	61.93	61.93	61.93	61.93	61.93
Volumen total del molde calibrado SIN ANILLO	1cm ³	3292	3292	3300	3300	3267	3267
Volumen del disco espaciador	1cm ³	1128	1128	1134	1134	1132	1132
Volumen neto del molde calibrado SIN ANILLO	1cm ³	2164	2164	2166	2166	2135	2135
Volumen neto máx. del molde calibrado SIN ANILLO	1cm ³	2149	2149	2149	2149	2149	2149
Volumen neto mín. del molde calibrado SIN ANILLO	1cm ³	2099	2099	2099	2099	2099	2099
Peso de molde + suelo húmedo SIN ANILLO, SIN DISCO ESP.	1g	11886	12098	12175	12671	12476	12984
Peso del suelo húmedo	1g	4106	4318	4210	4706	4190	4698
Densidad húmeda	0.01g/c m ³	1.90	2.00	1.94	2.17	1.96	2.20

Nota. En la tabla 116, se presenta los datos tomados en laboratorio de compactación para determinar la densidad humedad de C2-E2 (20%), teniendo en cuenta que se debe trabajar con el Método C.

Tabla 117*Humedad y densidad seca de C2-E2 (20%)*

II.- DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD Y DENSIDAD SECA							
		Sin saturar	Saturado	Sin saturar	Saturado	Sin saturar	Saturado
Recipiente Nro.	Nro.	1	1	2	2	3	3
Peso del recipiente	0.1g	52.0	53.0	72.0	125.0	53.0	125.0
Peso del material húmedo + recipiente	0.1g	197.0	191.0	204.0	264.0	179.0	258.0
Peso de material seco + recipiente	0.1g	173.0	162.0	187.0	234.0	168.0	235.0
Peso de agua	0.1g	24.0	29.0	17.0	30.0	11.0	23.0
Peso de material seco	0.1g	121.0	109.0	115.0	109.0	115.0	110.0
Contenido de humedad	0.1%	19.8	26.6	14.8	27.5	9.6	20.9
Densidad Seca	0.01g/cm3	1.58	1.58	1.69	1.70	1.79	1.82
Peso unitario seco γ_d	0.1kN/m3	15.5	15.5	16.6	16.7	17.6	17.8

Nota. En la tabla 117, se presenta los datos de contenido de humedad, densidad seca y el peso unitario seco de C2-E2 (20%).

Tabla 118*Expansión de C2-E2 (20%)*

III.- DETERMINACIÓN DE LA EXPANSION													
Fecha y hora de lectura dd/mm/aaaa hhmm	Tiempo 1h	Dial Espécimen 2				Dial Espécimen 4				Dial Espécimen 6			
		Lectura acumulada		Expansión		Lectura acumulada		Expansión		Lectura acumulada		Expansión	
		Directa	mm (0.01mm)	mm (0.01mm)	% 0.1%	Directa	mm (0.01mm)	mm (0.01mm)	% 0.1%	Directa	mm (0.01mm)	mm (0.01mm)	%
18/08/2025 12:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
19/08/2025 12:00	24	-	0.02	0.02	0.0	-	0.02	0.02	0.0	-	0.01	0.01	0.0
20/08/2025 12:00	28	-	0.02	0.02	0.0	-	0.02	0.02	0.0	-	0.02	0.02	0.0
21/08/2025 12:00	72	-	0.03	0.03	0.0	-	0.02	0.02	0.0	-	0.02	0.02	0.0
22/08/2025 12:00	96	-	0.03	0.03	0.0	-	0.02	0.02	0.0	-	0.02	0.02	0.0

Nota. En la tabla 118, se presenta las días y fechas realizado el ensayo junto a sus lecturas de diales durante los 4 días de ensayo de C2-

E2 (20%).

Tabla 119

Penetración de C2-E2 (20%)

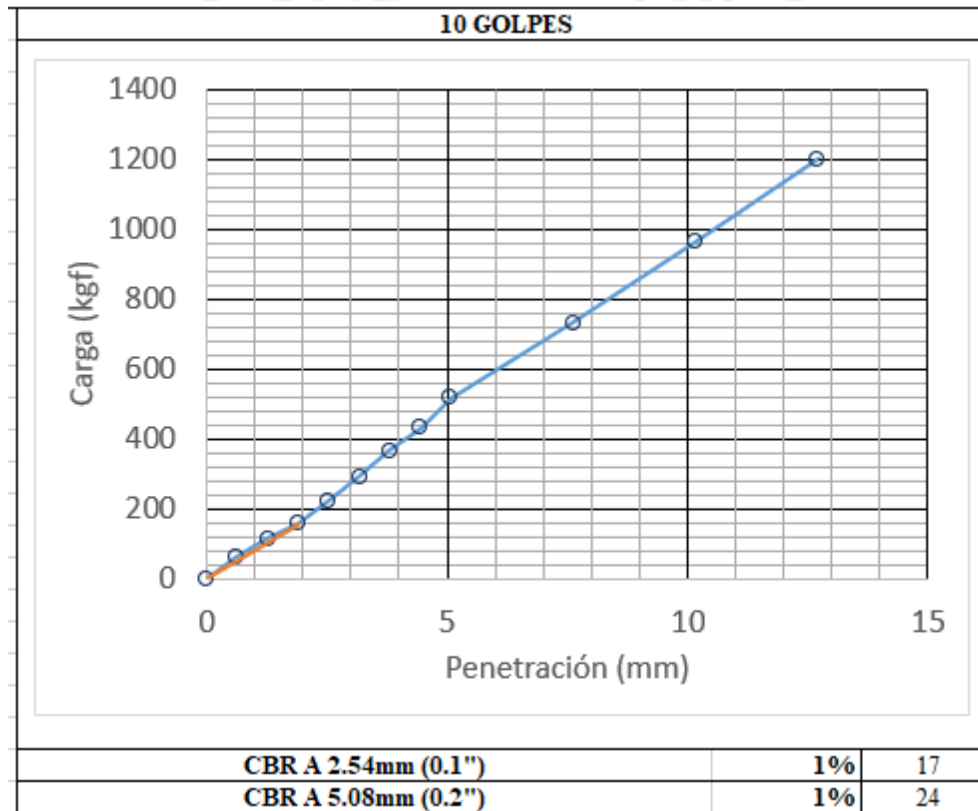
IV.- PENETRACION																
Penetración	Velocidad de ensayo	Tiempo de carga	Esfuerzo Estándar	Especimen 2 Saturado			Especimen 4 Saturado			Especimen 6 Saturado						
				Carga	Corrección	% CBR	Carga	Corrección	% CBR	Carga	Corrección	% CBR				
0.001 in	0.01 mm	0.01mm /min	0.1m in	0.1Mp a	Dial (div)	0.1k gf	0.1kgf	1%	Dial (div)	0.1k gf	0.1kgf	1%	Dial (div)	0.1k gf	0.1kgf	1%
0.000	0.00	1.27	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.025	0.64	1.27	0.5	-	-	62.3	-	-	-	235.7	-	-	-	151.7	-	-
0.050	1.27	1.27	1.0	-	-	112.1	-	-	-	455.3	-	-	-	378.5	-	-
0.075	1.91	1.27	1.5	-	-	155.7	-	-	-	693.6	-	-	-	654.2	-	-
0.100	2.54	1.27	2.0	6.9	-	221.6	236.7	17	-	925.4	928.4	67	-	100.5	1311.7	95
0.125	3.18	1.27	2.5	-	-	290.0	-	-	-	111.8	-	-	-	139.4	-	-
0.150	3.81	1.27	3.0	-	-	364.0	-	-	-	130.2	-	-	-	175.3	-	-
0.175	4.45	1.27	3.5	-	-	432.2	-	-	-	143.8	-	-	-	214.3	-	-
0.200	5.08	1.27	4.0	10.3	-	517.3	487.0	24	-	155.2	1545.7	75	-	252.1	2503.7	121
0.300	7.62	1.27	6.0	-	-	730.1	-	-	-	191.4	-	-	-	335.0	-	-
0.400	10.16	1.27	8.0	-	-	961.7	-	-	-	220.3	-	-	-	384.9	-	-
0.500	12.70	1.27	10.0	-	-	120.1	-	-	-	249.8	-	-	-	426.8	-	-

Nota. En la tabla 119, se presenta los datos de la penetración de C2-E2 (20%), donde también se puede visualizar la carga y el % de CBR.

V.- GRÁFICAS CBR

Figura 33

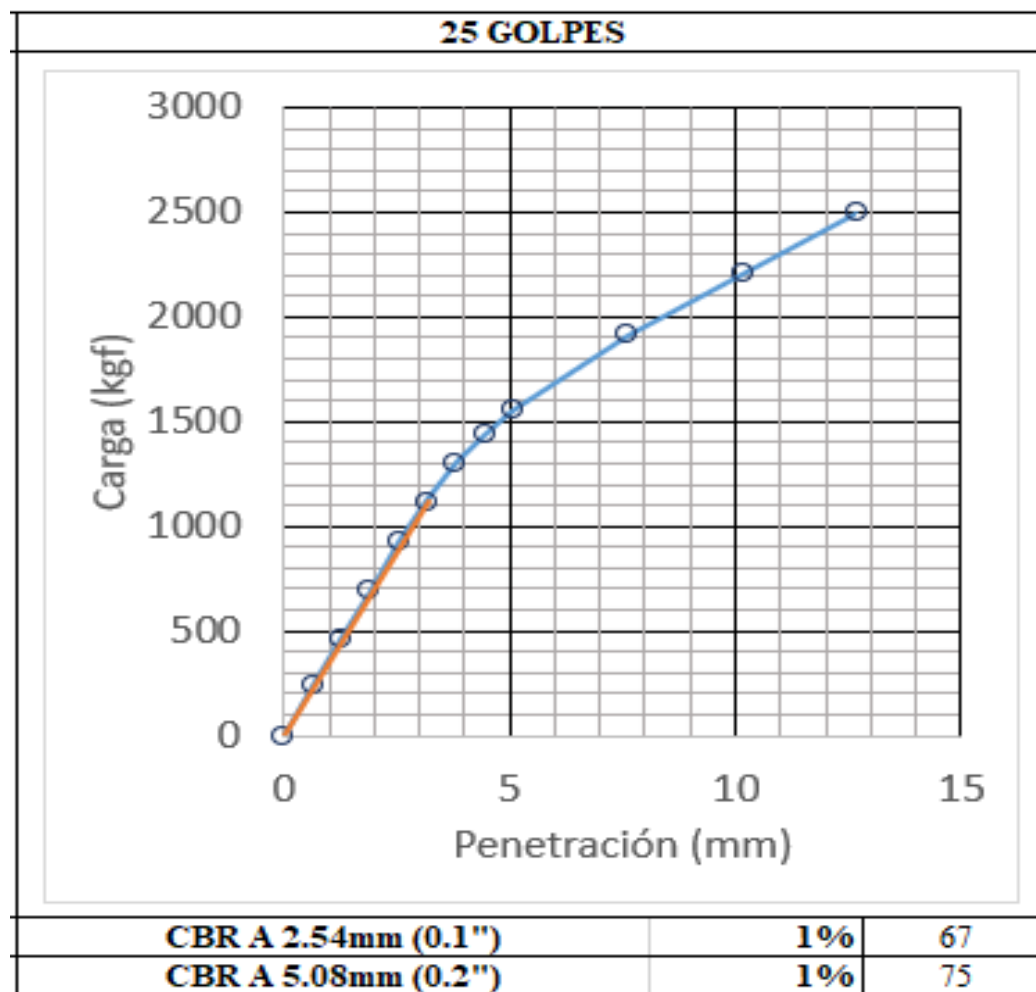
Curvas CBR de 10 golpes de C2-E2 (20%)



Nota. En la figura 33, se presenta la curva de CBR (penetración vs. Carga) de 10 golpes para C2-E2 (20%).

Figura 34

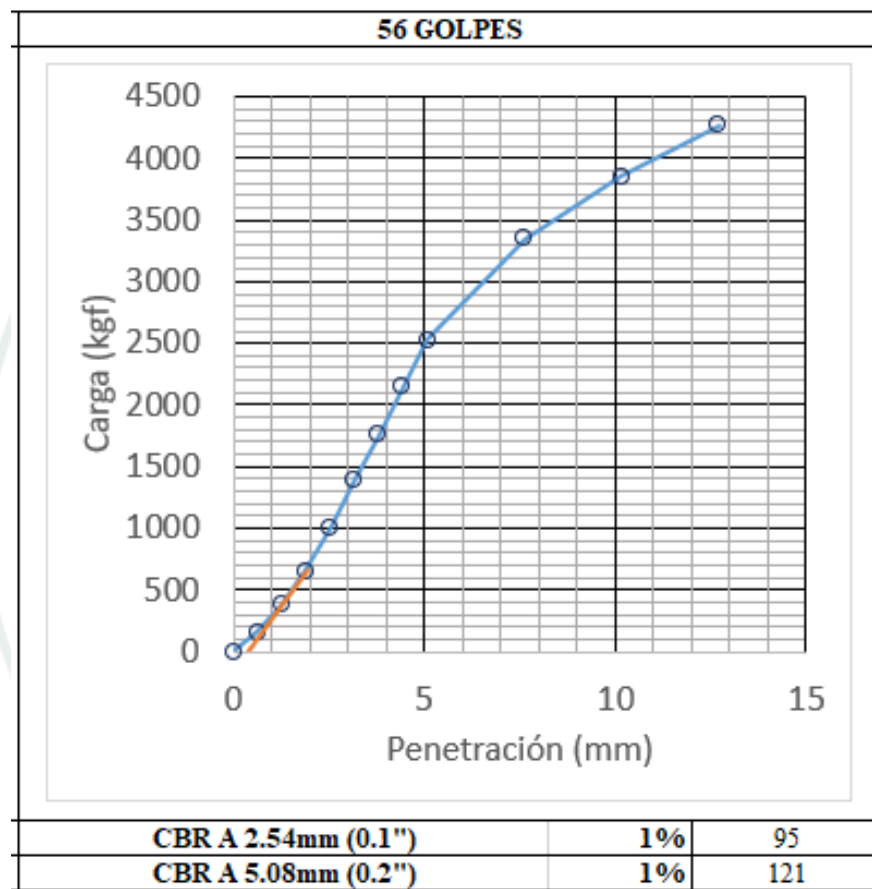
Curvas CBR de 25 golpes de C2-E2 (20%)



Nota. En la figura 34, se presenta la curva de CBR (penetración vs. Carga) de 25 golpes para C2-E2 (20%).

Figura 35

Curvas CBR de 56 golpes de C2-E2 (20%)



Nota. En la figura 35, se presenta la curva de CBR (penetración vs. Carga) de 56 golpes para C2-E2 (20%).

Tabla 120*Resultados de compactación de C2-E2 (20%)*

VI.- RESULTADOS DE COMPACTACION		
Método de compactación	-	Proctor Modificado
Peso unitario seco máximo	0.1kN/m3	14.3
95% del Peso unitario máximo	0.1kN/m3	13.6
Optimo contenido de humedad	0.1%	19.8

Nota. En la tabla 120, se detalla los resultados de compactación para el CBR de C2-E2 (20%).

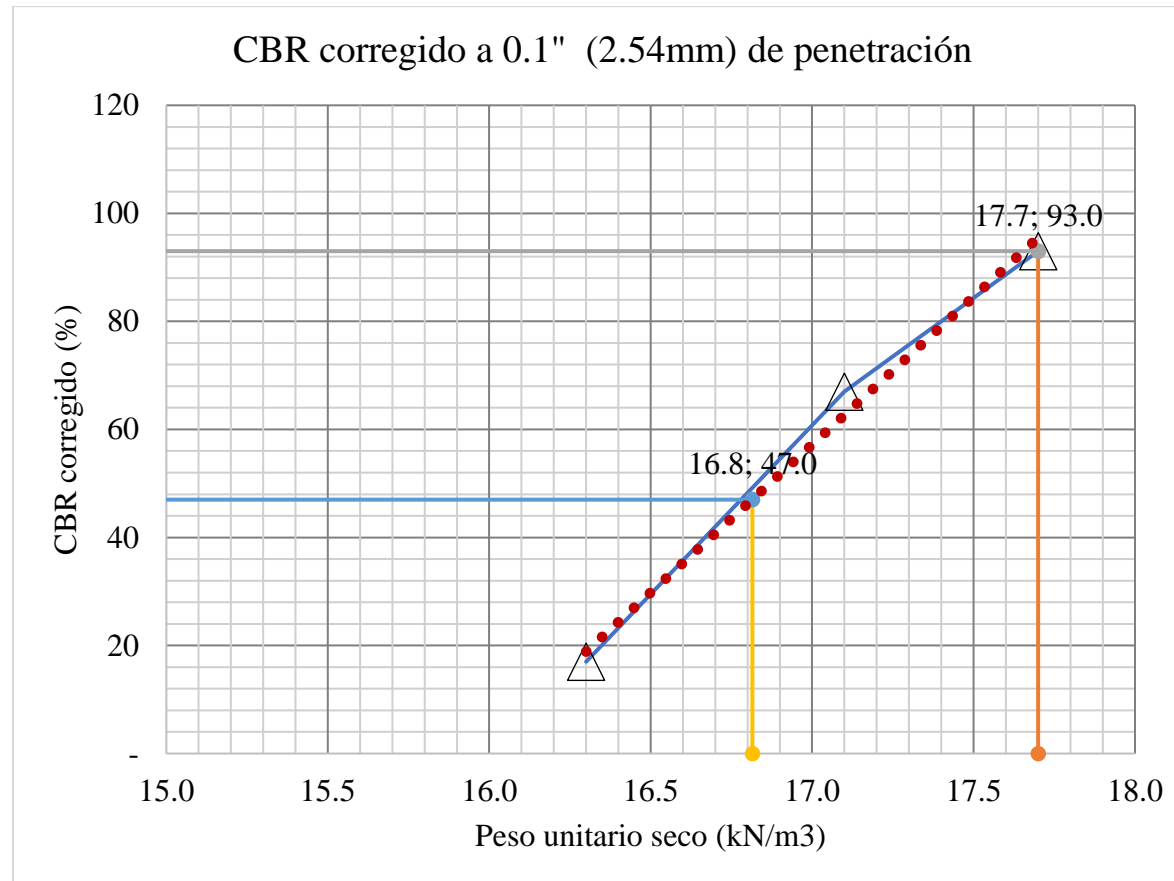
Tabla 121*Resultados de CBR de C2-E2 (20%)*

VII.- RESULTADOS DE CBR						
Nro. De golpes	CBR corregido a 0.1"	CBR corregido a 0.2"	Peso unitario seco	Contenido de Humedad	% Compactación	% de expansión
1	1%	1%	0.1kN/m3	0.1%	1%	0.1%
10	17	24	15.5	26.6	108	0.0
25	67	75	16.7	27.5	117	0.0
56	95	121	17.8	20.9	124	0.0

Nota. En la tabla 121, se detalla los resultados de CBR de C2-E2 (20%) mostrando los datos de CBR corregido para 0.1" y 0.2" junto al contenido de humedad, peso unitario seco, % de compactación y % de expansión.

Figura 36

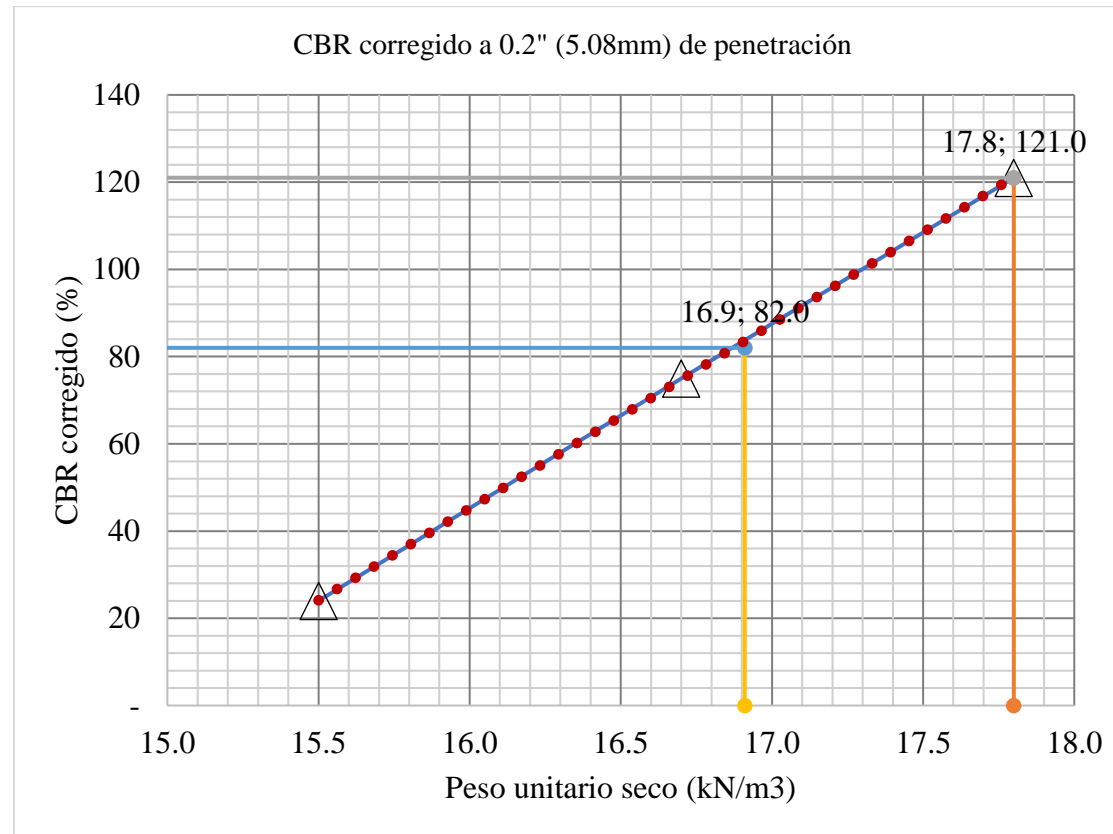
Línea de CBR corregido para 0.1" de penetración de C2-E2 (20%)



Nota. En la figura 36, se presenta la gráfica de CBR corregido Vs. El peso unitario seco y como resultado la línea de CBR corregido para 0.1" de penetración del suelo C2-E2 con un 20% de sedimento.

Figura 37

Línea de CBR corregido para 0.2" de penetración de C2-E2 (20%)



Nota. En la figura 37, se presenta la gráfica de CBR corregido Vs. El peso unitario seco y como resultado la línea de CBR corregido para 0.2" de penetración del suelo C2-E2 con un 20% de sedimento.

CBR de C4-E2 (60%)

Tabla 122

Curva relación humedad - Peso unitario seco - Saturación de C4-E2 (60%)

I.- COMPACTACION Y DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD HÚMEDA							
Espécimen	-	Espécimen 1 Sin saturar	Espécimen 2 Para saturar	Espécimen 3 Sin saturar	Espécimen 4 Para saturar	Espécimen 5 Sin saturar	Espécimen 6 Para saturar
Nro. De capas	Nro.	5		5		5	
Golpes por capa	Nro.	10		25		56	
Nro. De molde calibrado	-	F		U		180	
Diámetro interior promedio del molde SIN ANILLO		152.68	152.68	152.74	152.74	152.75	152.75
Altura promedio del molde calibrado SIN ANILLO		180.07	180.07	178.70	178.70	180.13	180.13
Peso de molde calibrado SIN ANILLO SIN DISCO ESP.	1g	7976	7976	7932	7932	8254	8254
Nro. De disco espaciador calibrado	-	C		C		C	
Altura del disco espaciador calibrado	0.01mm	61.93	61.93	61.93	61.93	61.93	61.93
Volumen total del molde calibrado SIN ANILLO	1cm3	3297	3297	3274	3274	3301	3301
Volumen del disco espaciador	1cm3	1134	1134	1135	1135	1135	1135
Volumen neto del molde calibrado SIN ANILLO	1cm3	2163	2163	2140	2140	2166	2166
Volumen neto máx. del molde calibrado SIN ANILLO	1cm3	2149	2149	2149	2149	2149	2149
Volumen neto mín. del molde calibrado SIN ANILLO	1cm3	2099	2099	2099	2099	2099	2099
Peso de molde + suelo húmedo SIN ANILLO, SIN DISCO ESP.	1g	12436	12608	12394	12634	12843	13201
Peso del suelo húmedo	1g	4460	4632	4462	4702	4589	4947
Densidad húmeda	0.01g/cm ³	2.06	2.14	2.09	2.20	2.12	2.28

Nota. En la tabla 122, se presenta los datos tomados en laboratorio de compactación para determinar la densidad humedad de C4-E2 (60%), teniendo en cuenta que se debe trabajar con el Método C

Tabla 123*Humedad y densidad seca de C4-E2 (60%)*

II.- DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD Y DENSIDAD SECA								
		Sin saturar	Saturado	Sin saturar	Saturado	Sin saturar	Saturado	
Recipiente Nro.	Nro.	1	1	2	2	3	3	
Peso del recipiente	0.1g	70.0	165.0	70.0	128.0	130.0	127.0	
Peso del material húmedo + recipiente	0.1g	181.0	273.0	210.0	255.0	252.0	240.0	
Peso de material seco + recipiente	0.1g	160.0	249.0	184.5	228.0	230.5	217.5	
Peso de agua	0.1g	21.0	24.0	25.5	27.0	21.5	22.5	
Peso de material seco	0.1g	90.0	84.0	114.5	100.0	100.5	90.5	
Contenido de humedad	0.1%	23.3	28.6	22.3	27.0	21.4	24.9	
Densidad Seca	0.01g/cm ³	1.67	1.67	1.71	1.73	1.75	1.83	
Peso unitario seco γ_d	0.1kN/m ³	16.4	16.3	16.7	17.0	17.1	17.9	

Nota. En la tabla 123, se presenta los datos de contenido de humedad, densidad seca y el peso unitario seco de C4-E2 (60%).

Tabla 124*Expansión de C4-E2 (60%)*

III.- DETERMINACIÓN DE LA EXPANSION													
Fecha y hora de lectura dd/mm/aaaa hhmm	Tiempo 1h	Dial Espécimen 2				Dial Espécimen 4				Dial Espécimen 6			
		Lectura acumulada		Expansión		Lectura acumulada		Expansión		Lectura acumulada		Expansión	
		Directa	mm (0.01mm)	mm (0.01mm)	% 0.1%	Directa	mm (0.01mm)	mm (0.01mm)	% 0.1%	Directa	mm (0.01mm)	% 0.1%	%
18/08/2025 12:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/08/2025 12:00	24	-	0.02	0.02	0.0	-	0.02	0.02	0.0	-	0.01	0.01	0.0
20/08/2025 12:00	28	-	0.03	0.03	0.0	-	0.02	0.02	0.0	-	0.01	0.01	0.0
21/08/2025 12:00	72	-	0.03	0.03	0.0	-	0.02	0.02	0.0	-	0.02	0.02	0.0
22/08/2025 12:00	96	-	0.03	0.03	0.0	-	0.03	0.03	0.0	-	0.02	0.02	0.0

Nota. En la tabla 124, se presenta las días y fechas realizado el ensayo junto a sus lecturas de diales durante los 4 días de ensayo de C4-

E2 (40%)

Tabla 125

Penetración de C4-E2 (60%)

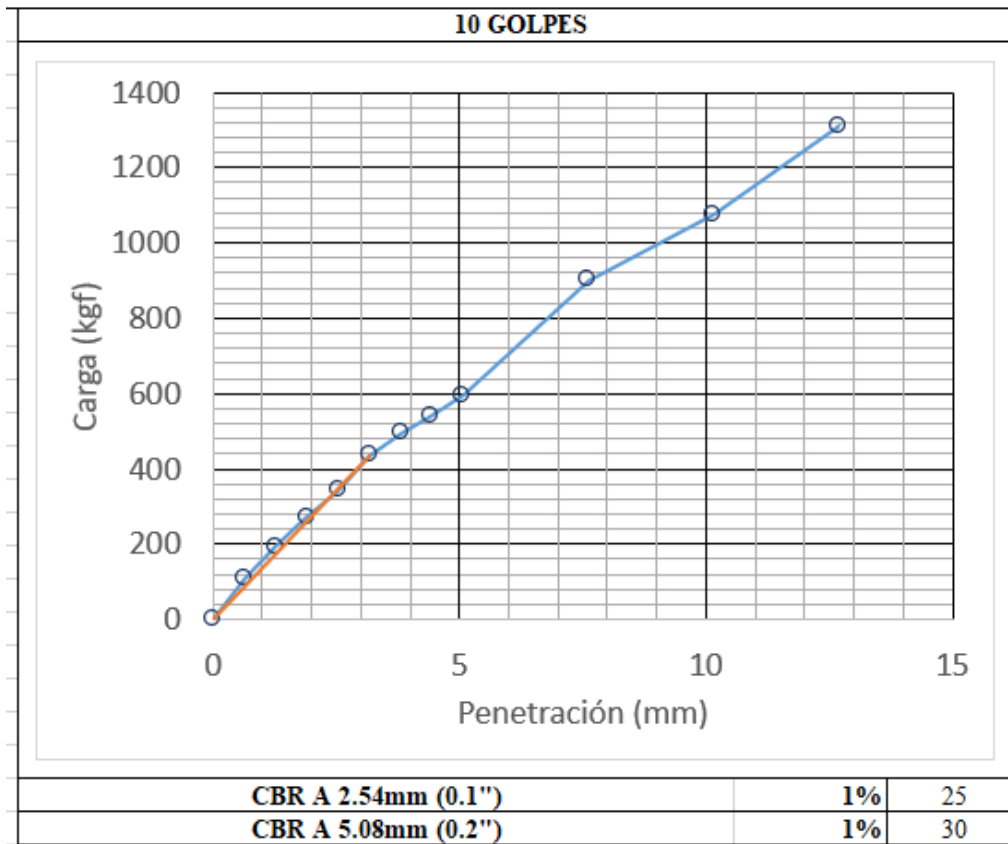
IV.- PENETRACION																	
Penetración		Velocidad de ensayo	Tiempo de carga	Esfuerzo Estándar	Espécimen 2 Saturado				Espécimen 4 Saturado				Espécimen 6 Saturado				
0.001 in	0.01 mm	0.01mm /min	0.1m in	0.1Mp a	Carga Dial (div)	Correción 0.1k gf	% CBR 1%	Carga Dial (div)	Correción 0.1k gf	% CBR 1%	Carga Dial(d iv)	Correción 0.1k gf	% CBR 1%	Carga Dial(d iv)	Correción 0.1k gf	% CBR 1%	
0.000	0.00	1.27	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.025	0.64	1.27	0.5	-	-	108.3	-	-	-	-	-	-	-	-	214.6	-	-
0.050	1.27	1.27	1.0	-	-	194.1	-	-	-	-	-	-	-	-	593.1	-	-
0.075	1.91	1.27	1.5	-	-	271.6	-	-	-	-	-	-	-	-	104.6	-	-
0.100	2.54	1.27	2.0	6.9	-	343.1	345.1	25	-	105.6	1035.4	75	-	-	147.2	1650.9	120
0.125	3.18	1.27	2.5	-	-	435.4	-	-	-	124.3	-	-	-	-	186.5	-	-
0.150	3.81	1.27	3.0	-	-	494.7	-	-	-	140.8	-	-	-	-	220.3	-	-
0.175	4.45	1.27	3.5	-	-	541.6	-	-	-	158.2	-	-	-	-	250.6	-	-
0.200	5.08	1.27	4.0	10.3	-	593.9	624.3	30	-	173.8	1737.7	84	-	-	279.4	2798.4	136
0.300	7.62	1.27	6.0	-	-	901.5	-	-	-	220.5	-	-	-	-	347.1	-	-
0.400	10.16	1.27	8.0	-	-	107.4	-	-	-	249.6	-	-	-	-	393.7	-	-
0.500	12.70	1.27	10.0	-	-	131.0	-	-	-	275.7	-	-	-	-	437.6	-	-

Nota. En la tabla 125, se presenta los datos de la penetración de C4-E2 (60%), donde también se puede visualizar la carga y el % de CBR.

V.- GRÁFICAS CBR

Figura 38

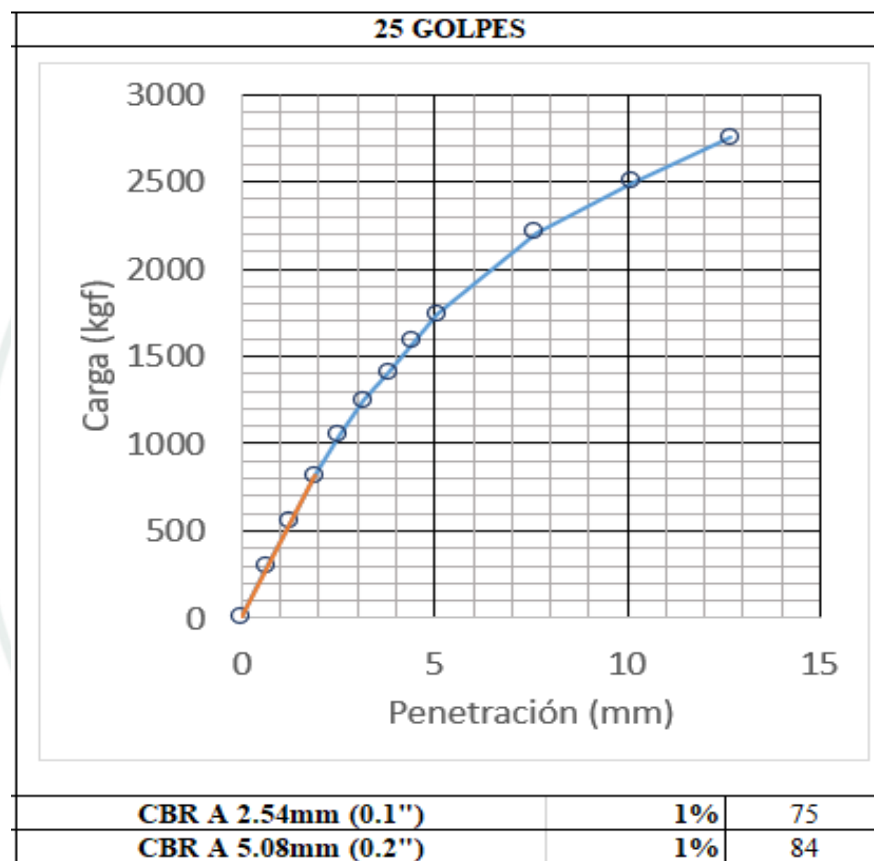
Curvas CBR de 10 golpes de C4-E2 (60%)



Nota. En la figura 38, se presenta la curva de CBR (penetración vs. Carga) de 10 golpes para C4-E2 (60%).

Figura 39

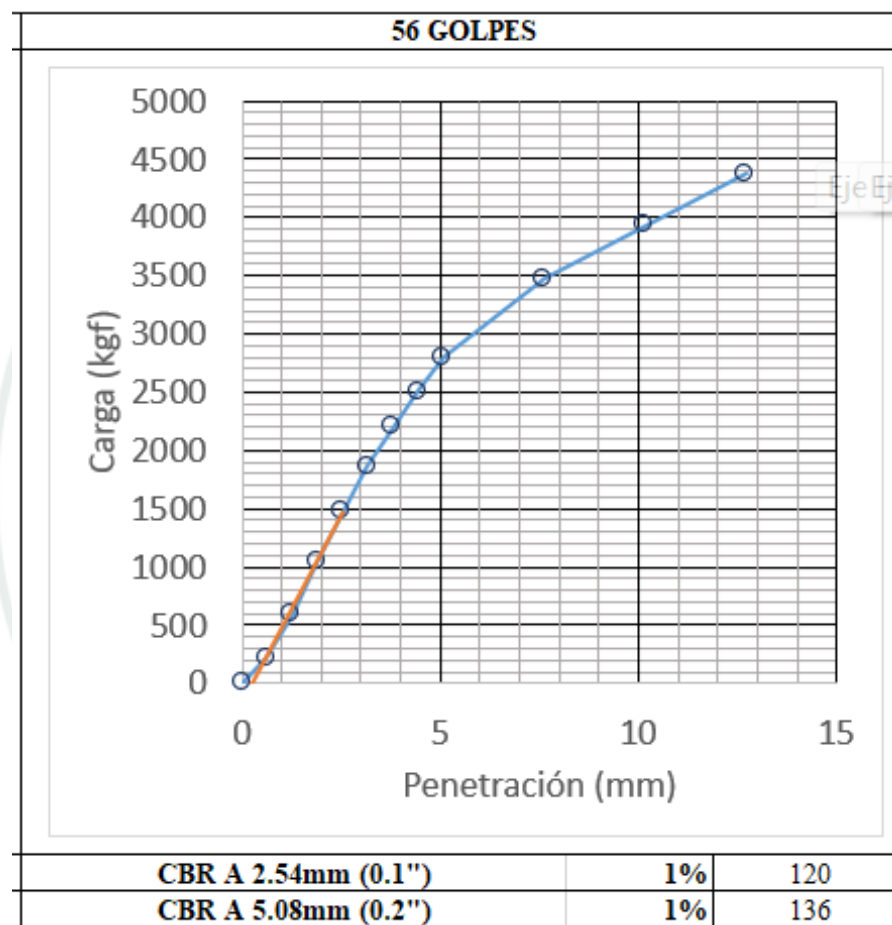
Curvas CBR de 25 golpes de C4-E2 (60%)



Nota. En la figura 39, se presenta la curva de CBR (penetración vs. Carga) de 25 golpes para C4-E2 (60%).

Figura 40

Curvas CBR de 56 golpes de C4-E2 (60%)



Nota. En la figura 40, se presenta la curva de CBR (penetración vs. Carga) de 56 golpes para C4-E2 (60%).

Tabla 126*Resultados de compactación de C4-E2 (60%)*

VI.- RESULTADOS DE COMPACTACION		
Método de compactación	-	Proctor Modificado
p.u. seco máximo	0.1kN/m3	14.1
95% del p.u. máximo	0.1kN/m3	13.3
Óptimo contenido de humedad	0.1%	18.3

Nota. En la tabla 126, se muestra los resultados de compactación para el CBR de C4-E2 (60%).

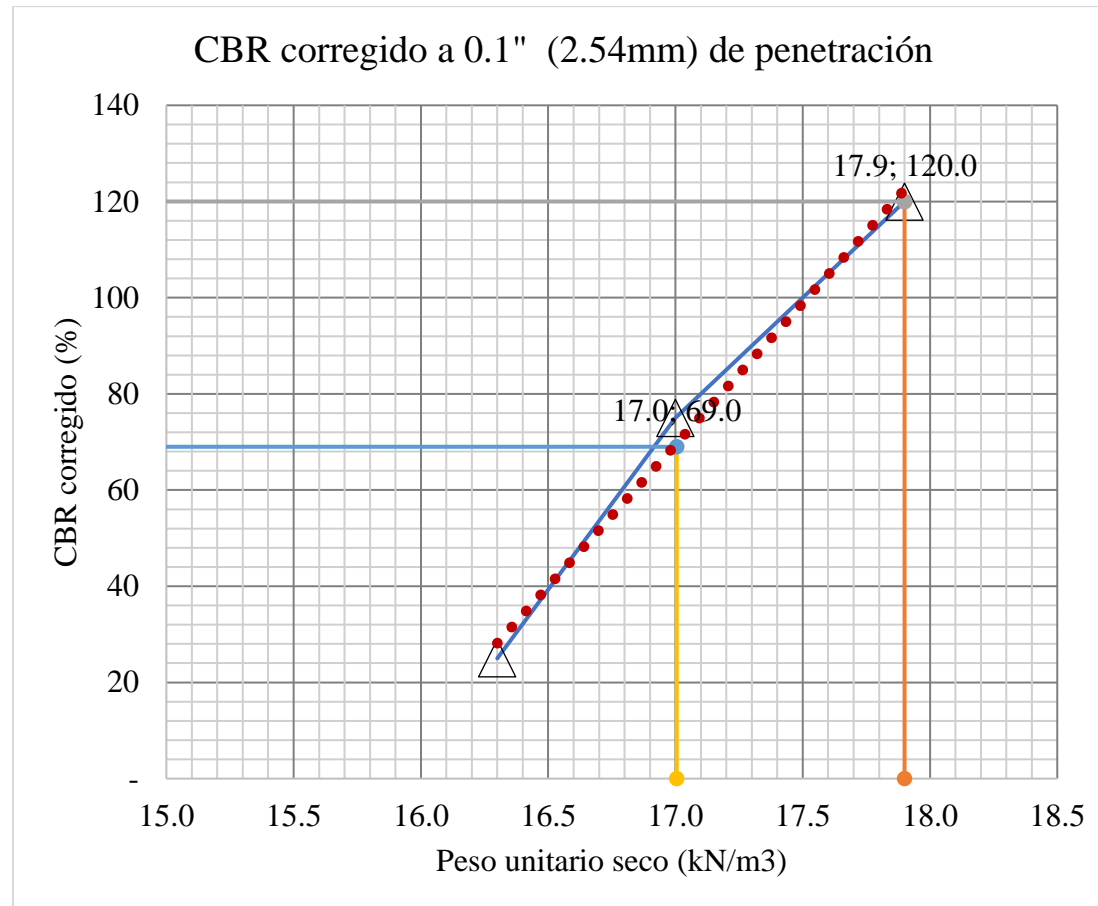
Tabla 127*Resultados de CBR de C4-E2 (60%)*

VII.- RESULTADOS DE CBR						
Nro. De golpes	CBR corregido a 0.1"	CBR corregido a 0.2"	Peso unitario seco	Contenido de Humedad	% Compactación	% de expansión
1	1%	1%	0.1kN/m3	0.1%	1%	0.1%
10	25	30	16.3	28.6	116	0.0
25	75	84	17.0	27.0	121	0.0
56	120	136	17.9	24.9	127	0.0

Nota. En la tabla 127, se presenta los resultados de CBR de C4-E2 (60%) mostrando los datos de CBR corregido para 0.1" y 0.2" junto al contenido de humedad, peso unitario seco, % de compactación y % de expansión.

Figura 41

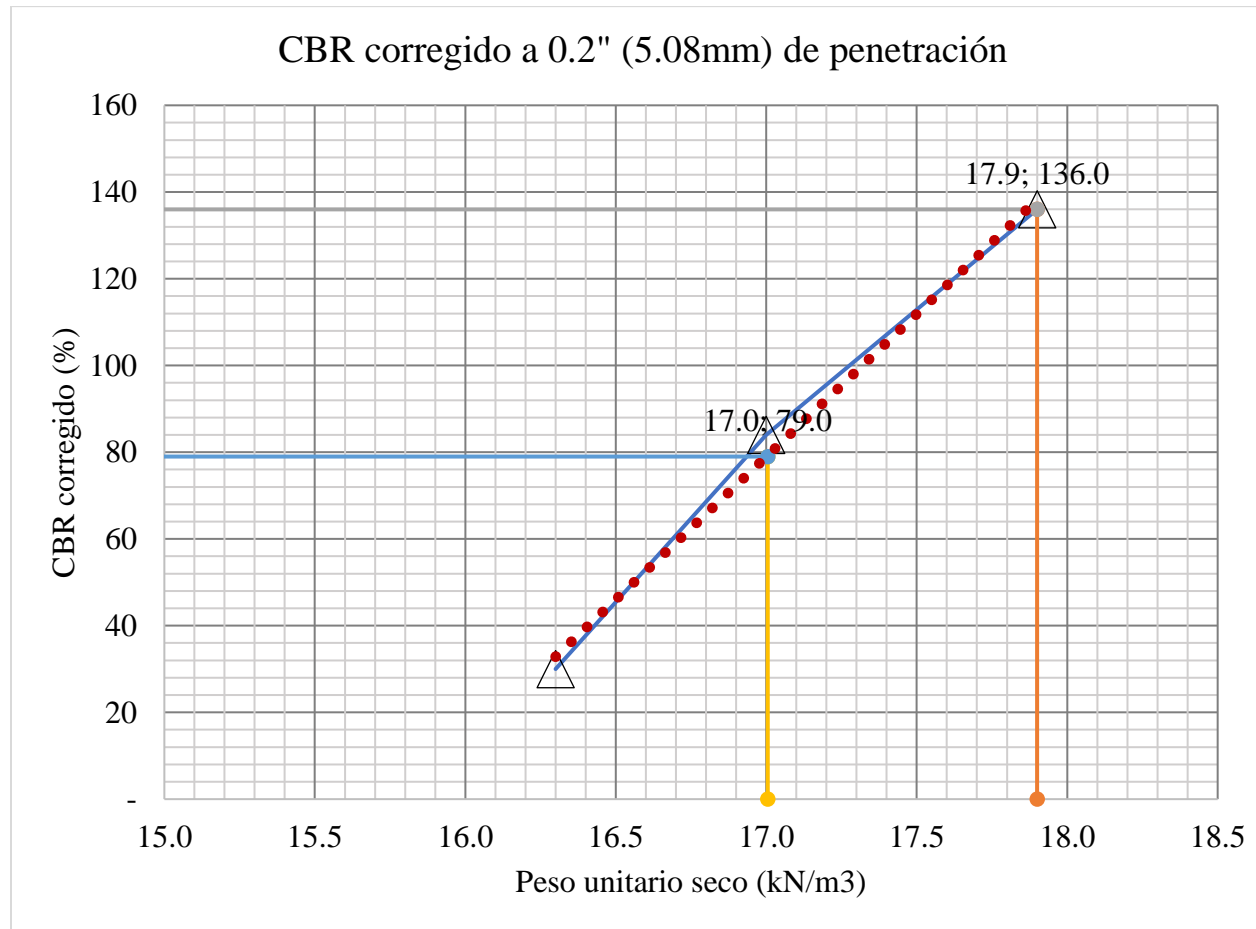
Línea de CBR corregido para 0.1" de penetración de C4-E2 (60%)



Nota. En la figura 41, se presenta la gráfica de CBR corregido Vs. El peso unitario seco y como resultado la línea de CBR corregido para 0.1" de penetración del suelo C4-E2 con un 60% de sedimento.

Figura 42

Línea de CBR corregido para 0.2" de penetración de C4-E2 (60%)



Nota. En la figura 42, se presenta la gráfica de CBR corregido Vs. El peso unitario seco y como resultado la línea de CBR corregido para 0.2" de penetración del suelo C4-E2 con un 60% de sedimento.

CBR de C6-E2 (40%)

Tabla 128

Curva relación humedad - Peso unitario seco - Saturación de C6-E2 (40%)

I.- COMPACTACION Y DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD HÚMEDA							
Espécimen	-	Espécimen 1 Sin saturar	Espécimen 2 Para saturar	Espécimen 3 Sin saturar	Espécimen 4 Para saturar	Espécimen 5 Sin saturar	Espécimen 6 Para saturar
Nro. De capas	Nro.	5	5	5	5	5	5
Golpes por capa	Nro.	10	10	25	25	56	56
Nro. De molde calibrado	-	F	F	U	U	180	180
Diámetro interior promedio del molde SIN ANILLO		152.60	152.60	152.74	152.74	152.48	152.48
Altura promedio del molde calibrado SIN ANILLO		180.13	180.13	180.17	180.17	180.00	180.00
Peso de molde calibrado SIN ANILLO SIN DISCO ESP.	1g	7972	7972	7863	7863	7950	7950
Nro. De disco espaciador calibrado	-	C	C	C	C	C	C
Altura del disco espaciador calibrado	0.01mm	61.63	61.63	61.63	61.63	61.63	61.63
Volumen total del molde calibrado SIN ANILLO	1cm ³	3294	3294	3301	3301	3287	3287
Volumen del disco espaciador	1cm ³	1127	1127	1129	1129	1125	1125
Volumen neto del molde calibrado SIN ANILLO	1cm ³	2167	2167	2172	2172	2162	2162
Volumen neto máx. del molde calibrado SIN ANILLO	1cm ³	2149	2149	2149	2149	2149	2149
Volumen neto mín. del molde calibrado SIN ANILLO	1cm ³	2099	2099	2099	2099	2099	2099
Peso de molde + suelo húmedo SIN ANILLO, SIN DISCO ESP.	1g	12142	12334	12653	12775	12794	12973
Peso del suelo húmedo	1g	4170	4362	4790	4912	4844	5023
Densidad húmeda	0.01g/c m ³	1.92	2.01	2.21	2.26	2.24	2.32

Nota. En la tabla 128, se presenta los datos tomados en laboratorio de compactación para determinar la densidad humedad de C6-E2 (40%), teniendo en cuenta que se debe trabajar con el Método C.

Tabla 129*Humedad y densidad seca de C6-E2 (40%)*

II.- DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD Y DENSIDAD SECA							
		Sin saturar	Saturado	Sin saturar	Saturado	Sin saturar	Saturado
Recipiente Nro.	Nro.	1	1	2	2	3	3
Peso del recipiente	0.1g	125.0	111.0	125.0	123.0	165.0	112.0
Peso del material húmedo + recipiente	0.1g	345.0	237.0	232.0	253.0	384.0	239.0
Peso de material seco + recipiente	0.1g	304.0	211.5	212.5	227.5	345.0	214.0
Peso de agua	0.1g	41.0	25.5	19.5	25.5	39.0	25.0
Peso de material seco	0.1g	179.0	100.5	87.5	104.5	180.0	102.0
Contenido de humedad	0.1%	22.9	25.4	22.3	24.4	21.7	24.5
Densidad Seca	0.01g/cm ³	1.57	1.61	1.80	1.82	1.84	1.87
Peso unitario seco γ_d	0.1kN/m ³	15.4	15.7	17.7	17.8	18.1	18.3

Nota. En la tabla 129, se presenta los datos de contenido de humedad, densidad seca y el peso unitario seco de C6-E2 (40%).

Tabla 130*Expansión de C6-E2 (40%)*

III.- DETERMINACIÓN DE LA EXPANSION													
Fecha y hora de lectura dd/mm/aaaa hhmm	Tiempo 1h	Dial Espécimen 2				Dial Espécimen 4				Dial Espécimen 6			
		Lectura acumulada		Expansión		Lectura acumulada		Expansión		Lectura acumulada		Expansión	
		Directa	mm (0.01mm)	mm (0.01mm)	% 0.1%	Directa	mm (0.01mm)	mm (0.01mm)	% 0.1%	Directa	mm (0.01mm)	% 0.1%	
18/08/2025 12:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
19/08/2025 12:00	24	-	0.03	0.03	0.0	-	0.03	0.03	0.0	-	0.01	0.01	0.0
20/08/2025 12:00	28	-	0.03	0.03	0.0	-	0.03	0.03	0.0	-	0.01	0.01	0.0
21/08/2025 12:00	72	-	0.04	0.04	0.0	-	0.03	0.03	0.0	-	0.01	0.01	0.0
22/08/2025 12:00	96	-	0.04	0.04	0.0	-	0.03	0.03	0.0	-	0.01	0.01	0.0

Nota. En la tabla 130, se presenta las días y fechas realizado el ensayo junto a sus lecturas de diales durante los 4 días de ensayo de C6-

E2 (40%).

Tabla 131

Penetración de C6-E2 (40%)

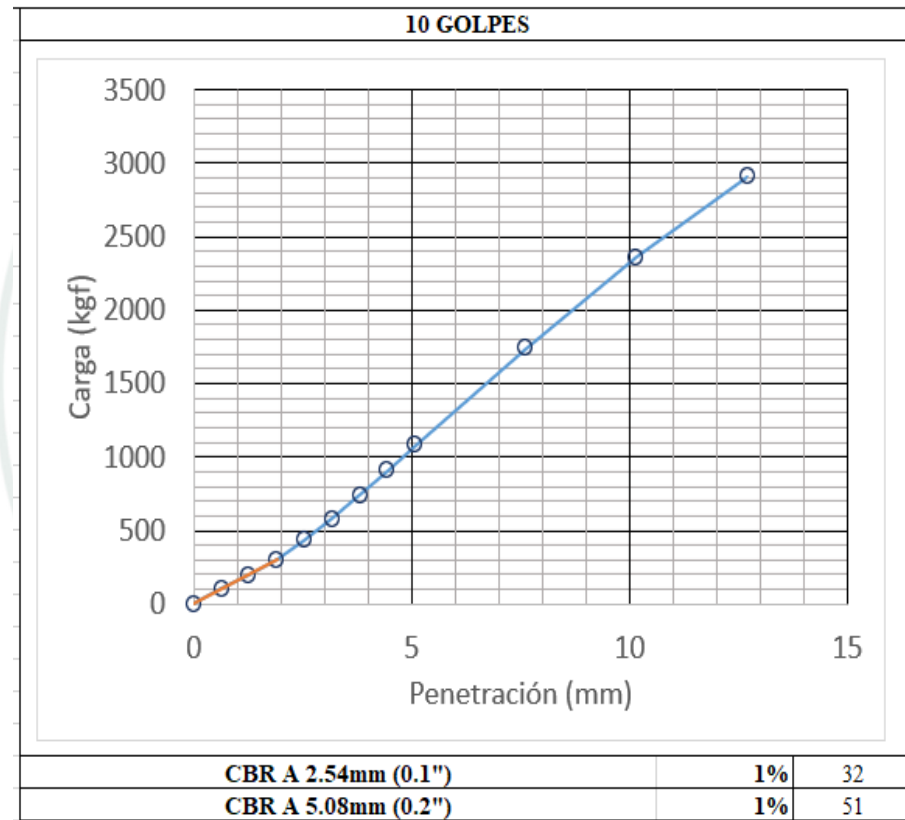
IV.- PENETRACION													
Penetración		Velocidad de ensayo	Tiempo de carga	Esfuerzo Estándar	Especimen 2 Saturado			Especimen 4 Saturado			Especimen 6 Saturado		
0.001 in	0.01 mm	0.01mm /min	0.1min	0.1Mpa	Carga Dial (div)	Corrección 0.1 kgf	% CBR 1%	Carga Dial (div)	Corrección 0.1kg f	% CBR 1%	Carga Dial (div)	Corrección 0.1kg f	% CBR 1%
0.000	0.00	1.27	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.025	0.64	1.27	0.5	-	-	108.3	-	-	291.3	-	-	214.6	-
0.050	1.27	1.27	1.0	-	-	194.1	-	-	553.7	-	-	593.1	-
0.075	1.91	1.27	1.5	-	-	271.6	-	-	815.6	-	-	1041.6	-
0.100	2.54	1.27	2.0	6.9	-	343.1	345.1	25	-	1051.4	1035.4	75.2	1472.9
0.125	3.18	1.27	2.5	-	-	435.4	-	-	1243.9	-	-	1861.5	-
0.150	3.81	1.27	3.0	-	-	494.7	-	-	1408.1	-	-	2203.6	-
0.175	4.45	1.27	3.5	-	-	541.6	-	-	1582.2	-	-	2501.6	-
0.200	5.08	1.27	4.0	10.3	-	593.9	624.3	30	-	1738.2	1737.7	84.8	2794.4
0.300	7.62	1.27	6.0	-	-	901.5	-	-	2205.4	-	-	3475.1	-
0.400	10.16	1.27	8.0	-	-	1074.4	-	-	2498.6	-	-	3932.7	-
0.500	12.70	1.27	10.0	-	-	1310.7	-	-	2751.9	-	-	4376.9	-

Nota. En la tabla 131, se presenta los datos de la penetración de C6-E2 (40%), donde también se puede visualizar la carga y el % de CBR.

V.- GRÁFICAS CBR

Figura 43

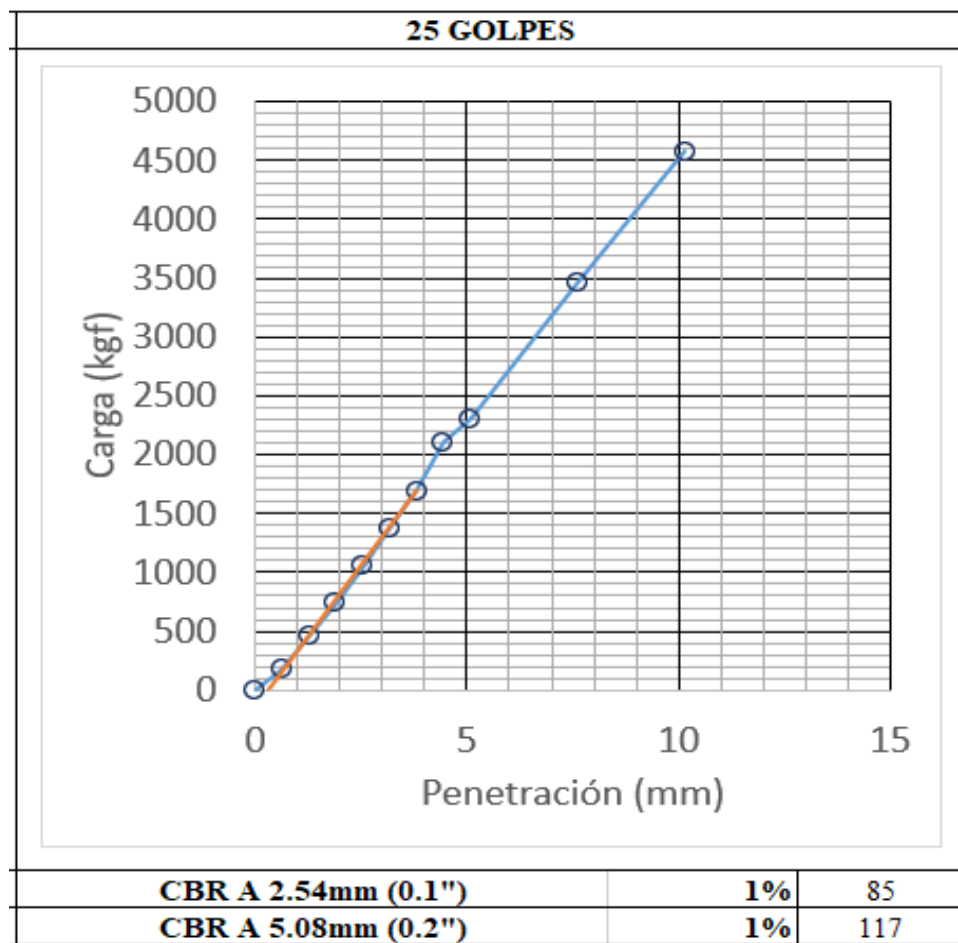
Curvas CBR de 10 golpes de C6-E2 (40%)



Nota. En la figura 43, se presenta la curva de CBR (penetración vs. Carga) de 10 golpes para C6-E2 (40%).

Figura 44

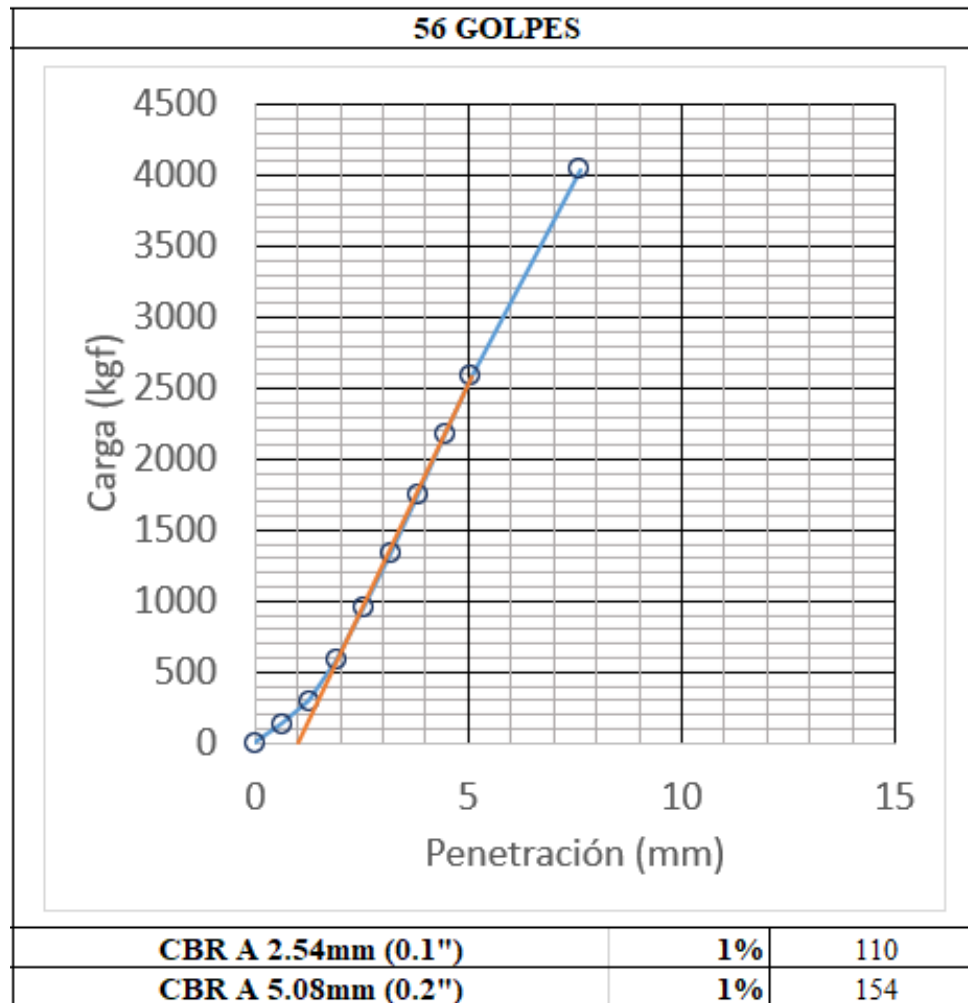
Curvas CBR de 25 golpes de C6-E2 (40%)



Nota. En la figura 44, se presenta la curva de CBR (penetración vs. Carga) de 25 golpes para C6-E2 (40%).

Figura 45

Curvas CBR de 56 golpes de C6-E2 (40%)



Nota. En la figura 45, se presenta la curva de CBR (penetración vs. Carga) de 56 golpes para C6-E2 (40%).

Tabla 132*Resultado de compactación de C6-E2 (40%)*

VI.- RESULTADOS DE COMPACTACION		
Método de compactación	-	Proctor Modificado
p.u. seco máximo	0.1kN/m ³	14.2
95% del p.u. máximo	0.1kN/m ³	13.5
Optimo contenido de humedad	0.1%	20.4

Nota. En la tabla 132, se muestra los resultados de compactación para el CBR de C6-E2 (40%).

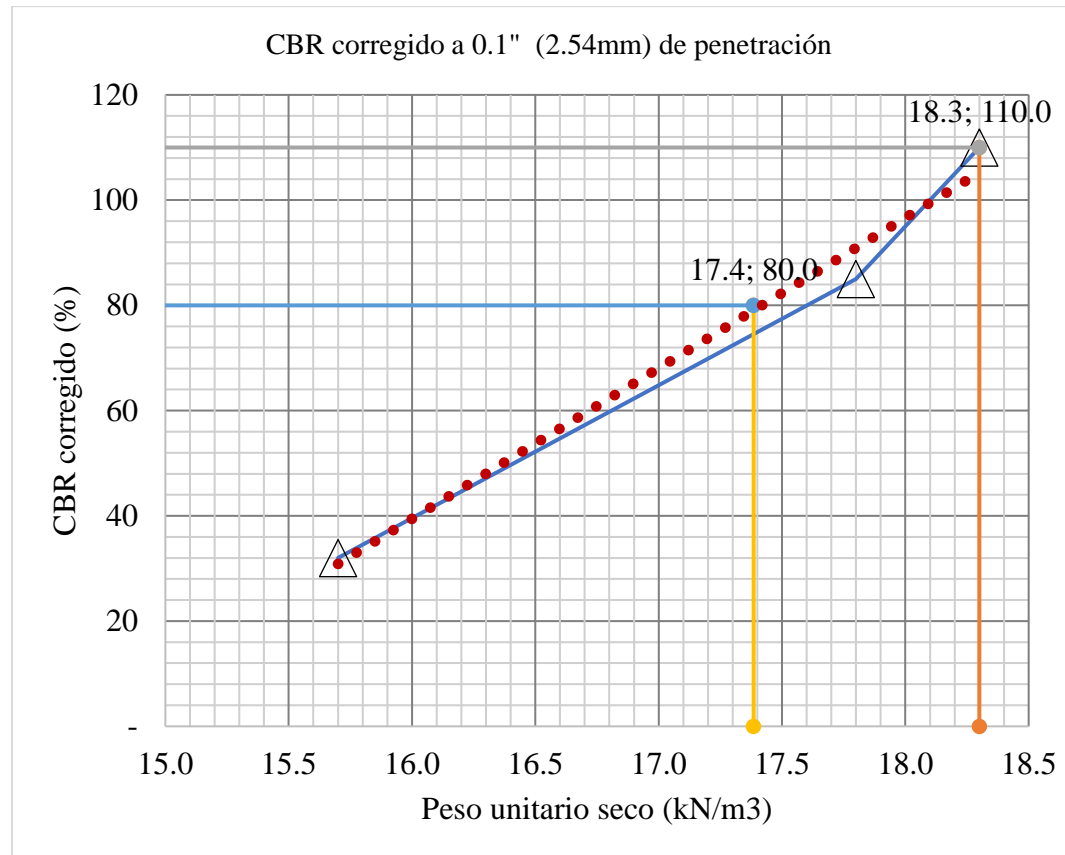
Tabla 133*Resultados de CBR de C6-E2 (40%)*

VII.- RESULTADOS DE CBR							
Nro. De golpes	CBR corregido a	CBR corregido a	Peso unitario	Contenido de	%	% de	
	0.1"	0.2"	seco	Humedad	Compactación	expansión	
1	1%	1%	0.1kN/m³	0.1%	1%	0.1%	
10	32	51	15.7	25.4	111	0.0	
25	85	117	17.8	24.4	125	0.0	
56	110	154	18.3	24.5	129	0.0	

Nota. En la tabla 133, se presenta los resultados de CBR de C6-E2 (40%) mostrando los datos de CBR corregido para 0.1" y 0.2" junto al contenido de humedad, peso unitario seco, % de compactación y % de expansión.

Figura 46

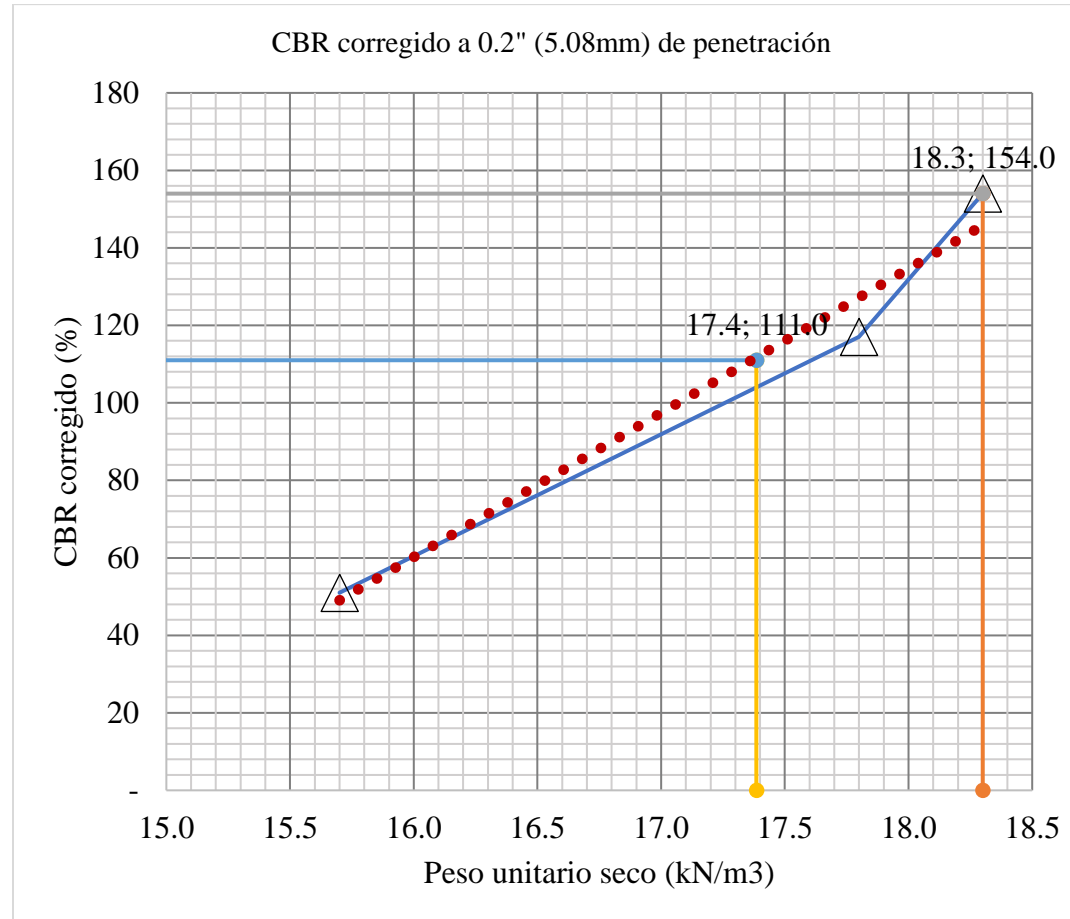
Línea de CBR corregido para 0.1" de penetración de C6-E2 (40%)



Nota. En la figura 46, se presenta la gráfica de CBR corregido Vs. El peso unitario seco y como resultado la línea de CBR corregido para 0.1" de penetración del suelo C6-E2 con un 40% de sedimento.

Figura 47

Línea de CBR corregido para 0.2" de penetración de C6-E2 (40%)



Nota. En la figura 47, se presenta la gráfica de CBR corregido Vs. El peso unitario seco y como resultado la línea de CBR corregido para 0.2" de penetración del suelo C6-E2 con un 40% de sedimento.

Cuadro resumen de ensayos CBR

Tabla 134

Resumen de ensayos CBR para suelo natural y con mezcla parcial de lodo

N°	MUESTRA	TIPO DE PROCTOR	CBR CORREGIDO A 0.1" (2.54mm) DE PENETRACIÓN		CBR CORREGIDO A 0.2" (5.08mm) DE PENETRACIÓN	
			Al 100% p.u. seco máximo del espécimen de ensayo	Al 95% p.u. seco máximo del espécimen de ensayo	Al 100% p.u. seco máximo del espécimen de ensayo	Al 95% p.u. seco máximo del espécimen de ensayo
1	C2-E2	Modificado	93	47	120	57
2	C4-E2	Modificado	116	63	133	73
3	C6-E2	Modificado	90	59	141	91
4	C2-E2 (20%)	Modificado	95	47	121	82
5	C4-E2 (60%)	Modificado	120	69	136	79
6	C6-E2 (40%)	Modificado	110	80	154	111

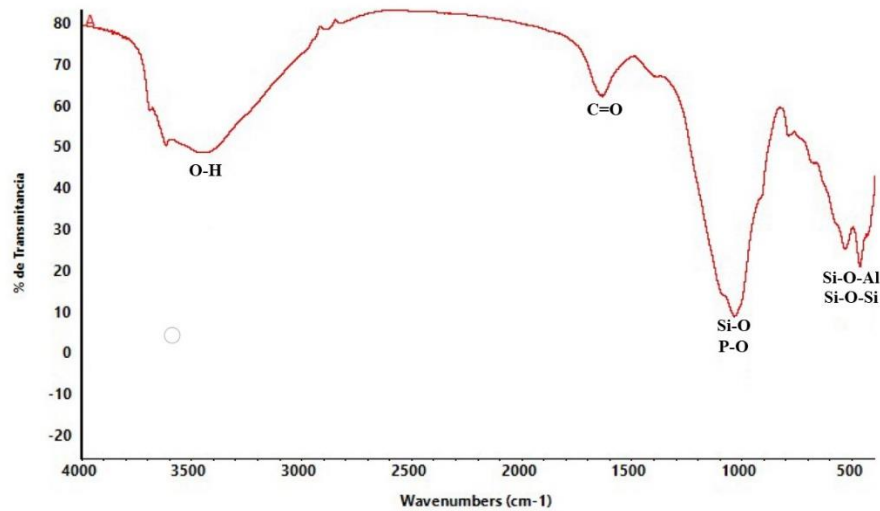
Nota. En la tabla 134, se presenta un cuadro de resumen de los 6 ensayos de CBR de suelo natural y de suelo con mezcla parcial de lodo, presentando los resultados de cada CBR corregido a 0.1" y 0.2" de penetración.

Ensayos Químicos

Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier

Figura 48

Ensayo químico – FTIR



Nota. La figura 48, se detalla el ensayo de FTIR para determinar los grupos funcionales del lodo residual proveniente del tratamiento de agua potable. La banda entre 3600-3200 cm⁻¹ tiene el grupo hidroxilo (O-H) el cual representa contenido de agua absorbida en minerales arcillosos como caolinita, illita o montmorillonita. La banda entre 1700-1650 cm⁻¹ tiene la banda de carbonilo (C=O), el cual representa presencia orgánica en la muestra. La banda entre 110-900 cm⁻¹, representa los grupos de Si-O y P-O, el material tiene una estructura silicatada, lo que puede significar arcilla o materiales volcánicos. La banda 800-500 cm⁻¹, representa los grupos de Si-O-Al y Si-O-Si, se tiene presencia de aluminosilicatos típico de suelos volcánicos, arcillas, cenizas o materiales puzolánicos. El material puede provenir de restos de fosfato o minerales accesorios.

Diseño De Pavimento Flexible

Caracterización De materiales pétreos

Agregado Fino

Análisis Granulométrico por Tamizado – MTC E 204

Según husos granulométricos para la mezcla asfáltica en caliente (MAC)

Tabla 135

Husos granulométricos para MAC

MAC 1		MAC 2		MAC 3	
100%	100%	100%	100%	100%	100%
80%	100%	100%	100%	100%	100%
67%	85%	80%	100%	100%	100%
60%	77%	70%	88%	100%	100%
43%	54%	51%	68%	65%	87%
29%	45%	38%	52%	43%	61%
14%	25%	17%	28%	19%	29%
8%	17%	8%	17%	9%	19%
4%	8%	4%	8%	5%	10%

Nota. La tabla 135, muestra los husos granulométricos para pavimento flexible, según el ensayo granulométrico, la curva se encuentra dentro del Huso de MAC 2, el cual se considera ideal para pavimentos urbanos.

Tabla 136

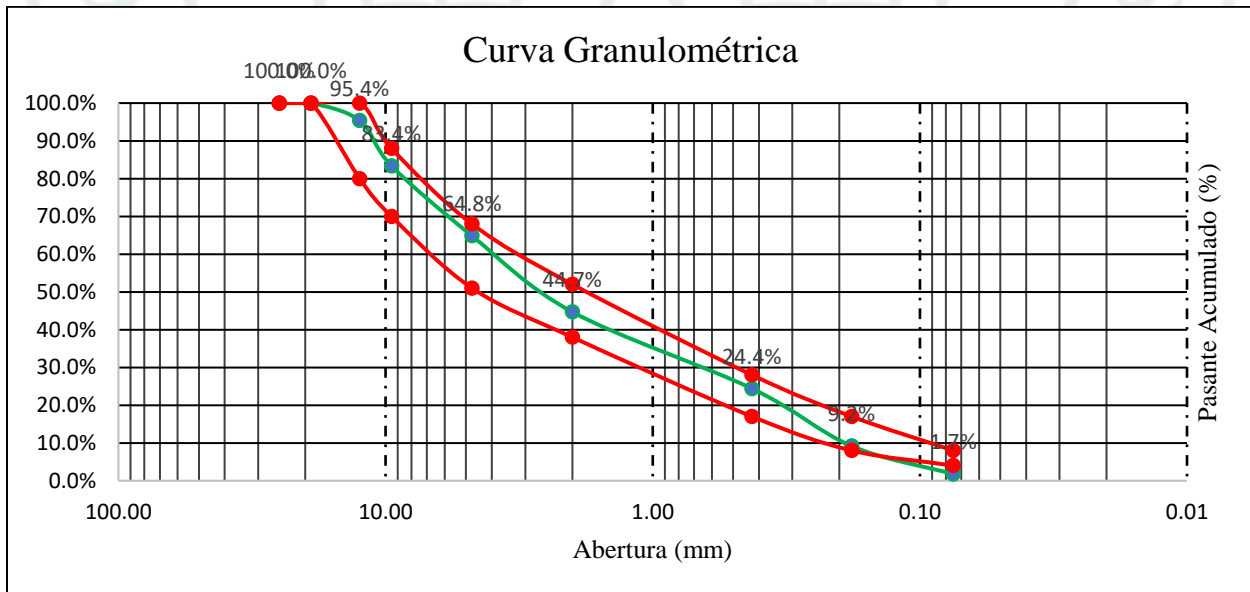
Husos granulométricos para MAC

Tamiz	Abertura (mm)	P. Ret. (g)	% Ret.	% Ret. Acum.	%Pas. Acum.
1"	25.00		0.0%	0.0%	100.0%
¾"	19.00		0.0%	0.0%	100.0%
½"	12.50	63.85	4.6%	4.6%	95.4%
⅜"	9.50	165.71	12.0%	16.6%	83.4%
#4	4.75	255.58	18.5%	35.2%	64.8%
#10	2.00	278.12	20.2%	55.3%	44.7%
#40	0.43	280.24	20.3%	75.6%	24.4%
#80	0.18	210.16	15.2%	90.8%	9.2%
#200	0.08	102.39	7.4%	98.3%	1.7%
<#200	0.00	24.11	1.7%	100.0%	0.0%
Total		1380.16	100.0%		

Nota. La tabla 136, se detalla el análisis granulométrico del agregado para el DM asfáltica en caliente para pavimento flexible.

Figura 49

Curva granulométrica para caracterización de agregados



Nota. La figura 49, muestra la curva granulométrica el cual cae en el Huso 2, del MAC 2, correspondiente para pavimentos flexibles según las EE.TT. del MTC. Asimismo, se observa que debe agregarse un porcentaje de filler para que este se encuentre en su totalidad dentro del Huso granulométrico.

Contenido total de humedad en agregados

Tabla 137

Contenido de humedad del agregado fino para pavimento flexible

1	Recipiente N.º	A1	A2	A3
2	Masa suelo húmedo + masa recipiente (g)	425.6	423.74	425.4
3	Masa suelo seco + masa recipiente (g)	420.9	419.04	420.7
4	Masa de agua (g) (1-2)	4.7	4.7	4.7
5	Masa del recipiente (g)	71.62	71.61	71.62
6	Suelo Seco (g) (3-5)	349.28	347.43	349.08
7	% de humedad	1.3	1.4	1.3

% de humedad	1.3
--------------	-----

Nota. La tabla 137, la tabla de datos y valores obtenidos del ensayo.

Peso unitario y vacíos de los agregados

Tabla 138*Porcentaje de vacíos del agregado fino para pavimento flexible*

Muestra N.º		1	2
1	p. de molde + suelo seco (g)	10052	10094
2	p. de molde (g)	6461	6461
3	p. de la muestra (g)	3591	3655
4	Volumen de la muestra (cc)	2124	2124
5	Peso unitario suelto (g/cm ³)	1.69	1.71
6	Porcentaje de vacíos (%)	1.70	34
Muestra N.º^a		1	2
1	p. de molde + suelo seco (g)	10206	10214
2	p. de molde (g)	6461	6461
3	p. de la muestra (g)	3745	3753
4	Volumen de la muestra (cc)	2124	2124
5	Peso unitario compactado (g/cm ³)	1.76	1.77
6	Porcentaje de vacíos (%)	1.77	31

Nota. La tabla 138, detalla los resultados del ensayo de peso unitario y vacíos de los agregados realizado según el MEM del MTC.

Equivalente de arena

Tabla 139

Equivalente de arena del agregado fino para pavimento flexible

IDENTIFICACIÓN		M1		
MUESTRA N.º		1	2	3
A	Hora ingreso a saturación	11:50	11:50	12:00
2	Salida de saturación (A + 10')	12:00	12:00	12:10
B	Hora entrada a decantación	12:05	12:05	12:15
4	Salida de decantación (B + 20')	12:25	12:25	12:35
5	Altura de material fino (cm)	3.9	4.1	4.2
6	Altura de arena (cm)	2.3	2.5	2.6
7	Equis. Arena (6/5*100)	59	61	61
8	Promedio Equiv. Arena (%)		61	

Nota. La tabla 139, muestra los datos y resultados del ensayo de equivalente de arena realizado según el MEM del MTC.

Angularidad del agregado fino

Tabla 140

Angularidad del agregado fino para pavimento flexible

ITEM	DESCRIPCIÓN	NÚMERO DE ENSAYO		
		1	2	3
A	V. del molde (cm ³)	2739	2739	2739
B	P. del molde (gr)	2670	2670	2670
C	P. de muestra + peso de molde (g)	7338	7325	7318
D	P. de muestra (g)	4668	4655	4648
E	P. específico del agregado fino (gr/cm ³)	2.47	2.47	2.47
F	Angularidad de muestra (%)	31	31	31
	Promedio de angularidad (%)		31	

Nota. La tabla 140, muestra los datos y valores obtenidos del ensayo.

Determinación del índice de plasticidad

Tabla 141

Índices de plasticidad del agregado fino para pavimento flexible

N.º DE CÁPSULA	LÍMITE LÍQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO
	NP	NP

Nota. La tabla 141, detalla los datos y resultados del ensayo de Índice de plasticidad realizado según el MEM del MTC.

Durabilidad al sulfato de sodio y magnesio

Tabla 142

Durabilidad al sulfato de sodio y magnesio del agregado fino para pavimento flexible

N.º DE CICLOS				5		
TAMICES		PESO		GRADACIÓN (%)	PÉRDIDA (%)	
DE	A	INICIAL	FINAL		REAL	CORREGIDA
3/8"	N.º 4	164.5	164.3	19.20%	0.2	0.1%
N.º 4	N.º 8	197.9	197.85	16.80%	0.1	0.0%
N.º 8	N.º 16	163.8	163.7	13.00%	0.1	0.1%
N.º 16	N.º 30	166.3	166.1	14.20%	0.2	0.1%
N.º 30	N.º 50	166.4	166.1	16.60%	0.3	0.2%
				TOTAL (%)		0.5%

Nota. La tabla 142, muestra los datos y valores obtenidos del ensayo.

Índice de durabilidad

MUESTRA	
Tipo de preparación	B
Muestra utilizada	Ret. Malla #200
Solución utilizada	Cloruro Cálcico
Agua utilizada	Destilada

Tabla 143*Índice de durabilidad del agregado fino para pavimento flexible*

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	ENSAYO 1	ENSAYO 2
V. de muestra	ml	85	85
T. de lavado	min	2	2
T. de agitación	min	10	10
T. de sedimentación	min	20	20
Temperatura de solución	°c	23	23
Altura de Arcilla	pulg	3.9	4.3
Altura de Arena	pulg	2.9	3.1
Índice de durabilidad (Df)	-	74.4	72.1

Nota. La tabla 143, muestra los datos y resultados del ensayo de índice de durabilidad realizado según el MEM del MTC.

Sales solubles totales**Tabla 144***Contenido de sales solubles del agregado fino para pavimento flexible*

Sales Solubles	
Descripción	Muestra 1
Peso de muestra (g)	100
Peso de vaso de precipitado (g)	200.41
Volumen de agua (ml)	350
Volumen de Alícuota (ml)	100
Peso de vaso de precipitado + muestra (g)	200.46
Contenido de Sales Solubles (mg/kg)	1750
	0.18
	% de peso

Nota. La tabla 144, muestra los valores obtenidos del ensayo.

Tabla 145*Contenido de cloruros solubles del agregado fino para pavimento flexible*

Contenido de Cloruros Solubles	
Descripción	Muestra 1
Volumen de AgNO₃ para la muestra (ml)	1.2
Volumen de alícuota (ml)	30
Volumen de agua destilada en solución (ml)	350
P. de muestra (g)	100
P. de muestra en alícuota (g)	8.6
D (g)	3.5
Contenido de Cloruros Solubles (g)	314.1
	0.03
	% de peso

Nota. La tabla 145, muestra los datos y valores obtenidos del ensayo.

Tabla 146*Contenido de sulfatos solubles del agregado fino para pavimento flexible*

Contenido de Sulfatos Solubles	
Descripción	Muestra 1
Peso crisol (g)	29.6061
Peso crisol + muestra (g)	29.6266
Peso de alícuota (ml)	30
Peso de Ba SO₄ (g)	0.0202
Volumen de agua en solución (ml)	350
P. de muestra (g)	100
P. de muestra en alícuota (g)	8.6
Contenido de Sulfatos Solubles	969.8
	0.10
	% de peso

Nota. La tabla 146, muestra los datos y valores obtenidos del ensayo.

Peso específico y absorción de agregados finos

Tabla 147

Peso específico y absorción del agregado fino para pavimento flexible

Muestra	1	2	3
Porción de la muestra de ensayo que pasa tamiz			
Masa de la muestra SSS (neto) (g)	300.05	300.05	300.05
Masa de fiola + agua + muestra SSS (g)	829.25	829.25	832.17
Masa calibrada de fiola + agua (g)	649.28	649.28	653.28
Masa de recipiente (g)	219.80	219.80	208.60
Masa de recipiente + muestra seca (g)	518.70	518.90	507.40
Peso específico saturado superficialmente seco (g)	2.50	2.50	2.48
Peso específico de masa (g)	2.49	2.49	2.47
Peso específico aparente (g)	2.51	2.51	2.49
Absorción (%)	0.4%	0.3%	0.4%

Nota. La tabla 147, muestra los valores obtenidos del ensayo.

Adhesividad de los ligantes bituminosos a los áridos finos (Procedimiento Riedel Weber)

DESCRIPCIÓN	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3
Peso de muestra (g)	200		
Densidad de muestra suelta (kg/m3)	1264		
Densidad de bitumen (kg/m3)	1016		
%V. de muestra (%)	71%		
%V. de bitumen (%)	29.00%		
V. de muestra (cm3)	158.23		
V. total de muestra (cm)	222.86		
V. de bitumen	64.63		
Peso de bitumen (g)	65.66		
Temperatura (°C)	150		

Tabla 148

Adhesividad de los ligantes bituminosos a los áridos finos (Procedimiento Riedel Weber) del agregado fino para pavimento flexible

CONCENTRACIÓN (gr./lt Na₂CO₃)	ÍNDICE DE ADHESIVIDAD	OBSERVACIÓN
Agua destilada	0	No hay desprendimiento
M/256=0.414	1	No hay desprendimiento
M/128=0.828	2	No hay desprendimiento
M/64=1.656	3	Desprendimiento parcial
M/32=3.312	4	Desprendimiento parcial
M/16=6.625	5	Desprendimiento parcial
M/8=13.25	6	Desprendimiento parcial
M/4=26.5	7	Desprendimiento parcial
M/2=53.0	8	Desprendimiento parcial
M/1=106.0	9	Desprendimiento total
No hay desprendimiento	10	
Índice de adhesividad		8

Nota. La tabla 148, muestra los valores obtenidos del ensayo.

Determinación cualitativa de arcilla nociva utilizando azul de metileno

Tabla 149

Determinación cualitativa de arcilla nociva utilizando azul de metileno" del agregado fino para pavimento flexible

IDENTIFICACIÓN	M1	
MUESTRA N. ^a	1	2
Muestra (g)	10	10
Agua destilada (mL)	30	30
V. de azul de metileno (mg)	10.2	9.7
Valor de azul de metileno (mg/g)	5.1	4.9
Promedio	5.0	

Nota. La tabla 149, muestra los datos y valores obtenidos del ensayo.

Agregado grueso

Contenido total de humedad en agregados

Tabla 150

Contenido de humedad del agregado grueso para pavimento flexible

1	Recipiente N°	A1	A2	A3
2	Masa suelo húmedo + masa recipiente (g)	513.78	512.46	513.52
3	Masa suelo seco + masa recipiente (g)	507.71	506.38	507.57
4	Masa de agua (g) (1-2)	6.07	6.08	5.95
5	Masa del recipiente (g)	72.14	72.16	72.15
6	Suelo Seco (g) (3-5)	435.57	434.22	435.42
7	% de humedad	1.4	1.4	1.4

Nota. La tabla 150, muestra los datos y resultados del ensayo de contenido de humedad realizado según el MEM del MTC.

Peso unitario y vacíos de los agregados

Tabla 151

Peso unitario de vacíos del agregado grueso para pavimento flexible

	Muestra N°	1	2
1	p. de molde + suelo seco (g)	26324	26354
2	p. de molde (g)	11755	11755
3	p. de la muestra (g)	14569	14599
4	Volumen de la muestra (cc)	9428	9475
5	Peso unitario compactado (g/cm ³)	1.55	1.54
6	Porcentaje de vacíos (%)		42
	Muestra N°	1	2
1	p. de molde + suelo seco (g)	25338	25338
2	p. de molde (g)	11755	11755
3	p. de la muestra (g)	13583	13583
4	Volumen de la muestra (cc)	9559	9542
5	Peso unitario suelto (g/cm ³)	1.42	1.42
6	Porcentaje de vacíos (%)		46

Nota. La tabla 151, muestra los datos y resultados del ensayo de peso unitario y vacíos del agregado realizado según el MEM del MTC.

Durabilidad al sulfato de sodio y magnesio

Tabla 152

Durabilidad al sulfato de sodio y magnesio del agregado grueso para pavimento flexible

		Nº DE CICLOS			5	
TAMICES DE	A	PESO		GRADACIÓN (%)	PÉRDIDA (%)	
		INICIAL	FINAL		REA L	CORREGID A
3/8"	Nº 4	164.5	164.3	19.20%	0.2	0.1%
Nº 4	Nº 8	197.9	197.85	16.80%	0.1	0.0%
Nº 8	Nº 16	163.8	163.7	13.00%	0.1	0.1%
Nº 16	Nº 30	166.3	166.1	14.20%	0.2	0.1%
Nº 30	Nº 50	166.4	166.1	16.60%	0.3	0.2%
				TOTAL (%)		0.5%

Nota. La tabla 152, muestra los valores obtenidos del ensayo.

Abrasión máquina de los ángeles

Tabla 153

Gradación Abrasión máquina de los ángeles

Determinación de Gradación					
Pasante	Tamiz		Muestra		
	Retenido		1	2	3
1 1/2" (37.5mm)	1" (25.0mm)				
1" (25.0mm)	3/4" (19.0mm)				
3/4" (19.0mm)	1/2" (12.50mm)		2500		
1/2" (12.50mm)	3/8" (9.5mm)		2500		
3/8" (9.5mm)	1/4" (6.3mm)				
1/4" (6.3mm)	Nro. 4 (4.75 mm)				
	Total		5000	0	0
	Tipo de gradación			B	

Nota. La tabla 153, muestra la gradación de la muestra.

Tabla 154*Abrasión máquina de los ángeles del agregado grueso para pavimento flexible*

Descripción	Proceso de Abrasión		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Peso de muestra (g)	5000	0	0
Cantidad de esferas	11		
Peso de Carga	4580		
P. de Bowl (g)	279		
P. de bowl+muestra ret.	4540		
Tamiz #12 (g)			
P. de muestra ret (g)	4261		
%De desgaste	15		
		15	

Revestimiento y desprendimiento de mezclas agregado – bitumen**Tabla 155***Revestimiento y desprendimiento de mezclas agregado-bitumen*

MATERIAL	P. INICIAL (gf)	%Área Superficial visual
Agregado Grueso	100	0.02

Nota. La tabla 155, muestra los valores obtenidos del ensayo.

Tabla 156

Revestimiento y desprendimiento de mezclas agregado – bitumen del agregado grueso para pavimento flexible

ÁREA REVESTIDA	97%
	Mayor de 95%

Índice de durabilidad

MUESTRA DE ENSAYO	
Tipo de preparación	A
Tamaño del agregado	Peso seco g
3/4" a 1/2"	1050
1/2" a 3/8"	550
3/8" a N°4	900
TOTAL	2500

Tabla 157

Índice de durabilidad del agregado grueso para pavimento flexible

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	ENSAYO	
		1	2
Volumen de muestra	ml	85	85
Tiempo de lavado	min	2	2
Tiempo de agitación	min	10	10
Tiempo de sedimentación	min	20	20
Temperatura de solución	°c	23	23
Altura de Sedimentación	pulg	0.6	0.7
Índice de durabilidad (Dc)	-	82.4	80.2

Nota. La tabla 157, muestra los datos y valores obtenidos del ensayo.

Partículas chatas y alargadas en agregados

Tabla 158

Partículas chatas y alargadas en agregados para pavimento flexible

Tamiz (plg)	Abertura (mm)	Retenido parcial (%)	Fracción analizada		Partículas		Partículas		Observaciones	
			# de partículas	gr	Chatas (gr)	Alargadas (gr)	Chatas (%)	Alargadas (%)	Chatas	Alargadas
1"	25.40	190.00	40	190.0	73.1	190.9				
3/4"	19.05	46.00	20	170.0	46.0	0.0				
1/2"	12.70	310.00	20	95.6	65.5	30.1	21.1	9.71	4.23	1.94
3/8"	8.75	639.00	30	64.9	43.2	21.7	6.76	3.40	2.03	1.02
1/4"	6.35									
Total		1185.00	110				27.8		6.25	2.96
		0					9			
							10			
% de partículas chatas y alargadas										
Especificaciones max (%)										

Nota. La tabla 158, muestra los valores obtenidos del ensayo.

Porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso

Con una cara fracturada

Tabla 159

Porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso para pavimento flexible

Tamiz (plg)	Abertura (mm)	A (g)	B (g)	C (B/A)*100	D % parcial	E (C*D)
1"	25.40	73	72.00	98.6	18.91	1864.80
3/4"	19.05	46.1	45.00	97.6	11.94	1165.50
1/2"	12.70	74	75.00	101.4	19.17	1942.50
3/8"	8.75	193	190.00	98.4	49.99	4921.00
1/4"	6.35	0	0.00	0.0	0.00	0.00
Total		386.1	382.00		100.00	9893.81
Porcentaje con una cara fracturada					99	

Nota. La tabla 159, muestra los valores obtenidos del ensayo.

Con dos o más caras fracturadas

Tabla 160

Porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso para pavimento flexible

Tamiz (plg)	Abertura (mm)	A (g)	B (g)	C (B/A)*100	D % parcial	E (C*D)
1"	25.40	191.00	180.00	94.2	24.17	2278.19
3/4"	19.05	46.10	40.00	86.8	5.83	506.27
1/2"	12.70	132.00	30.00	22.7	16.71	379.70
3/8"	8.75	421.00	400.00	95.0	53.28	5062.65
1/4"	6.35	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00
Total		790.10	650.00		100.00	8226.81
Porcentaje con dos caras fracturadas					82	

Nota. La tabla 160, muestra los valores obtenidos del ensayo.

Peso específico y absorción del agregado grueso

Tabla 161

Peso específico y absorción del agregado grueso para pavimento flexible

Muestra	1	2	3
p. de la muestra SSS (neto) (g)	4,471.50	2,323.00	2,323.00
p. de canastilla (g)	854.00	853.70	853.70
p. de canastilla + muestra SSS (g)	3,611.70	2,283.80	2,283.80
p. de recipiente (g)	282.30	195.10	195.10
p. de recipiente + muestra seca (g)	4,711.70	2,495.30	2,497.30
Peso específico saturado superficialmente seco	2.61	2.60	2.60
Peso específico de masa	2.58	2.58	2.58
Peso específico aparente	2.65	2.64	2.64
Absorción (%)	1.0%	1.0%	0.9%

Nota. La tabla 161, muestra los valores obtenidos del ensayo.

Cuadro resumen

Tabla 162

Cuadro resumen de ensayos requeridos para pavimento flexible según MTC

ENSAYO	RESULTADO	EE.TT. MTC	MTC - EE.TT.
AGREGADOS FINOS			
Equivalente de arena	61	60	
Angularidad del agregado fino	31	30	C
Arcillas nocivas utilizando Azul de metileno	5	8 máx.	C
Índice de plasticidad (en malla Nro. 40)	NP	NP	C
Durabilidad al sulfato de sodio y magnesio	0.50%	-	C
Índice de durabilidad	74.4	35 mín.	C
Sales solubles totales	0.18%	0.5% máx.	C
Absorción	0.40%	0.5% máx.	C
AGREGADOS GRUESOS			
Durabilidad al sulfato de sodio y magnesio	0.50%	18% máx.	C
Abrasión máquina de los ángeles	15%	40% máx.	C
Revestimiento y desprendimiento de mezclas agregado - bitumen	Mayor de 95%	+95	C
Índice de durabilidad	82%	35% mín.	C
Partículas chatas y alargadas en agregados	9%	10% máx.	C
Porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso	99/82	85/50	
Absorción	0.90%	1.0% máx.	C

C: CUMPLE

Nota. La tabla 162, muestra el resumen de los valores obtenidos de los ensayos requeridos según las Especificaciones Técnicas para pavimentos flexibles del MTC, los cuales se encuentran dentro de los rangos establecidos.

DMAC Por El Método Marshall

DM

Combinación de agregados

M1	M2	Mezcla
68.00%	32.00%	100.00%

Tabla 163

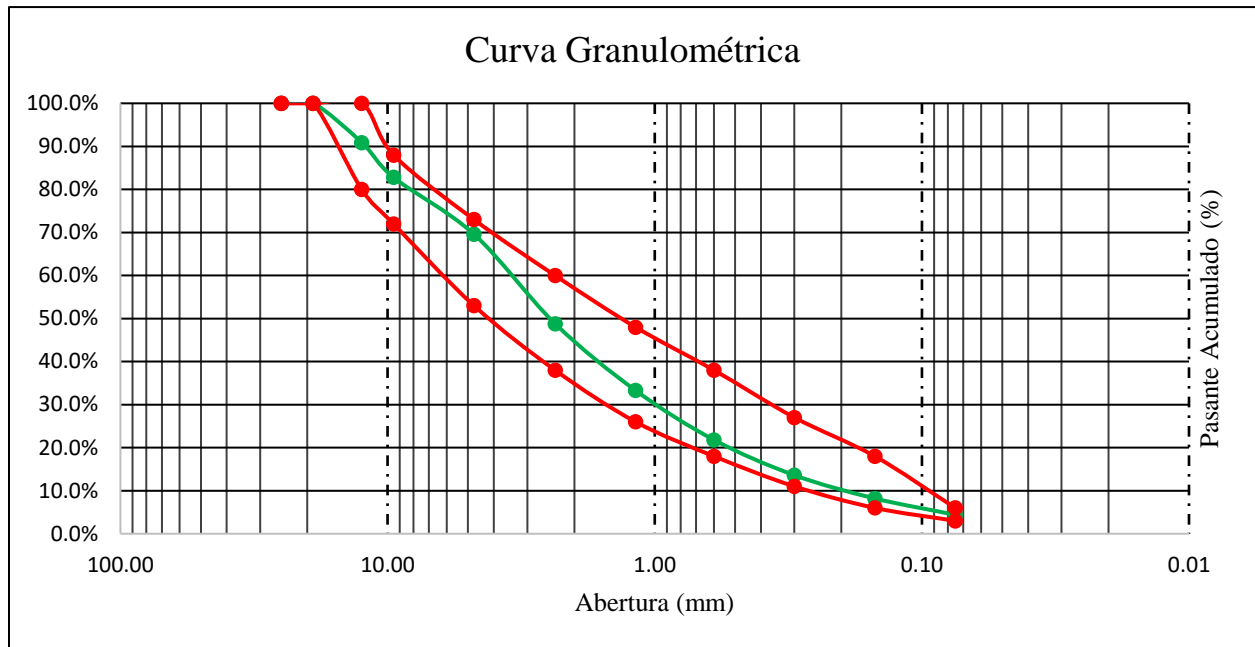
Análisis granulométrico para diseño de mezcla asfáltica en caliente para pavimento flexible según el método Marshall

Malla	Abertura (mm)	% Pasa M1	% Pasa M2	% Mezcla
1"	25.00		100.00%	100.0%
¾"	19.00		100.00%	100.0%
½"	12.50	100.00%	71.50%	90.9%
⅜"	9.50	100.00%	46.10%	82.8%
#4	4.75	100.00%	5.20%	69.6%
#8	2.36	100.00%		48.8%
#16	1.18	71.80%		33.3%
#30	0.60	49.00%		21.8%
#50	0.30	32.00%		13.6%
#100	0.15	20.00%		8.2%
#200	0.08	12.00%		4.4%
<#200	0.00	6.40%		4.4%
Total		5.912		577.8%

Nota. La tabla 163, se observa la distribución granulométrica del agregado y filler, se realizó una combinación de grava (½", 3/8" y #4), arena (#8,#16,#30,#50,#100 y #200) y filler (<#200).

Figura 50

Curva granulométrica para diseño de MAC para pavimento flexible según el método Marshall



Nota. La figura 50, ilustra la curva granulométrica que se requiere para un MAC 2, el cual representa la combinación de grava, arena y filler.

Porcentaje de Bitumen

$$P = 0.035a + 0.045b + Kc + F$$

Donde:

P: Contenido de bitumen

a: % de agregado ret. En la malla #8.

b: % de agregado pas. De la malla # 8.

c: % de agregado pas. Malla #200.

K: 0.18

F: 0.7

Tabla 164*Resumen ecuación para determinar contenido de bitumen*

a	51.17
b	44.47
c	4.36
k	0.20
F	0.66
Contenido de bitumen	5.33

Dosificación MAC 2**Tabla 165***Dosificación para MAC 2 de agregados y bitumen para diseño de mezcla asfáltica en caliente para pavimento flexible según el método Marshall*

		ASFALTO	GRAVA	ARENA	TOTAL
CASO 1	%	4.5	30.56	64.94	100
	gr	54.00	366.72	779.28	1200
CASO 2	%	5	30.40	64.60	100
	gr	60.00	364.80	775.20	1200
CASO 3	%	5.5	30.24	64.26	100
	gr	66.00	362.88	771.12	1200
CASO 4	%	6	30.08	63.92	100
	gr	72.00	360.96	767.04	1200

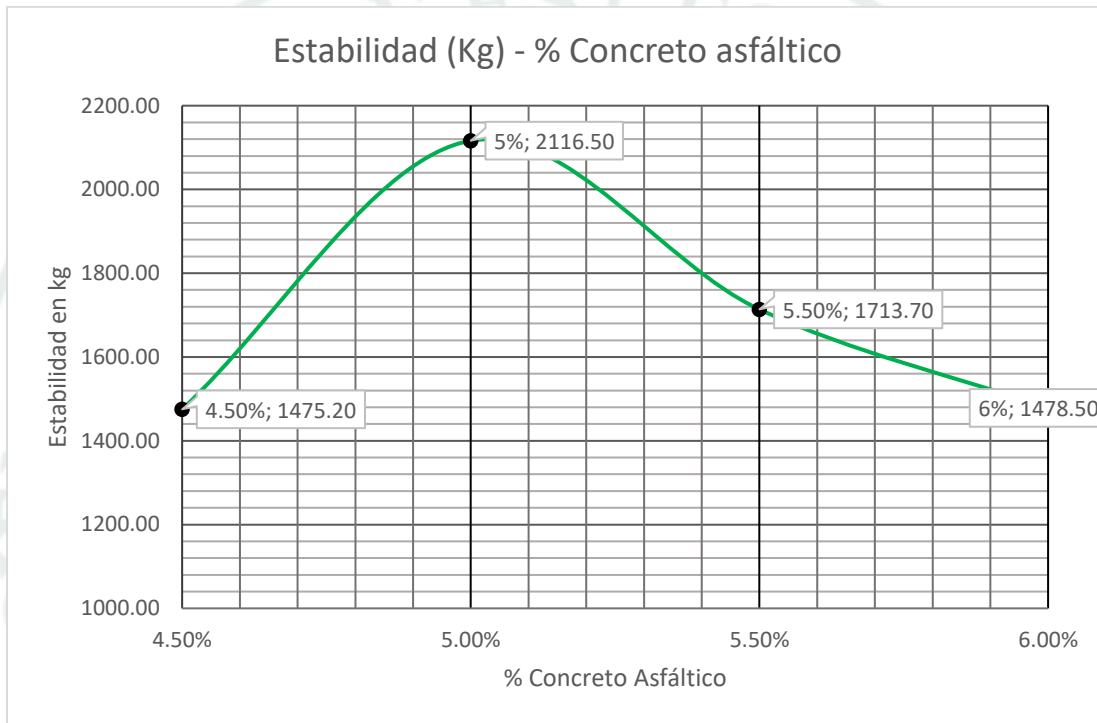
Nota. La tabla 165, muestra la dosificación de los agregados para cada porcentaje de bitumen.

Interpretación de los datos sin FILLER (Lodos residuales de PTAP)

Estabilidad (kg) – Concreto asfáltico

Figura 51

Estabilidad (kg) - % concreto asfáltico de diseño de mezcla asfáltica en caliente para pavimento flexible según el método Marshall

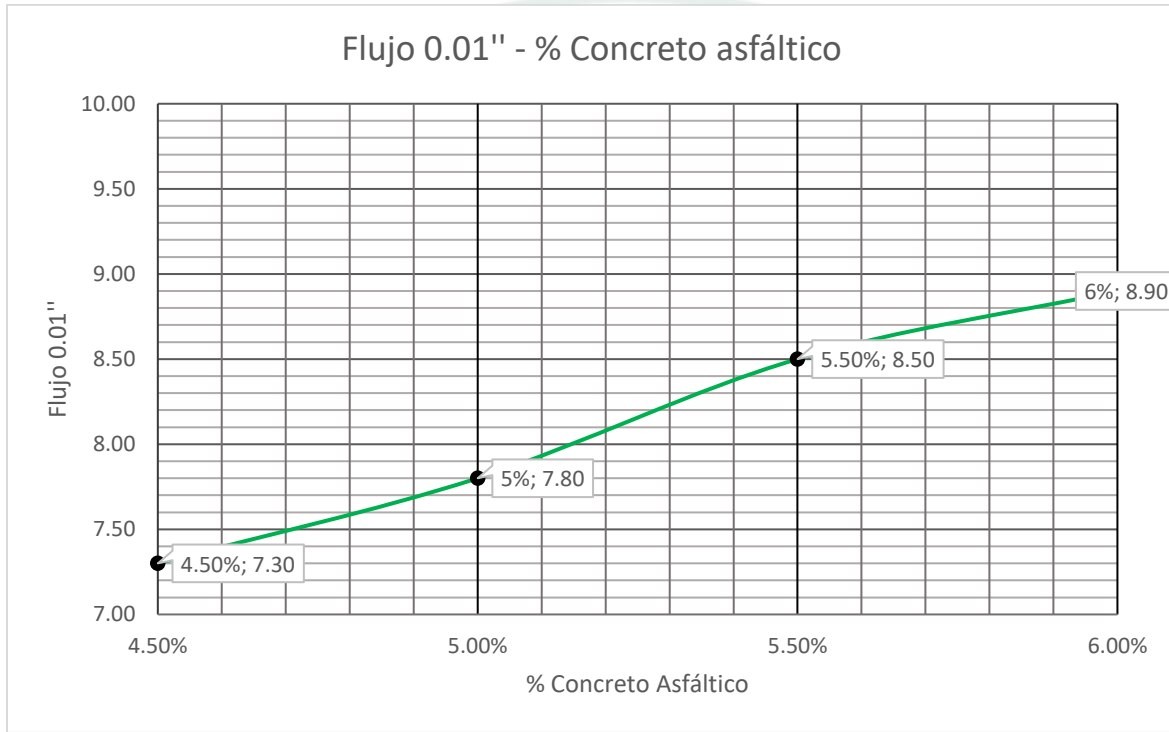


Nota. La figura 51, muestra los valores de estabilidad, siendo respectivamente 1475.2 kg para 4.5% de bitumen, 2116.5 kg para 5% de bitumen, 1713.7% para 5.5% de bitumen y 1478.5 kg para 6% de bitumen. Según las Especificaciones Técnicas para mezclas asfálticas en caliente tipo B, la estabilidad debe ser de 554.73 kg mínimo, por lo que los valores se encuentran dentro de los rangos aceptables, siendo el 5% el contenido óptimo de bitumen requerido.

Flujo 0.01" – %Concreto Asfáltico

Figura 52

Flujo 0.01" - %concreto asfáltico de diseño de mezcla asfáltica en caliente para pavimento flexible según el método Marshall

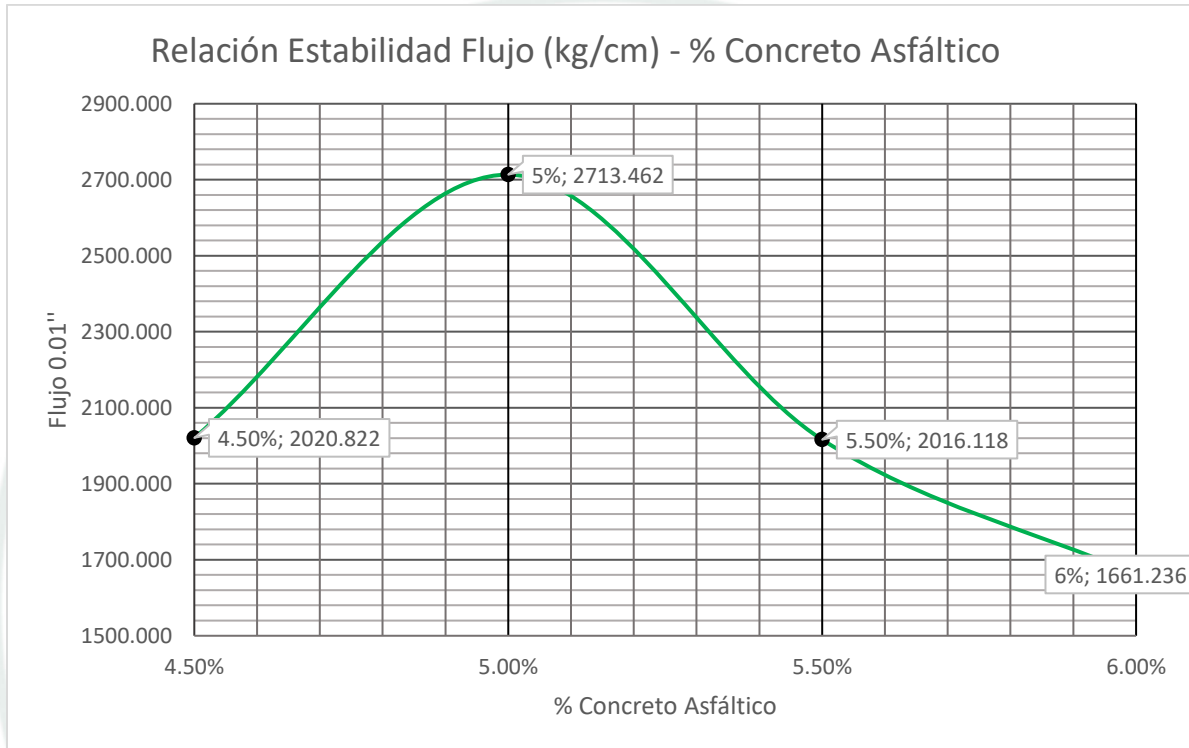


Nota. La figura 52, muestra los valores de flujo, siendo respectivamente 7 para 4.5% de bitumen, 8 para 5% de bitumen, 9 para 5.5% de bitumen y 9 para 6% de bitumen. Según las Especificaciones Técnicas para mezclas asfálticas en caliente de tipo B, debe estar en un rango de 8-16, por lo que los valores se encuentran dentro de los rangos aceptables, a partir del 5% de bitumen.

Relación Estabilidad – Flujo

Figura 53

Relación estabilidad - flujo (kg/cm) - % concreto asfáltico de diseño de mezcla asfáltica en caliente para pavimento flexible según el método Marshall



Nota. La figura 53, muestra la relación estabilidad – flujo y porcentaje de bitumen, estando respectivamente en kg/cm^3 , 2020.822 para 4.5%, 2713.462 para 5%, 2016.188 para 5.5% y 1661.236 para 6%.

Rice

Tabla 166

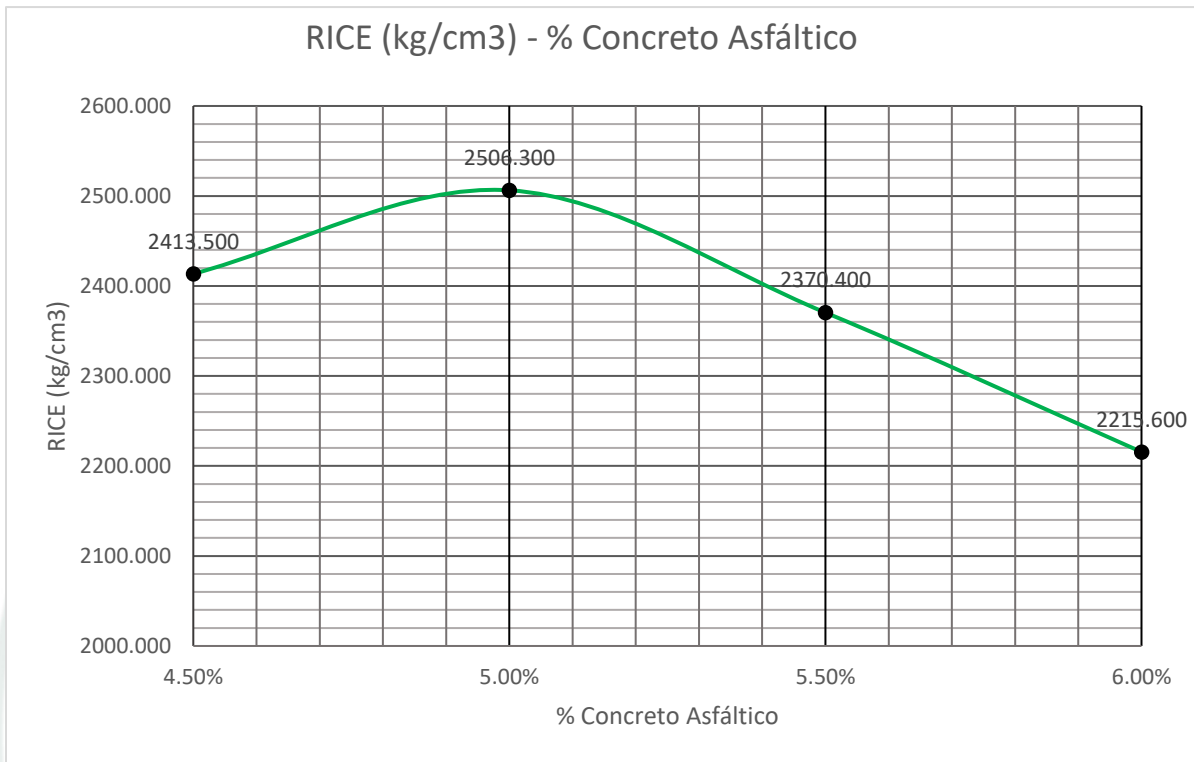
Ensayo RICE para briquetas de asfalto de diseño de mezcla asfáltica en caliente para pavimento flexible según el método Marshall

Ítem	Descripción	
6	Porcentaje de asfalto (%)	5.00
7	Temperatura (°C)	25.0
8	Peso del recipiente inc. Tapa en aire (g)	3171.0
9	Peso calibrado del recipiente inc. Tapa + agua "E" (g)	9685.0
10	Peso de recipiente inc. tapa + muestra seca en el aire (g)	4365.0
11	P. de recipiente inc tapa + muestra + agua después del vacío "D" (g)	10404.0
12	P. de muestra seca en el aire "A" (g)	1194.0
13	P. de muestra en agua "C" (g)	719.0
14	Volumen de la muestra "A - C = A + D - E" (cm ³)	475.00
15	Peso específico aparente	2.514
16	Peso unitario (kg/m³)	2506.3

Nota. La tabla 166, muestra el ensayo RICE para el contenido óptimo de bitumen, siendo este el 5%.

Figura 54

RICE (kg/cm³) - %Concreto asfáltico



Nota. La figura 54, muestra los valores del ensayo de RICE para cada dosificación de bitumen, estando en kg/cm³, teniendo, 2413.5 para 4.5%, 2506.3 para 5%, 2370.4 para 5.5% y 2215.6 para 6%.

Bulk

Tabla 167

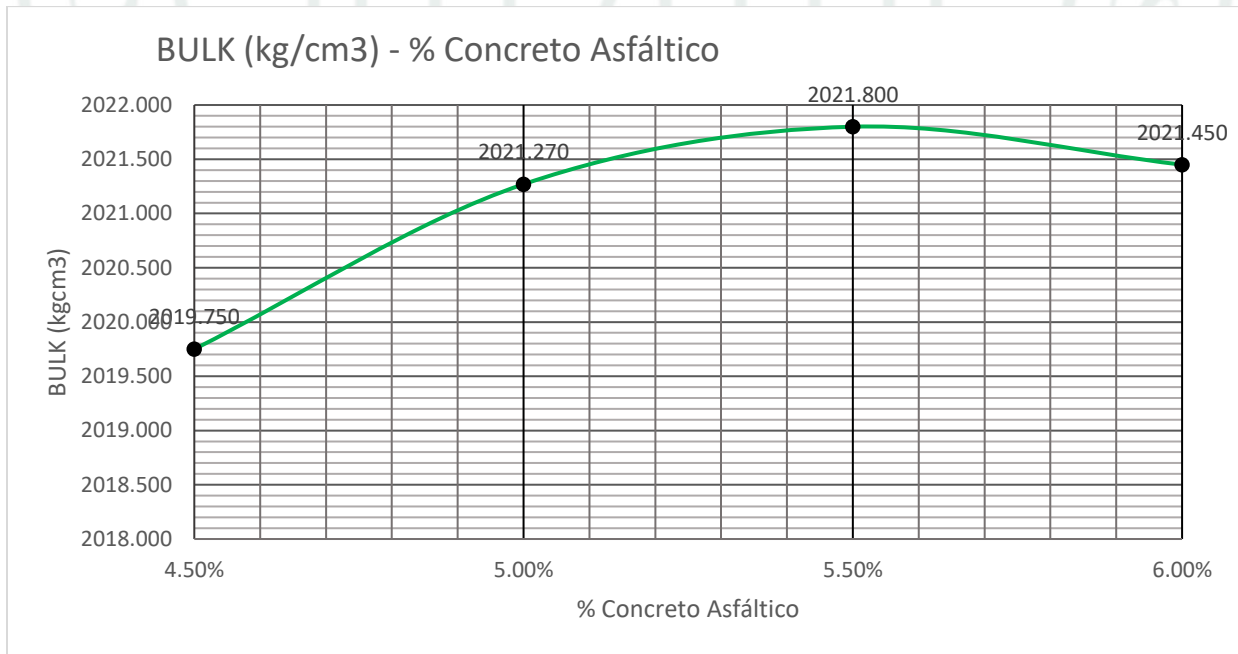
Ensayo BULK para briquetas de asfalto de diseño de mezcla asfáltica en caliente para pavimento flexible según el método Marshall

Muestra	1	2	3
Porción de la muestra	5	5	5
Masa de la muestra (g)	1,186.60	1184.8	1177.2
Masa de canastilla (g)	854.3	854.3	854.2
Masa de canastilla + muestra+ agua (g)	1546	1141.2	1535.8
Peso de especimen en agua	691.7	286.9	681.6
Peso de muestra SSS en aire (g)	1187	1185.7	1178.7
Temperatura (°C)	25	25	25
Peso específico aparente	2.40	1.32	2.37
Peso unitario (kg/m3)	2388.53	1314.25	2361.03
Peso unitario bulk (kg/m3)	2388.53	1314.25	2361.03

Nota. La tabla 167, muestra el ensayo BULK de las briquetas para el porcentaje óptimo de bitumen.

Figura 55

BULK (kg/cm3) - % Concreto asfáltico

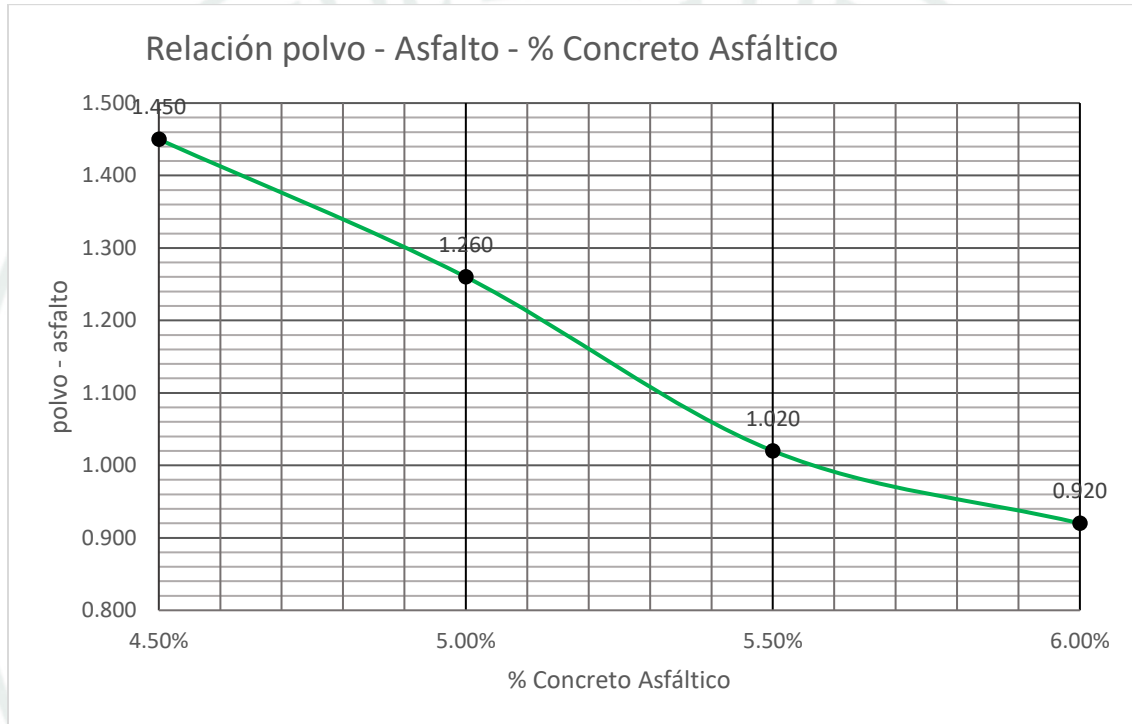


Nota. La figura 55, muestra los valores del peso unitario BULK en kg/cm³, siendo 2019.75 para 4.5%, 2021.27 para 5%, 2021.8 para 5.5% y 2021.45 para 6%.

Relación polvo – asfalto

Figura 56

Relación Polvo - Asfalto - %concreto asfáltico



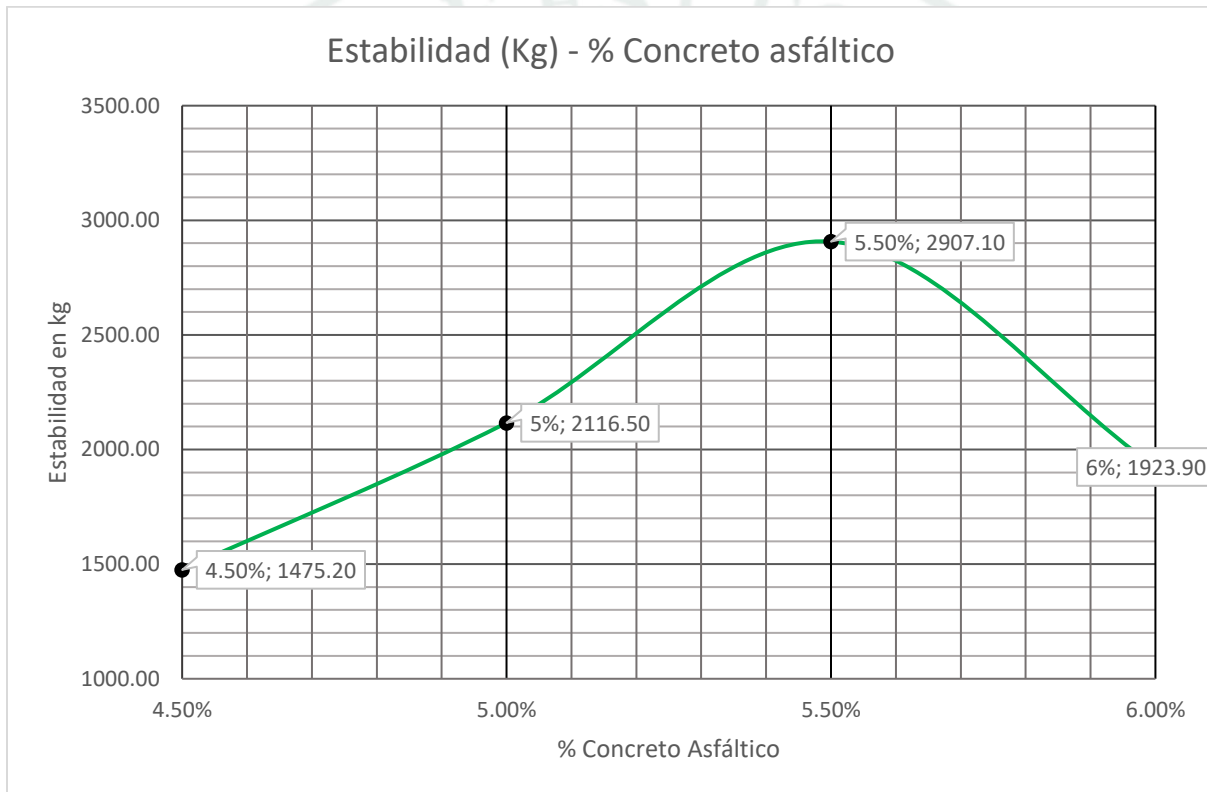
Nota. La figura 56, muestra los valores para la relación polvo – asfalto según el porcentaje de bitumen, siendo 1.45 para 4.5%, 1.26 para 5%, 1.02 para 5.5% y 0.92% para 6%.

Interpretación de los datos con FILLER (PTAP)

Estabilidad (kg) – Concreto asfáltico

Figura 57

Estabilidad (kg) - % concreto asfáltico de DMAC para pavimento flexible según el método Marshall

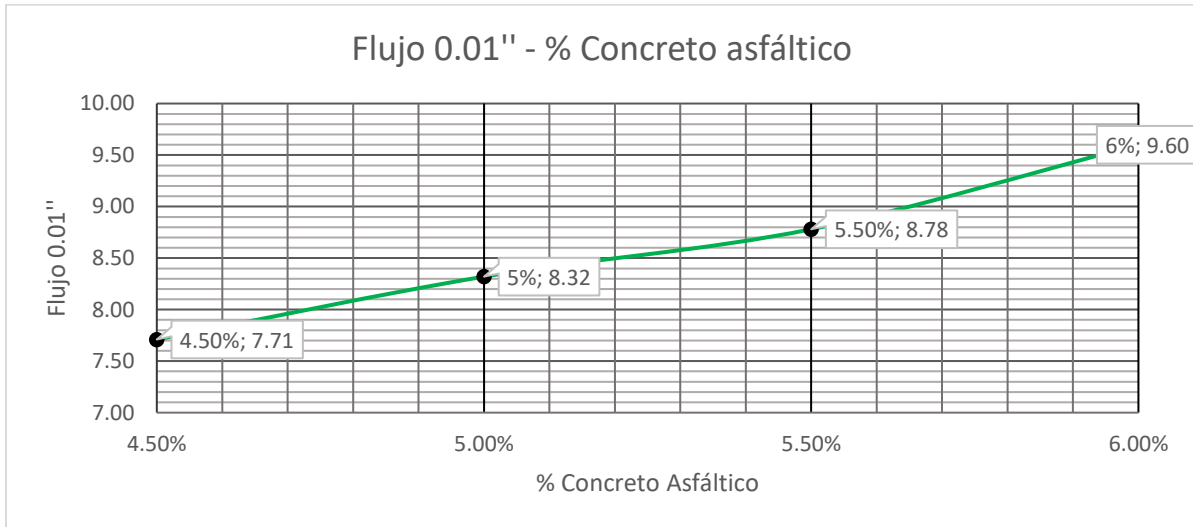


Nota. La figura 57, muestra los valores de estabilidad, siendo respectivamente 1475.2 kg para 4.5% de bitumen, 2116.5 kg para 5% de bitumen, 2907.1% para 5.5% de bitumen y 1923.9 kg para 6% de bitumen. Según las Especificaciones Técnicas para mezclas asfálticas en caliente tipo B, la estabilidad debe ser de 554.73 kg mínimo, por lo que los valores se encuentran dentro de los rangos aceptables, siendo el 5.5% el contenido óptimo de bitumen requerido.

Flujo 0.01" – Concreto Asfáltico

Figura 58

Flujo 0.01" - %concreto asfáltico de DMAC para pavimento flexible según el método Marshall



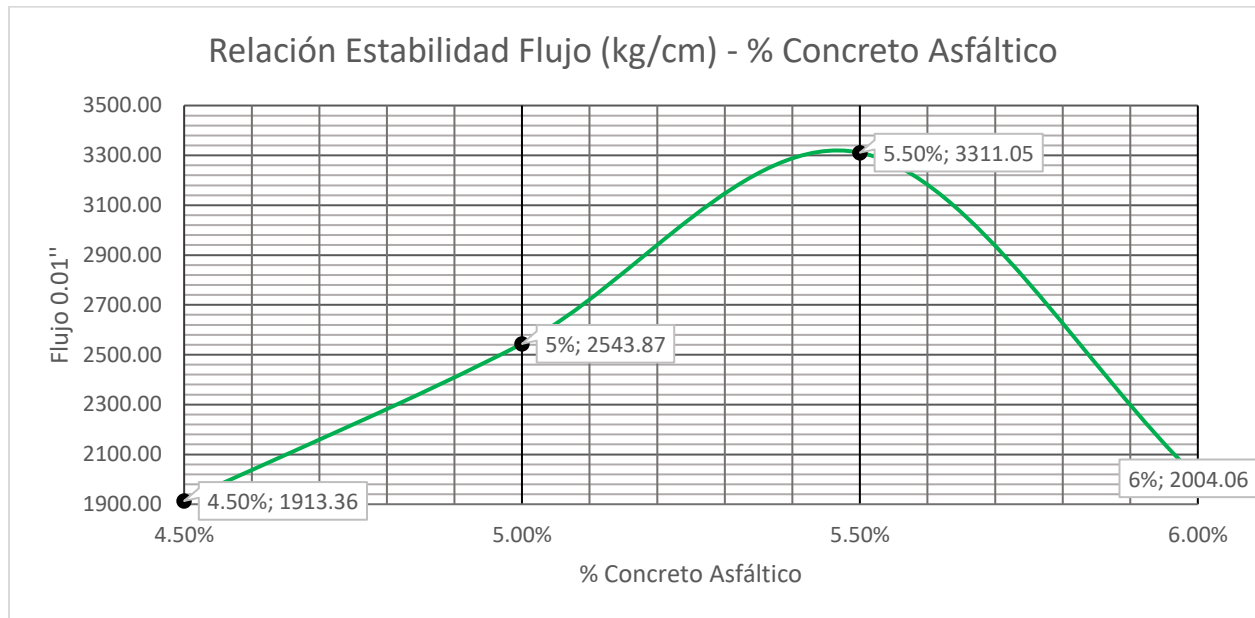
Nota: La figura 58, muestran los valores de flujo, siendo respectivamente 8 para 4.5% de bitumen, 8 para 5% de bitumen, 9 para 5.5% de bitumen y 10 para 6% de bitumen. Según las Especificaciones Técnicas para MAC de tipo B, debe estar en un rango de 8-16, por lo que los valores se encuentran dentro de los rangos aceptables, a partir del 5% de bitumen.

Relación Estabilidad – Flujo

Figura

59

Relación estabilidad – flujo



Nota. La figura 59, muestra la relación estabilidad – flujo y porcentaje de bitumen, estando respectivamente en kg/cm^3 , 1913.36 para 4.5%, 2543.87 para 5%, 3311.05 para 5.5% y 2004.06 para 6%.

Rice

Tabla 168

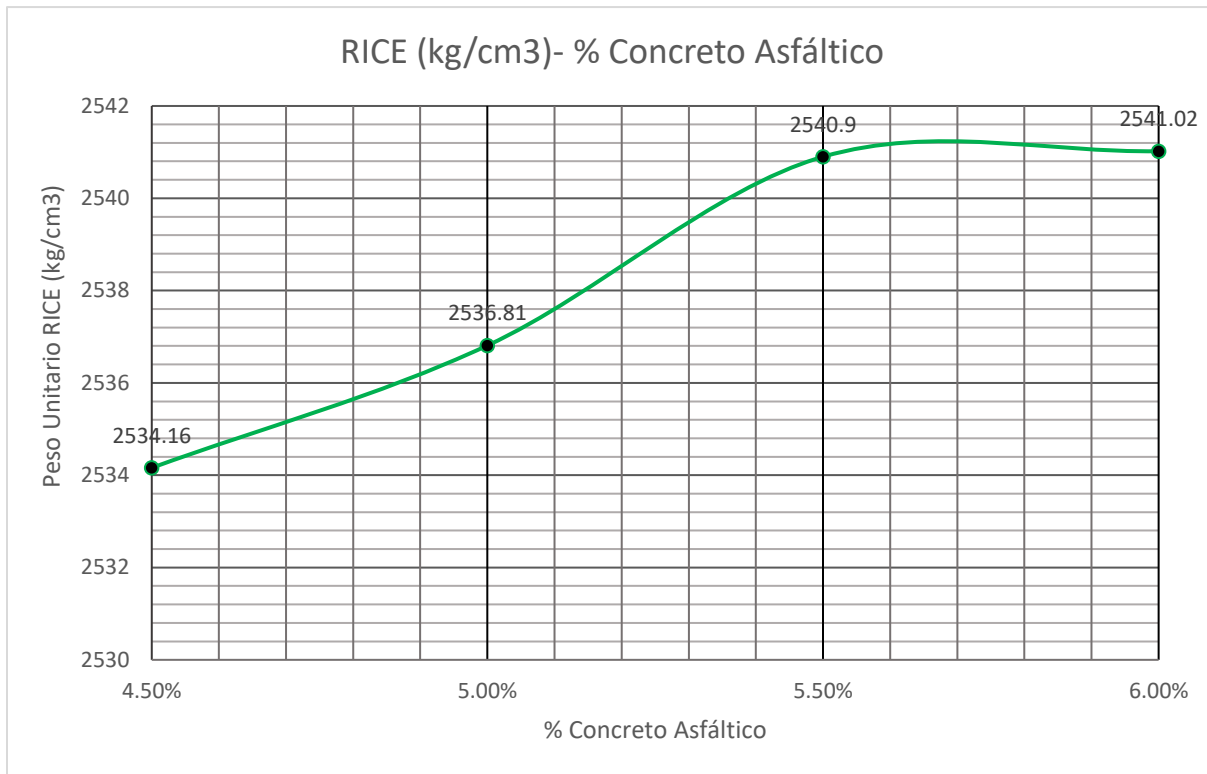
Ensayo RICE para briquetas de asfalto de DMAC para pavimento flexible según el método Marshall

Ítem	Descripción	
6	Porcentaje de asfalto (%)	5.50
7	Temperatura (°C)	25.0
8	Peso del recipiente inc. Tapa en aire (g)	2248.5
9	Peso calibrado del recipiente inc. Tapa + agua "E" (g)	3076.0
10	Peso de recipiente inc. tapa + muestra seca en el aire (g)	4287.5
11	P. de recipiente inc tapa + muestra + agua después del vacío "D" (g)	4285.5
12	P. de muestra seca en el aire "A" (g)	2039.0
13	P. de muestra en agua "C" (g)	1209.5
14	Volumen de la muestra "A - C = A + D - E" (cm ³)	829.50
15	Peso específico aparente	2.458
16	Peso unitario (kg/m³)	2450.9

Nota. La tabla 168, muestra el ensayo RICE para el contenido óptimo de bitumen, siendo este el 5.5%.

Figura 60

RICE (kg/cm³) - % Concreto asfáltico



Nota. La figura 60, muestra los valores del ensayo de RICE para cada dosificación de bitumen, estando en kg/cm³, teniendo, 2534.16 para 4.5%, 2536.81 para 5%, 2540.9 para 5.5% y 2541.02 para 6%.

Bulk

Tabla 169

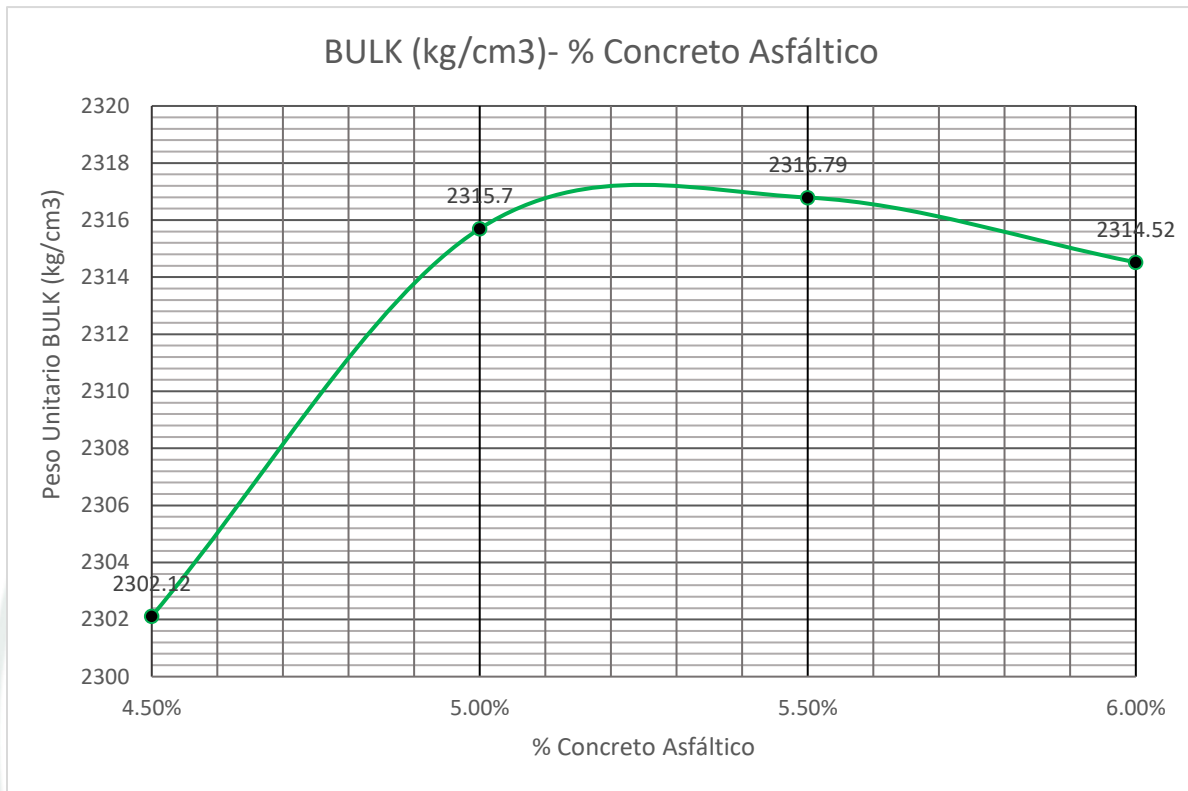
Ensayo BULK para briquetas de asfalto de DMAC para pavimento flexible según el método Marshall

Muestra	1	2	3
Dosificación	5.5	5.5	5.5
p. de la muestra (g)	1,181.00	1181	1180
p. de canastilla (g)	887	885	886
p. de canastilla + muestra+ agua (g)	1556	1575	1549
Peso de especimen en agua	669	690	663
Peso de muestra SSS en aire (g)	1182	1183	1182
Temperatura (°C)	25	25	25
Peso específico aparente	2.30	2.40	2.27
Peso unitario (kg/m3)	2295.24	2388.35	2266.78
Peso unitario bulk (kg/m3)	2295.24	2388.35	2266.78

Nota. La tabla 169, muestra el ensayo BULK de las briquetas para el porcentaje óptimo de bitumen.

Figura 61

Bulk (kg/cm³)-% concreto asfáltico

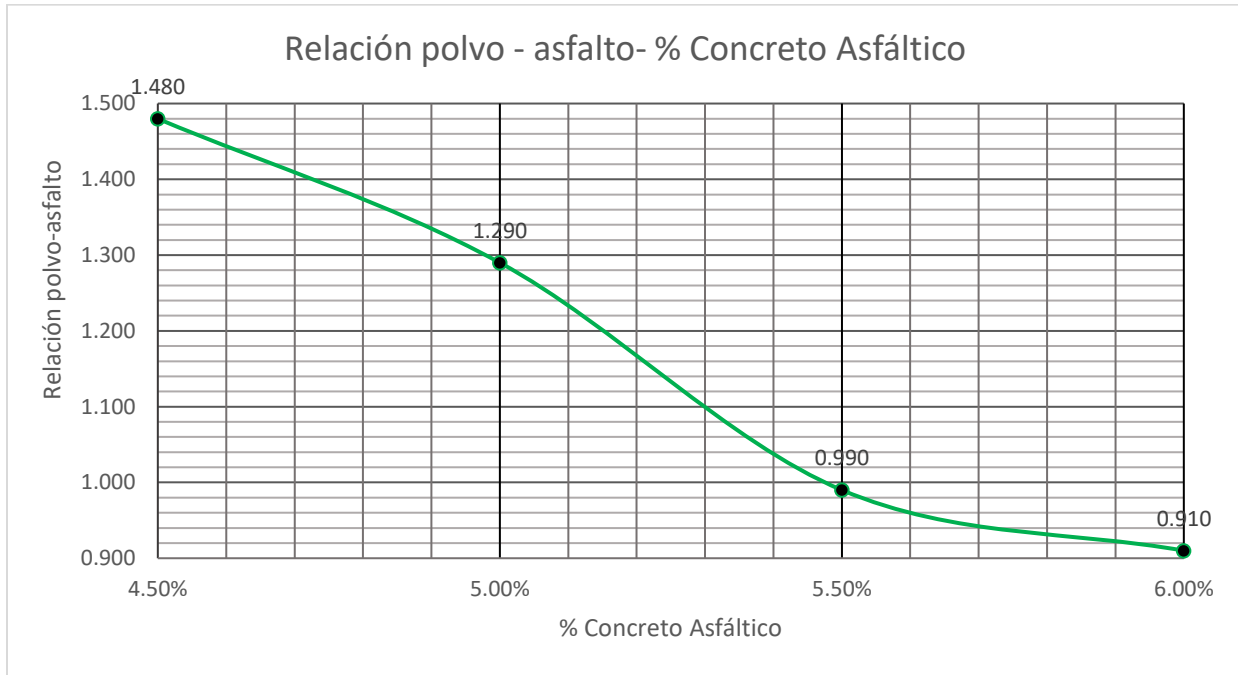


Nota. La figura 61, muestra los valores del peso unitario BULK en kg/cm³, siendo 2302.12 para 4.5%, 2315.70 para 5%, 2316.79 para 5.5% y 2314.52 para 6%.

Relación polvo – asfalto

Figura 62

Relación polvo – asfalto



Nota. La figura 62, muestra los valores para la relación polvo – asfalto según el porcentaje de bitumen, siendo 1.48 para 4.5%, 1.29 para 5%, 0.99 para 5.5% y 0.91% para 6%.

Cuadro Resumen

Tabla 170

Resumen de resultados DMAC por el Método Marshal SIN FILLER

DMAC por el Método Marshal SIN FILLER				
Descripción	Porcentaje de bitumen (%)			
	4.5	5	5.5	6
Estabilidad (kg)	1475.2	2116.5	1713.7	1478.5
Flujo 0.01"	7	8	9	9
Estabilidad – Flujo (kg/cm)	2020.82	2713.46	2016.12	1661.24
Rice (kg/m³)	2413.5	2506.3	2370.4	2215.6
Bulk (kg/m³)	2019.75	2023.27	2021.80	2023.45
Relación polvo - asfalto	1.45	1.26	1.02	0.92
Contenido óptimo de bitumen				5%

Tabla 171

Resumen de resultados DMAC por el Método Marshal CON FILLER

DMAC por el Método Marshal CON FILLER				
Descripción	Porcentaje de bitumen (%)			
	4.5	5	5.5	6
Estabilidad (kg)	1475.2	2116.5	2907.1	1923.9
Flujo 0.01"	8	8	9	10
Estabilidad – Flujo (kg/cm)	1913.36	2543.47	3311.05	2004.06
Rice (kg/m³)	2534.16	2535.81	2450.9	2541.02
Bulk (kg/m³)	2302.12	2315.70	2315.79	2314.52
Relación polvo - asfalto	1.48	1.29	0.99	0.91
Contenido óptimo de bitumen				5.5%

DM De Pavimento Rígido

Caracterización De Los Agregados

Agregado Fino

Granulometría por tamizado de agregados – MTC E 204

Tabla 172

Husos granulométrico para mezcla asfáltica en caliente

Tamiz	Porcentaje que pasa		
	MAC -1	MAC -2	MAC -3
25.0 mm (1")	100		
19.0 mm (¾")	80-100	100	
12.5 mm (½")	67-85	80-100	
9.5 mm (¾")	60-77	70-88	100
4.75 (Nº 4)	43-54	51-68	65-87
2.00 mm (Nº 10)	29-45	38-52	43-61
425 µm (Nº 40)	14-25	17-28	16-29
180 µm (Nº 80)	8-17	8-17	9-19
75 µm (Nº 200)	4-8	4-8	5-10

Nota. En la tabla 172, se muestra los husos granulométricos para pavimento flexible, según el ensayo granulométrico, la curva se encuentra dentro del Huso de MAC 2, el cual se considera ideal para pavimentos urbanos.

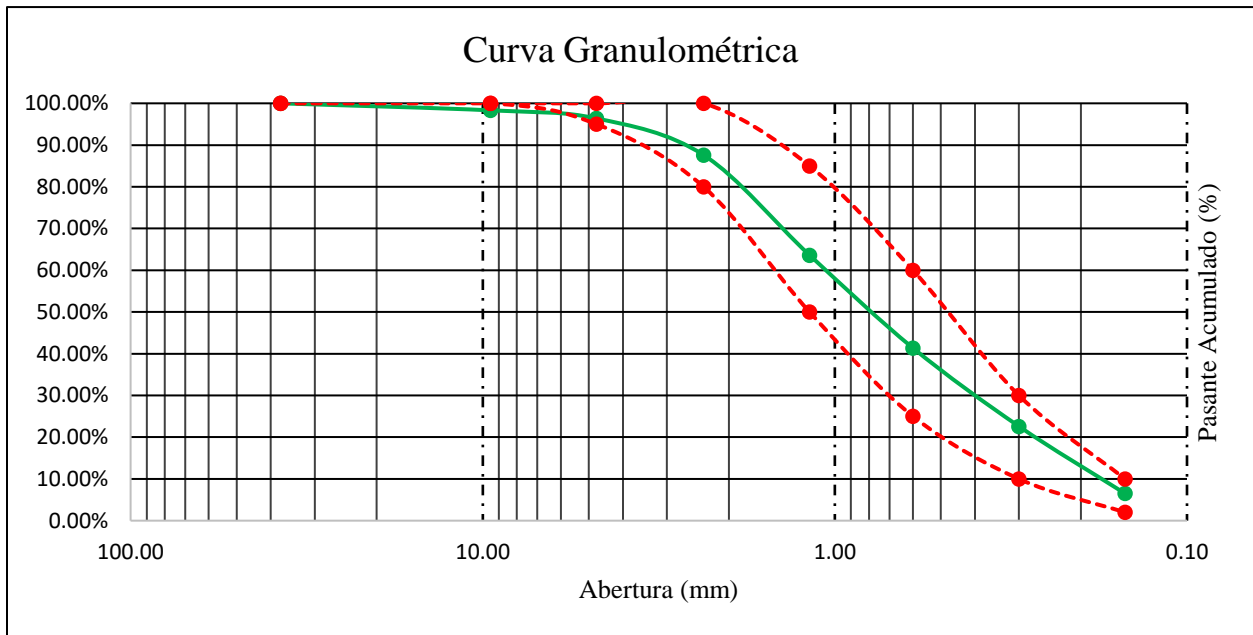
Tabla 173*Análisis granulométrico del agregado fino para pavimento rígido*

Tamiz	Abertura (mm)	P. Ret.(g)	% Ret.	% Ret. Acum.	%Pas. Acum.
¾"	37.50	8.34	1.17%	0.00%	100.00%
⅜"	9.50	11.84	1.67%	1.67%	98.33%
#4	4.75	13.62	1.92%	3.58%	96.42%
#8	2.36	61.45	8.65%	12.24%	87.76%
#16	1.18	168.42	23.71%	35.95%	64.05%
#30	0.60	156.28	22.00%	57.95%	42.05%
#50	0.30	131.72	18.55%	76.50%	23.50%
#100	0.15	112.87	15.89%	92.39%	7.61%
FONDO	0.00	45.73	6.44%	98.83%	1.17%
Total		710.27	100%		

Nota. En la tabla 173, se muestra el análisis granulométrico del agregado para el diseño de mezcla por el método ACI para pavimento rígido.

Figura 63

Curva granulométrica para caracterización de agregados



Nota. En la figura 63, se muestra la curva granulométrica el cual cae en el Huso 2, del MAC 2, correspondiente para pavimentos rigido según las EE.TT. del MTC. Asimismo, se observa que debe agregarse un porcentaje de filler para que este se encuentre en su totalidad dentro del Huso granulométrico.

Contenido total de humedad de agregados

Tabla 174

Contenido de humedad del agregado fino para pavimento rígido

C.H. NATURAL				
% de humedad		1.3		
1	Recipiente N°	A1	A2	A3
2	Masa suelo húmedo + masa recipiente (g)	425.6	423.74	425.4
3	Masa suelo seco + masa recipiente (g)	420.9	419.04	420.7
4	Masa de agua (g) (1-2)	4.7	4.7	4.7
5	Masa del recipiente (g)	71.62	71.61	71.62
6	Suelo Seco (g) (3-5)	349.28	347.43	349.08
7	% de humedad	1.3	1.4	1.3

Nota. En la tabla 174, se muestra datos y resultados del ensayo de contenido de humedad en agregados realizado según el MEM del MTC.

Peso unitario y vacíos de los agregados

Tabla 175

Porcentaje de vacíos del agregado fino para pavimento rígido

Muestra N°		1	2	3
1	p. de molde + suelo seco (g)	10052	10094	10072
2	p. de molde (g)	6989	6974	6952
3	p. de la muestra (g)	3063	3120	3120
4	Volumen de la muestra (cc)	2124	2124	2124
5	P.U. suelto (g/cm ³)	1.44	1.47	1.47
6	Porcentaje de vacíos (%)		32	
Muestra N°		1	2	3
1	M. de molde + suelo seco (g)	10028.2	9969.4	10013.1
2	Masa de molde (g)	6461	6461	6461
3	Masa de la muestra (g)	3567.2	3508.4	3568.1
4	Volumen de la muestra (cc)	2124	2124	2124
5	Peso unitario compactado (g/cm ³)	1.68	1.65	1.67
6	Porcentaje de vacíos (%)		29	

Nota. En la tabla 175, se muestra los valores obtenidos del ensayo.

Terrones de arcilla y partículas friables

Tabla 176

Partículas friables y terrones de arcilla en el agregado fino para pavimento rígido

Tamaño de las partículas de las muestras	Peso mínimo de la muestra (g)		
4,75 mm a 9,5 mm (No.4 a 3/8 pulg)	1000		
9,5 mm a 19,0 mm (3/8 pulg a 3/4 pulg)	2000		
19,0 mm a 37,5 mm (3/4 pulg a 1 1/2 pulg)	3000		
Mayor que 37,5 mm (1 1/2 pulg)	5000		
Tamaño de las partículas de las muestras	Tamiz a utilizar para la separación		
Agregado fino retenido sobre el tamiz de 1,18 mm (No 16)	850 um (N° 20)		
4,75 mm a 9,5 mm (N°4 a 3/8 pulg)	2,36 mm (N° 8)		
9,5 mm a 19,0 mm (3/8 pulg a 3/4 pulg)	4,75 mm (N° 4)		
19,0 mm a 37,5 mm (3/4 pulg a 1 1/2 pulg)	4,75 mm (N° 4)		
Mayor que 37,5 mm (1 1/2 pulg)	4,75 mm (N° 4)		
Descripción	M1	M2	M3
Peso de muestra (g)	30.8	30.6	30.6
Peso retenido en tamiz de separación (g)	30.7	30.5	30.5
Peso de partículas dezmenuzables y terrones de arcilla (g)	0.1	0.1	0.1
Partículas dezmenuzables y terrones de arcilla (%)	0.3	0.3	0.3
		0.3	

Nota. En la tabla 176, se presenta el tamaño de partículas para determinar los terrones de arcilla y el porcentaje de partículas friables.

Determinación del índice de plasticidad

Tabla 177

Índices de plasticidad del agregado fino para pavimento rígido

	LÍMITE LÍQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO
N° DE CÁPSULA		
MASA TARA + SUELO HÚMEDO (A)		
MASA TARA + SUELO SECO (B)		
MASA DE LA TARA (C)		
MASA DEL AGUA (A-B)	NP	NP
MASA SUELO SECO (B-C)		
HUMEDAD ($W=(A-B)/(B-C)*100$)		
N° DE GOLPES		
LÍMITE LÍQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO	ÍNDICE PLÁSTICO
-	-	-

Nota. En la tabla 177, se muestran los valores obtenidos del ensayo.

Equivalente de arena

Tabla 178

Equivalente de arena del agregado fino para pavimento rígido

IDENTIFICACIÓN		M1		
MUESTRA N°		1	2	3
A	Hora ingreso a saturación	11:50	11:50	12:00
2	Hora de salida de saturación (A + 10')	12:00	12:00	12:10
B	Hora entrada a decantación	12:05	12:05	12:15
4	Salida de decantación (B + 20')	12:25	12:25	12:35
5	Altura de material fino (cm)	3.9	4.1	4.2
6	Altura de arena (cm)	2.3	2.5	2.6
7	Equiv. Arena (6/5*100)	59	61	61
8	Promedio Equiv. Arena (%)		61	

Nota. En la tabla 178, se muestra los valores obtenidos del ensayo.

Partículas livianas en los agregados

Tabla 179

Partículas livianas del agregado fino para pavimento rígido

TMN de Agregado		Masa Mínima de Muestra (g)
4.75 mm	(N° 4)	200
19.0 mm	(3/4 pulg)	3000
37.5 mm	(1 1/2 pulg)	5000
75.0 mm	(3 pulg)	10000
Partículas livianas en el agregado fino (menor / igual a la malla Nro 4)		
Líquido pesado empleado	Cloruro de zinc	
Peso específico	2	
DESCRIPCIÓN	M1	M2
Peso seco de muestra de agregado fino (g)	200.0	
Peso seco de partículas que flotan (g)	0.6	
Partículas livianas (%)	0.3	

Nota. En la tabla 179, se muestra los datos presentados para el porcentaje de partículas livianas en el agregado fino.

Determinación cualitativa de arcillas nocivas utilizando azul de metileno

Tabla 180

Determinación de azul de metileno para agregado fino para el pavimento rígido

IDENTIFICACIÓN	M1	
MUESTRA N°	1	2
Muestra (g)	10.00	10.00
Agua destilada (mL)	30	30
Volumen de azul de metileno (mg)	10.2	9.7
Valor de azul de metileno (mg/g)	5.1	4.85

Nota. En la tabla 180, se presenta los valores de azul de metileno para el agregado fino para el pavimento rígido.

Peso específico y absorción de agregados finos

Tabla 181

Determinación de peso específico y absorción del agregado fino para pavimento rígido

Muestra	1	2	3
p. de la muestra SSS (neto) (g)	300.05	300.05	300.05
p. de fiola + agua + muestra SSS (g)	829.25	829.25	832.17
p. calibrada de fiola + agua (g)	640.00	640.02	643.06
p. de recipiente (g)	228.00	219.80	208.60
p. de recipiente + muestra seca (g)	521.00	512.30	502.10
Peso específico saturado superficialmente seco (g)	2.71	2.71	2.70
Peso específico de masa (g)	2.64	2.64	2.65
Peso específico aparente (g)	2.82	2.83	2.81
Absorción (%)	2.4%	2.6%	2.2%

Nota. En la tabla 181, se muestran los valores obtenidos del ensayo.

Determinación cuantitativa de cloruros y sulfatos solubles en agua para agregados en concreto

Tabla 182

Contenido de sales solubles del agregado fino para pavimento rígido

Contenido de Sales Solubles	
Descripción	Muestra 1
Peso de muestra (g)	100
P. de vaso de precipitado (g)	200.56
V. de agua (ml)	350
V. de Alicuota (ml)	100
Peso de vaso de precipitado + muestra (g)	200.61
Contenido de Sales Solubles (mg/kg)	1750
	0.18
	% de peso

Nota. En la tabla 182, se muestran los valores del ensayo.

Tabla 183

Contenido de cloruros solubles del agregado fino para pavimento rígido

Contenido de Cloruros Solubles	
Descripción	Muestra 1
Volumen de AgNO₃ para la muestra (ml)	0.8
Volumen de alicuota (ml)	30
Volumen de agua destilada en solución (ml)	350
P. de muestra (g)	100
P. de muestra en alicuota (g)	8.6
D (g)	3.5
Contenido de Cloruros Solubles (g)	134.6
	0.01
	% de peso

Nota. En la tabla 183, se muestran los valores obtenidos del ensayo.

Tabla 184*Contenido de sulfatos solubles del agregado fino para pavimento rígido*

Contenido de Sulfatos Solubles		
Descripción	Muestra 1	
Peso crisol (g)	27.6316	
Peso crisol + muestra (g)	27.6504	
Peso de alicuota (ml)	30	
Peso de Ba SO₄ (g)	0.0107	
Volumen de agua en solución (ml)	350	
P. de muestra (g)	100	
P. de muestra en alicuota (g)	8.6	
Contenido de Sulfatos Solubles	513.7	
	0.05	% de peso

Nota. En la tabla 184, se muestran los valores obtenidos en el ensayo.

Agregado Grueso

Abrasión máquina de los ángeles

Tabla 185

Se presenta el cuadro de abrasión de los ángeles

TAMICES		PESO RETENIDO DE LOS AGREGADOS	
QUE PASA	RETENIDO	500 REVOLUCIONES GRADUACIÓN "A"	1000 REVOLUCIONES GRADUACIONES "E"
1 ½"	1"	690.27	1255.80
1"	¾"	686.94	1250.10
¾"	⅜"	990.42	1254.90
⅜"	Nº 4	481.76	1249.00
Nº 4			
Masa inicial		3324	5010
Ret. en la malla Nº 12		2774	3210
Que pasa la malla Nº 12		550	1799
% de pérdida		17	36
PORCENTAJE DESGASTE MÁQUINA LOS ÁNGELES		26	0
ESFERAS	Peso (g)	5	Nro.
OBSERVACIONES		RESISTENCIA AL DESGASTE	74
		PORCENTAJE DE PÉRDIDA	26

Nota. En la tabla 185, se presenta los valores obtenidos en el ensayo.

Terrones de arcilla y partículas friables

Tabla 186

Tamaño de las partículas friables y terrones de arcilla de los agregados gruesos para pavimento rígido

Tamaño de las partículas de las muestras	Peso mínimo de la muestra (g)		
4,75 mm a 9,5 mm (No.4 a 3/8 pulg)	1000		
9,5 mm a 19,0 mm (3/8 pulg a 3/4 pulg)	2000		
19,0 mm a 37,5 mm (3/4 pulg a 1 1/2 pulg)	3000		
Mayor que 37,5 mm (1 1/2 pulg)	5000		
Tamaño de las partículas de las muestras	Tamiz a utilizar para la separación		
Agregado fino retenido sobre el tamiz de 1,18 mm (No 16)	850 um (N° 20)		
4,75 mm a 9,5 mm (N°4 a 3/8 pulg)	2,36 mm (N° 8)		
9,5 mm a 19,0 mm (3/8 pulg a 3/4 pulg)	4,75 mm (N° 4)		
19,0 mm a 37,5 mm (3/4 pulg a 1 1/2 pulg)	4,75 mm (N° 4)		
Mayor que 37,5 mm (1 1/2 pulg)	4,75 mm (N° 4)		
Descripción	M1	M2	M3
Peso de muestra (g)	1000.0	1000.0	1000.0
Peso retenido en tamiz de separación (g)	998.7	999.4	998.8
Peso de partículas desmenuzables y terrones de arcilla (g)	1.3	0.6	1.2
Partículas desmenuzables y terrones de arcilla (%)	0.1	0.1	0.1
		0.1	

Nota. En la tabla 186, se presenta los pesos de partículas desmenuzables y terrones de arcilla para poder sacar sus porcentajes respectivos.

Partículas livianas en los agregados

Tabla 187

Se presenta el porcentaje de partículas livianas del agregado grueso para el pavimento rígido

Tamaño Máximo Nominal de Agregado (Tamices de Abertura Cuadrada)		Masa Mínima de Muestra (g)
4.75 mm	(N° 4)	200
19.0 mm	(3/4 pulg)	3000
37.5 mm	(1 1/2 pulg)	5000
75.0 mm	(3 pulg)	10000

Partículas livianas en el agregado fino (menor / igual a la malla 3/4)

Líquido pesado empleado	Cloruro de zinc	
Peso específico	2	
DESCRIPCIÓN	M1	M2
Peso seco de muestra de agregado fino (g)	3000.0	
Peso seco de partículas que flotan (g)	9.0	
Partículas livianas (%)	0.3	

Nota. En la tabla 187, se muestra el peso seco del agregado fino y eso seco de partículas que flotan para poder determinar el porcentaje de partículas livianas del agregado grueso para el pavimento rígido.

Porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso

Tabla 188

Porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso para pavimento rígido

Tamiz (plg)	Abertura (mm)	A (g)	B (g)	C (B/A)*100	D % parcial	E (C*D)
1"	25.4	134.00	23.13	17.26		
3/4"	19.05	165.00	17.58	10.65		
1/2"	12.7	246.00	41.00	16.67	33.33	555.56
3/8"	8.75	193.00	40.00	20.73	26.15	542.01
1/4"	6.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total		738.00	121.71		59.49	1097.56
Porcentaje con una cara fracturada					18	
Tamiz (plg)	Abertura (mm)	A (g)	B (g)	C (B/A)*100	D % parcial	E (C*D)
1"	25.4	134.00	199.00	148.51		
3/4"	19.05	165.00	124.00	75.15		
1/2"	12.7	246.00	75.00	30.49	32.28	984.25
3/8"	8.75	217.00	98.00	45.16	28.48	1286.09
1/4"	6.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total		762.00	496.00		60.76	2270.34
Porcentaje con dos caras fracturadas					37	

Nota. En la tabla 188, se muestran los valores obtenidos del ensayo.

Partículas chatas y alargadas en agregados

Tabla 189

Partículas chatas y alargadas del agregado grueso para pavimento rígido

Tam iz (plg)	Abertura (mm)	Retenido parcial %	Fracción analizada		Partículas		Partículas		Observaciones	
			# de partículas	gr	Chata s (gr)	Alargad as (gr)	Chata s (%)	Alargad as (%)	Chatas	Alargad as
1"	25.40	190.00	40	190.0	73.1	190.9				
3/4"	19.05	46.00	20	170.0	46.0	0.0				
1/2"	12.70	132.00	10	93.0	34.1	0.0	25.8	0.00	2.58	0.00
3/8"	8.75	639.00	11	96.0	47.2	48.7	7.39	7.62	0.81	0.84
1/4"	6.35									
Total		1007.00	81				33.2	2	3.40	0.84
									OBSERVACIONES	
						4				
						10				

Nota. En la tabla 189, se muestran los valores obtenidos del ensayo.

Cuadro resumen

Tabla 190

Cuadro resumen de ensayos requeridos para pavimento flexible según MTC

ENSAYO	RES.	EE.TT. MTC	MTC - EE.TT.
AGREGADOS FINOS			
Equivalente de arena	61	75	C
Terrones de arcilla	0.3	3 máx.	C
Determinación del Índice de plasticidad (en malla Nro. 40)	NP	NP	C
Sales solubles totales	0.24%	1.2% máx.	C
Absorción	2.4%	4% máx.	C
AGREGADOS GRUESOS			
Abrasión máquina de los ángeles	26%	40% máx.	C
Terrones de arcilla y partículas friables	0.1%	3% mín.	C
Partículas chatas y alargadas en agregados	4%	15% máx.	C
Porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso	45	60% máx.	C

C: CUMPLE

Nota. En la tabla 190, se muestra el resumen de los resultados obtenidos de los ensayos requeridos según las EE.TT. del MTC, los cuales se encuentran dentro de los rangos establecidos.

DM De Concreto Por El Método Aci

Parámetros Básicos

Tabla 191

Parámetros básicos para el diseño de mezcla de pavimento rígido

INSUMO	P.E. SECO	P. UNITARIO COMPACTADO	P. UNITARIO SUELTO	MODULO DE FINEZA	% DE ABSORCION	% HUMEDAD
Cemento T-I	3150	1400				
Agua	1000					
Arena	2640	1672	1465	2.4	2.1	2.34
Piedra	2430	1433	1356	7	2.8	0.26
Lodo	2250		Dosis (0.5% peso del cemento)			

Nota. En la tabla 191, se muestra los parámetros básicos y necesarios para poder realizar el diseño de mezcla por el método ACI para pavimentos rígidos, realizando un diseño de mezcla principal, para después realizar 3 diseños adicionando el lodo en proporciones del 5%, 10% y 15%, teniendo como mejor resultado el DM con 5% de lodo.

DM

DM de mezcla sin lodo

Tabla 192

Diseño de pavimento rígido sin lodo

INSUMO	PESO EN KG/M3	VOLUMEN EN M3/M3	PROPORCIONES
agua	212.506	0.190	17.226
cemento	524.283	0.166	1.000
Lodo	0.000	0.000	0.000
Aire		0.015	
pedra	945.780	0.389	1.804
Arena	631.887	0.239	1.205
BALANCE TOTAL	2314.456	1.000	

Nota. En la tabla 192, se muestra las proporciones del diseño de mezcla por el método ACI sin adicionar lodo.

DM con 5% de lodo

Tabla 193

Diseño de pavimento rígido con 5% de lodo

INSUMO	PESO EN KG/M3	VOLUMEN EN M3/M3	PROPORCIONES
Agua	212.580	0.190	17.232
Cemento	524.283	0.166	1.000
Lodo	26.214	0.012	0.050
Aire		0.015	
Piedra	945.780	0.389	1.804
Arena	601.129	0.228	1.147
BALANCE TOTAL	2309.986	1.000	

Nota. En la tabla 193, se muestra las proporciones del diseño de mezcla por el método ACI adicionando un 5% de lodo. El agregado fino fue parcialmente sustituido incorporando un 5% de

lodo en el diseño de mezcla, con el fin de analizar su influencia sobre las propiedades físicas y mecánicas del material.

DM con 10% de lodo

Tabla 194

Diseño de pavimento rígido con 10% de lodo

INSUMO	PESO EN KG/M3	VOLUMEN EN M3/M3	PROPORCIONES
Agua	212.654	0.190	17.238
Cemento	524.283	0.166	1.000
Lodo	52.428	0.023	0.100
Aire		0.015	
Piedra	945.780	0.389	1.804
Arena	570.371	0.216	1.088
BALANCE TOTAL	2305.516	1.000	

Nota. En la tabla 194, se muestra las proporciones del diseño de mezcla por el método ACI adicionando un 10% de lodo. El agregado fino fue parcialmente sustituido incorporando un 10% de lodo en el diseño de mezcla, con el fin de analizar su influencia sobre las propiedades físicas y mecánicas del material.

DM con 15% de lodo

Tabla 195

Diseño de pavimento rígido con 15% de lodo

INSUMO	PESO EN KG/M3	VOLUMEN EN M3/M3	PROPORCIONES
Agua	212.728	0.190	17.244
Cemento	524.283	0.166	1.000
Lodo	78.642	0.035	0.150
Aire		0.015	
Piedra	945.780	0.389	1.804
Arena	539.613	0.204	1.029
BALANCE TOTAL	2301.046	1.000	

Nota. En la tabla 195, se muestra las proporciones del diseño de mezcla por el método ACI adicionando un 15% de lodo. El agregado fino fue parcialmente sustituido incorporando un 15% de lodo en el diseño de mezcla, con el fin de analizar su influencia sobre las propiedades físicas y mecánicas del material.

Resumen de resistencia a la compresión (f'c)

Tabla 196

Resumen de resistencias de 1er vaciado de pavimento rígido

1er vaciado												
ESPECIMEN	7 días				14 días				28 días			
	1	2	3	PROM.	1	2	3	PROM.	1	2	3	PROM.
5% de lodo	110	146	145	133.7	398	374	345	372.3	345	402	382	376.3
10% de lodo	227	215	231	224.3	232	344	329	301.7	370	361	334	355.0
15% de lodo	115	109	98	107.3	149	194	191	178.0	221	237	272	243.3

Nota. En la tabla 196, se muestra el cuadro resumen de las resistencias a la compresión (f'c) de los ensayos a las probetas realizadas en el primer vaciado.

Tabla 197*Resumen de resistencias de 2do vaciado de pavimento rígido*

2do vaciado												
ESPECIMEN	7 días				21 días				28 días			
	1	2	3	PROM.	1	2	3	PROM.	1	2	3	PROM.
sin lodo	110	146	145	133.7	398	374	345	372.3	345	402	382	376.3
5% de lodo	117	197	162	158.7	349	308	368	341.7	406	401	414	407.0
10% de lodo	227	215	236	226.0	351	344	329	341.3	370	361	334	355.0

Nota. En la tabla 197, se muestra el cuadro resumen de las resistencias a la compresión ($f'c$) de los ensayos a las probetas realizadas en el segundo vaciado.



CAPÍTULO VI

DISCUSIÓN

De las propiedades físicas y químicas de los lodos residuales provenientes del tratamiento de agua potable.

Tabla 198

Caracterización física de LPTAP

Clasificación Visual Manual	
Nota:	
Nivel Freático:	NO
Tamizado Compuesto:	SÍ
Tamiz separador:	#4
Método de Tamizado:	Manual
Resultado de Ensayos	
Humedad Natural:	1,4
Límite Líquido:	2
Límite Plástico:	2
Índice de Plasticidad	0
Grava ($N^{\circ}4 < \phi < 3''$):	0.00%
Arena ($N^{\circ}200 < \phi < N^{\circ}4$):	85.73%
Filler ($\phi < N^{\circ}200$):	14.27%
Clasificación	
AASHTO:	A-2-4(0)
SUCS:	SC
NOMBRE DEL GRUPO:	A2

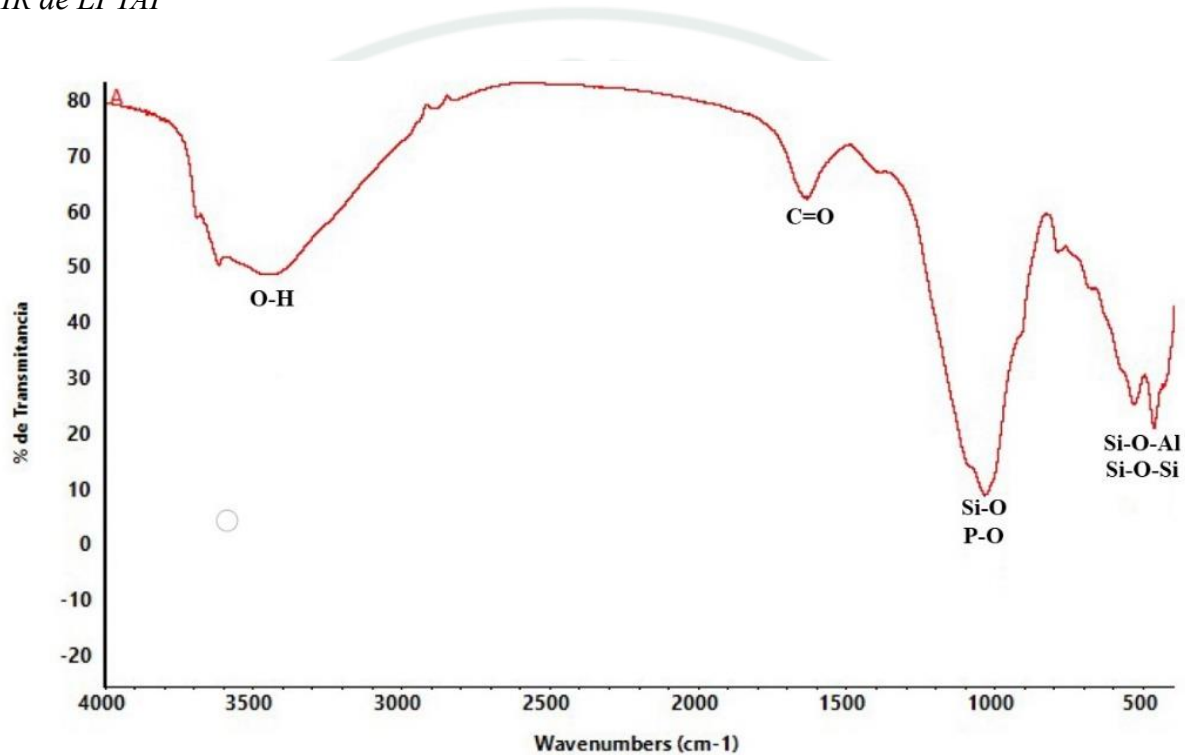
Nota. La tabla 198, muestra la caracterización física del LPTAP de la PTAP Miguel de la Cuba Ibarra.

Se ha clasificado el lodo residual proveniente del tratamiento de agua potable, siendo un tipo A-2-4(0) según la clasificación AASHTO y un SC según la clasificación SUCS, en ambos casos es un suelo con contenido de arena y contenido de limo o arcilla, el índice de plasticidad es de 0, esto

indica que el lodo o sedimento puede ser un material de buena calidad para subrasante, siempre y cuando se tenga un CBR mayor a 6.

Figura 64

FTIR de LPTAP



Nota. La figura 64, muestra el Espectro FTIR del LPTAP de agua potable Miguel de la Cuba Ibarra.

Del ensayo de FTIR se observa que la banda entre 3600-3200 cm^{-1} tiene el grupo hidroxilo (O-H) el cual representa contenido de agua absorbida en minerales arcillosos como caolinita, illita o montmorillonita. La banda entre 1700-1650 cm^{-1} tiene la banda de carbonilo (C=O), el cual representa presencia orgánica en la muestra. La banda entre 110-900 cm^{-1} , representa los grupos de Si-O y P-O, el material tiene una estructura silicatada, lo que puede significar arcilla o materiales volcánicos. La banda 800-500 cm^{-1} , representa los grupos de Si-O-AL y Si-O-Si, se tiene presencia de aluminosilicatos típico de suelos volcánicos, arcillas, cenizas o materiales puzolánicos. El material puede provenir de restos de fosfato o minerales accesorios.

Del desempeño mecánico de mezcla del suelo con LPTAP, incorporando proporciones de 20%, 40% y 60%, para la aplicación en subrasantes en la ciudad de Arequipa

Para el desempeño de la mezcla del suelo con el lodo residual se realizó mezclas parciales, comprobando de primera mano que solo el suelo se desempeñe de manera correcta como pide la normativa, para que un suelo sea aceptado como subrasante es necesario que cumpla un CBR mayor a 6 como indica en la tabla 243.

Tabla 199

Categorías de subrasante según su porcentaje de CBR

Tipo de subrasante	CBR
excelente	CBR mayor igual a 30%

Nota. La tabla 199, muestra los resultados de CBR de solo el suelo, el cual muestra que si es un suelo aceptado.

Tabla 200

Resultados de CBR de suelo natural

N°	MUESTRA	CBR CORREGIDO A 0.1" (2.54mm) DE PENETRACIÓN		CBR CORREGIDO A 0.2" (5.08mm) DE PENETRACIÓN	
		Al 100% P.U. seco máximo del espécimen de ensayo	Al 95% P.U. seco máximo del espécimen de ensayo	Al 100%P.U. seco máximo del espécimen de ensayo	Al 95%P.U. seco máximo del espécimen de ensayo
1	C2-E2	93	47	120	57
2	C4-E2	116	63	133	73
3	C6-E2	90	59	141	91

Por otro lado, y como resultado principal mostramos en la tabla 200, los resultados de CBR de la mezcla parcial del suelo con lodos residuales del tratamiento de agua, en las siguientes proporciones: C2-E2 con 20% de lodo residual, C4-E2 con 60% de lodo residual y C6-E2 con 40% de lodo residual, los cuales también cumplieron con el desempeño de CBR requerido bajo la normativa sin embargo se refleja que el suelo C4-E2 con 60% de lodo residual y el suelo C6-E2 con 40% de lodo, son lodos con mejor resultado de CBR con 0.1" y 0.2" de penetración respectivamente.

Tabla 201

Resultados de CBR de suelo con mezcla parcial de lodo

N°	MUESTRA	CBR CORREGIDO A 0.1" (2.54mm) DE PENETRACIÓN		CBR CORREGIDO A 0.2" (5.08mm) DE PENETRACIÓN	
		Al 100%Peso unitario seco máximo del espécimen de ensayo	Al 95%Peso unitario seco máximo del espécimen de ensayo	Al 100%Peso unitario seco máximo del espécimen de ensayo	Al 95%Peso unitario seco máximo del espécimen de ensayo
1	C2-E2 (20%)	95	47	121	82
2	C4-E2 (60%)	120	69	136	79
3	C6-E2 (40%)	110	80	154	111

Adicionalmente también se realiza el análisis económico para el suelo natural y un suelo con un adicionado parcial de lodo.

Tabla 202

Análisis de precio unitario de suelo natural

01.01 MEJORAMIENTO DE SUB RASANTE CON MATERIAL DE PRESTAMO E=0.20 M							
Rend:	m2/DIA	MO:	1,200.00	EQ:	1,200.00		
<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>	
Mano de Obra							
01010101	OPERARIO	HH	1.00	0.0067	28.39	0.19	
01010102	OFICIAL	HH	1.00	0.0067	22.33	0.15	
01010103	PEON	HH	2.000	0.0133	20.22	0.54	
						0.88	
Materiales							
01010201	HORMIGÓN	M3		0.25	70.00	17.50	
						17.50	
Subcontrato							
01010301	ENSAYO DE CBR	und		0.0013	850.00	1.11	
						1.11	
Equipo							
01010401	RODILLO USO VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 7-9 Ton	HM	1.00	0.0067	240.00	1.61	
01010402	MOTONIVELADORA - 125-185 HP	HM	1.00	0.0067	310.00	2.08	
01010403	CAMION CISTERNA 4X2 (AGUA) 2,000 GAL	HM	1.00	0.0067	350.00	2.35	
01010404	HERRAMIENTAS COMPLEMENTARIOAS (%MO)	%mo		4.0000	1.16	4.64	
						10.67	
						30.15	
Costo Unitario por M3K:							

Nota. La tabla 202, muestra el análisis de precio unitario del suelo natural teniendo como resultado que su valor por metro cubico es de 30.15 soles.

Tabla 203*Análisis de precio unitario de suelo con mezcla parcial de lodo*

MEJORAMIENTO DE SUB RASANTE POR SUSTITUCIÓN CON MATERIAL DE PRESTAMO LPTAP = 0.20 M AL 40%							
Rend:	m2/DIA	MO:	1,200.00	EQ:	1,200.00		
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
Mano de Obra							
01010101	OPERARIO	HH	1.00	0.0067	28.39	0.19	
01010102	OFICIAL	HH	1.00	0.0067	22.33	0.15	
01010103	PEON	HH	2.000	0.0133	20.22	0.54	
						0.88	
Materiales							
01020201	LODO RESIDUAL	M3		0.10		-	
Subcontrato							
01010301	ENSAYO DE CBR	und		0.0013	850.00	1.11	
						1.11	
Equipo							
01010401	RODILLO USO VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 7-9 Ton	HM	1.00	0.0067	240.00	1.61	
01010402	MOTONIVELADORA - 125-185 HP	HM	1.00	0.0067	310.00	2.08	
01010403	CAMION CISTERNA 4X2 (AGUA) 2,000 GAL	HM	1.00	0.0067	350.00	2.35	
01010404	HERRAMIENTAS COMPLEMENTARIOAS (%MO)	%mo		4.0000	1.16	4.64	
						10.67	
Costo Unitario por M3K:						12.65	

Nota. La tabla 203, muestra el análisis de precio unitario del suelo con mezcla parcial de lodo teniendo como resultado que su valor por metro cubico es de 12.65 soles.

Desde la perspectiva económica se puede ver que el precio de suelo con lodo es mas recomendable en cuanto al valor por metro cubico ya que esta muy por debajo del costo de suelo natural, de igual modo el resultado de CBR es mejor.

Del desempeño mecánico de LPTAP incorporados en distintas proporciones en el DM de concreto – pavimento rígido

Para el DM de concreto por el método ACI, se realiza los ensayos necesarios a los agregados y se obtiene el cemento y datos necesarios del tipo de cemento elegido, al igual que el SLUMP y se define la resistencia a la cual se debe de llegar según la normativa para un pavimento urbano.

Tabla 204

Parámetros básicos para el DM de pavimento rígido

F'c =	350	kg/cm²
TMN =	3 / 4	"
SLUMP =	2	"

INSUMO	P.E. SECO	P. UNITARIO COMPACTADO	P. UNITARIO SUELTO	MODULO DE FINEZA	% DE ABSORCION	% HUMEDAD
Cemento T-I	3150	1400				
Agua	1000					
Arena	2640	1672	1465	2.4	2.1	2.34
Piedra	2430	1433	1356	7	2.8	0.26
Lodo	2250		Dosis (0.5% peso del cemento)			

Nota. En la tabla 204, se muestra las proporciones realizadas para el DM por el método ACI sin lodo, teniendo en cuenta que se comprueba que con estas proporciones si se logra la resistencia requerida bajo la normativa.

Tabla 205

Diseño de pavimento rígido sin lodo

INSUMO	PESO EN KG/M3	VOLUMEN EN M3/M3	PROPORCIONES
Agua	212.506	0.190	17.226
Cemento	524.283	0.166	1.000
Lodo	0.000	0.000	0.000
Aire		0.015	
Piedra	945.780	0.389	1.804
Arena	631.887	0.239	1.205
BALANCE TOTAL	2314.456	1.000	

Nota. En la tabla 205, se muestra las proporciones de los diseños de mezcla por el método ACI, adicionando lodos residuales al 5%, 10% y 15% en cada diseño de mezcla, El agregado fino fue parcialmente sustituido incorporando un 5%, 10% y 15% de lodo en el diseño de mezcla, con el fin de analizar su influencia sobre las propiedades mecánicas del material. por lo tanto, en laboratorio se comprueba que los diseños de mezcla al 5% y 10% de lodo si cumplen la resistencia requerida por la normativa, sin embargo, en el diseño de mezcla con 15% de lodo no llega a la resistencia requerida bajo la normativa, es por eso que se realizan dos vaciados en el cual nos indica que el diseño de mezcla con 15% de lodo no cumple con la resistencia requerida y que el más optimo es el diseño de mezcla con 5% de lodo teniendo los mejores resultados.

Tabla 206

Resumen de proporciones de diseños de mezcla para pavimento rígido

RESUMEN DE PROPORCIONES DE DISEÑOS DE MEZCLA				
	sin LPTAP	5% de LPTAP	10% de LPTAP	15% de LPTAP
AGUA	17.23	17.23	17.24	17.24
CEMENTO	1.00	1.00	1.00	1.00
LPTAP	0.00	0.05	0.10	0.15
AIRE	0.00	0.00	0.00	0.00
PIEDRA	1.80	1.80	1.80	1.80
ARENA	1.21	1.15	1.09	1.03

Nota. En la tabla 206, se realiza una comparación de los resultados de las resistencias a la compresión de los diseños de mezcla, podemos observar en la tabla # en la cual se muestra los mejores resultados del segundo vaciado, visualizándose que el mejor resultado está en el diseño de mezcla con una adición del 5% de lodo en el diseño de mezcla.

Tabla 207

Resultados de resistencia a la compresión para pavimento rígido

ESPECIMEN	28 días			PROM.
	1	2	3	
sin lodo	345	402	382	376.3
5% de lodo	406	401	414	407.0
10% de lodo	370	361	334	355.0

Adicionalmente realizamos una comparación económica del DM sin lodo y con una adición de 5% de lodo, que es el más recomendable.

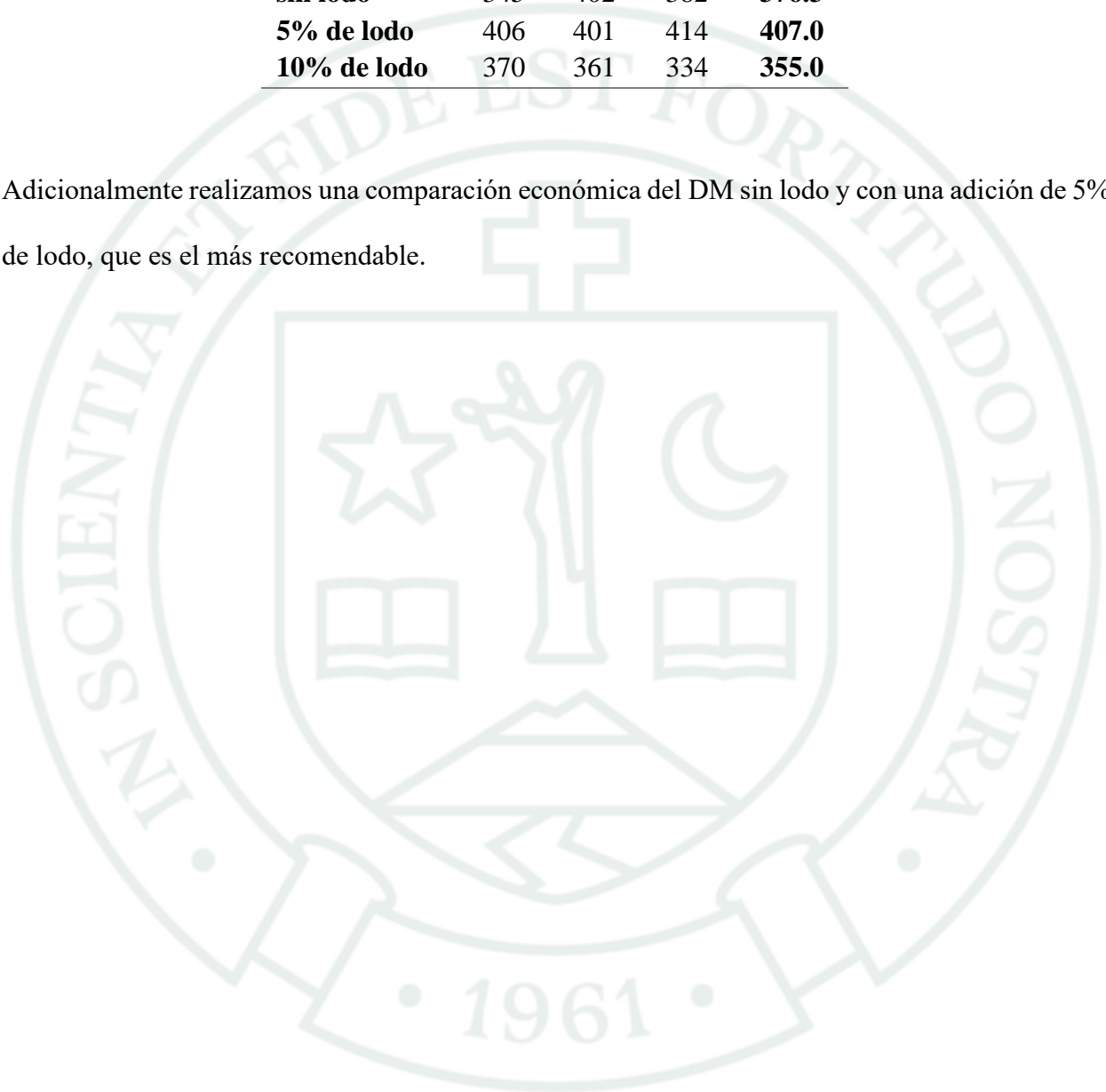


Tabla 208

Análisis de precio unitario diseño de mezcla ACI para pavimento rígido

01.0 DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO F'C = 350 KG/CM2						
Rend:	m3/DIA	MO:	360.00	EQ:	360.00	
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
	Mano de Obra					
01020101	OPERARIO	HH	1.00	0.6670	28.39	18.94
01020102	OFICIAL	HH	1.00	0.6670	22.33	14.89
01020103	PEON	HH	2.000	0.0134	20.22	0.27
						34.10
	Materiales					
01020201	PIEDRA CHANCADA 1/2"	M3		0.39	75.00	29.18
	ARENA GRUESA	M3		0.24	72.00	17.28
	CEMENTO TIPO I(42.5 kg)	Bls		12.00	26.00	312.00
	ADITIVO	Gln		0.75	49.50	37.13
	AGUA	M3		0.19	0.15	0.03
						395.61
	Equipo					
01020401	MIXER PARA CONCRETO	HM	1.00	0.6670	375.00	250.13
01020404	HERRAMIENTAS COMPLEMENTARIAS (%MO)	%mo		3.0000	1.10	3.30
						253.43
						683.13
						Costo Unitario por M3K:

Nota. En la tabla 208, se muestra el análisis de precio unitario del DM ACI para pavimento rígido sin adicionar lodo, teniendo 683.13 soles por metro cúbico.

Tabla 209*Análisis de precio unitario diseño de mezcla ACI con 5% de lodo para pavimento rígido*

01.03 DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO F'C = 350 KG/CM2 CON 5% DE LPTAP							
Rend:	m3/DIA	MO:	360.00	EQ:	360.00		
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
Mano de Obra							
01030101	OPERARIO	HH	1.00	0.6670	28.39	18.94	
01030102	OFICIAL	HH	1.00	0.6670	22.33	14.89	
01030103	PEON	HH	2.000	0.0134	20.22	0.27	
						34.10	
Materiales							
01030201	PIEDRA CHANCADA 1/2"	M3		0.39	75.00	29.18	
01030202	ARENA GRUESA	M3		0.23	72.00	16.42	
01030203	CEMENTO TIPO I (42.5 kg)	Bls		12.00	26.00	312.00	
01030204	ADITIVO	Gln		0.75	49.50	37.13	
01030205	LODO RESIDUAL	M3		0.02	-	-	
01030206	AGUA	M3		0.19	0.15	0.03	
						394.74	
Equipo							
01030401	MIXER PARA CONCRETO	HM	1.00	0.6670	375.00	250.13	
01030404	HERRAMIENTAS COMPLEMENTARIAS (%MO)	%mo		3.0000	1.10	3.30	
						253.43	
Costo Unitario por M3K:						682.27	

Nota. En la tabla 209, se muestra el análisis de precio unitario del DM ACI para pavimento rígido con una adición de 5% de lodo, teniendo 682.27 soles por metro cúbico.

Desde la perspectiva económica, el diseño de mezcla ACI con una adición de lodo del 5% es una mejor opción. La diferencia de costos es mínima (de 0.86 soles), pero en grandes cantidades de producción puede ser conveniente ya que, al tener mejor desempeño mecánico, puede presuponer que tendrá menor costo de mantenimiento.

Del desempeño mecánico de los LPTAP incorporados en distintas proporciones en el diseño de mezclas asfáltica en caliente – pavimento flexible

Para el proceso de mezcla utilizando el método Marshall, los áridos fueron ajustados al tamaño de partícula requerido para un MAC 2, conforme a las normativas del MTC. Se examinaron muestras con cuatro proporciones de asfalto: 4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0% del peso total.

Estos niveles se eligieron por ser los más comunes en el diseño de mezclas o en plantas de pavimentación en Perú. Se llevaron a cabo dos formulaciones de mezcla, siendo la primera una mezcla típica de agregado grueso, arena y betún. La segunda mezcla consistió en agregado grueso, arena, filler (se añadió lodo residual del tratamiento de agua potable como filler en una proporción del 5% del total) y betún. En total, se fabricaron treinta y dos muestras, cuatro para cada porcentaje de asfalto. Cada muestra consistió en 1200 g y se compactó mediante 50 golpes en ambos lados. Según las especificaciones del betún, la mezcla se realizó a una temperatura de 150 ± 3 °C y la compactación se realizó a 140 ± 3 °C, respectivamente.

Para establecer el contenido óptimo de betún, se llevaron a cabo pruebas de estabilidad-flujo, rice, Bulk y la relación polvo-asfalto según los requisitos de las normas del MTC.

Tabla 210

Resumen de Diseño de Mezcla Marshall SIN FILLER

DMAC por el Método Marshal SIN FILLER				
Descripción	Porcentaje de bitumen (%)			
	4.5	5	5.5	6
Estabilidad (kg)	1475.2	2116.5	1713.7	1478.5
Flujo 0.01''	7	8	9	9
Estabilidad – Flujo (kg/cm)	2020.82	2713.46	2016.12	1661.24
Rice (kg/m³)	2413.5	2506.3	2370.4	2215.6

Bulk (kg/m³)	2019.75	2023.27	2021.80	2023.45
Relación polvo - asfalto	1.45	1.26	1.02	0.92
Contenido óptimo de bitumen				5%

Nota. En la tabla 210, se muestran los resultados obtenidos del DMAC por el método Marshal sin adicionar FILLER, teniendo como contenido óptimo de asfalto de 5%, siendo los resultados de estabilidad (kg) 2116.5, flujo (0.01") 8, estabilidad – flujo (kg/cm) 2713.46, rice (kg/m³) 2506.3, bulk (kg/m³) 2023.27 y relación polvo – asfalto de 1.26. Cumpliendo los parámetros establecidos en las especificaciones técnicas del MTC, los cuales se mencionan en la tabla 254.

Tabla 211

Comparación con EE.TT. del MTC

DMAC por el Método Marshal SIN FILLER		
Descripción	Porcentaje de bitumen (%)	EE.TT. Del MTC
	5	
Estabilidad (kg)	2116.5	mínimo 554.73 kg
Flujo 0.01"	8	8-16
Estabilidad – Flujo (kg/cm)	2713.46	1.700 - 4.000
Rice (kg/m³)	2506.3	-
Bulk (kg/m³)	2023.27	-
Relación polvo - asfalto	1.26	0.6-1.3

Nota. En la tabla 211, se muestran los resultados del porcentaje óptimo de bitumen, los cuales se encuentran dentro de los requisitos para una mezcla bituminosa.

Para el DM por el método Marshall, los agregados se ajustaron al tamaño de partícula requerido para un MAC 2, según las EE.TT. del MTC. Se analizaron muestras con cuatro contenidos de asfalto: 4.5%, 5,0%, 5,5% y 6,0% sobre la masa total. Estos porcentajes se escogieron por ser los más frecuentes en el DM o plantas de pavimentación en Perú. En total, se fabricaron treinta y dos briquetas, cuatro por contenido de asfalto. Cada muestra se hizo con 1200 g y se compactó con 50 golpes en ambos lados. Según la ficha técnica del bitumen, se mezcló a una temperatura de 150

± 3 °C y se compactaron a una temperatura de 140 ± 3 °C respectivamente. Para determinar el contenido óptimo de bitumen se hicieron los ensayos de estabilidad-flujo, rice, Bulk y relación polvo-asfalto de acuerdo a los requerimientos de las especificaciones técnicas del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Tabla 212

Resumen de resultados de diseño de mezcla asfáltica CON FILLER

DMAC por el Método Marshal CON FILLER				
Descripción	Porcentaje de bitumen (%)			
	4.5	5	5.5	6
Estabilidad (kg)	1475.2	2116.5	2907.1	1923.9
Flujo 0.01"	8	8	9	10
Estabilidad – Flujo (kg/cm)	1913.36	2543.47	3311.05	2004.06
Rice (kg/m³)	2534.16	2535.81	2450.9	2541.02
Bulk (kg/m³)	2302.12	2315.70	2315.79	2314.52
Relación polvo - asfalto	1.48	1.29	0.99	0.91
Contenido óptimo de bitumen				5.5%

Nota. En la tabla 212, se muestra los resultados obtenidos del DMAC por el método Marshal adicionando FILLER (lodo residual proveniente del tratamiento de agua potable) pasante de la malla 200, teniendo como contenido óptimo de asfalto de 5.5%, siendo los resultados de estabilidad (kg) 2907.1, flujo (0.01") 9, estabilidad – flujo (kg/cm) 3311.05, rice (kg/m³) 2450.9, bulk (kg/m³) 2315.79 y relación polvo – asfalto de 0.99. Cumpliendo los parámetros establecidos en las EE.TT. del MTC, los cuales se mencionan en la tabla 257.

Tabla 213*Comparación de resultados con EE.TT. del MTC*

DMAC por el Método Marshal CON FILLER		
Descripción	Porcentaje de bitumen (%)	EE.TT. Del MTC
	5.5	
Estabilidad (kg)	2907.1	mínimo 554.73 kg
Flujo 0.01"	9	8-16
Estabilidad – Flujo (kg/cm)	3311.05	1.700 - 4.000
Rice (kg/m3)	2450.9	-
Bulk (kg/m3)	2315.79	-
Relación polvo - asfalto	0.99	0.6-1.3

Nota. En la tabla 213, se muestran los resultados del porcentaje óptimo de bitumen, los cuales se encuentran dentro de los requisitos para una mezcla bituminosa.

Haciendo la comparación técnica conviene el diseño de mezcla CON filler de porcentaje óptimo de bitumen 5.5% como se muestra en la tabla 257, esto debido a que presenta mayor estabilidad, lo que indica una mayor resistencia a roderas. Tiene mayor densidad lo que indica que tiene mejor compactación y menor permeabilidad. Por consiguiente, puede decirse que dicha mezcla es más resistente, estable y técnicamente superior para una carpeta asfáltica sometida a cargas pesadas o tránsito medio.

Tabla 214*Comparación técnica de resultados*

Criterio	SIN FILLER	CON FILLER	Recomendable
Estabilidad (kg)	2116.5	2907.1	CON filler
Flujo 0.01"	8	9	Ambos cumplen
Estabilidad – Flujo (kg/cm)	2713.46	3311.05	CON filler
Rice (kg/m3)	2506.3	2450.9	Ambos aceptables
Bulk (kg/m3)	2023.27	2315.79	CON filler

Relación polvo - asfalto	1.26	0.99	CON filler
-------------------------------------	------	------	------------

Nota. En la tabla 214, se muestra la comparación técnica de los resultados obtenidos, se puede observar que el DMAC CON filler, resulta óptimo y es el más recomendado para vías de tránsito medio.

Adicionalmente se realizó la comparación económica el cual se refleja en las siguientes tablas:

Tabla 215
Análisis de precio unitario DMAC

01.02		DMAC				
Rend:	m3/DIA	MO:	360.00	EQ:	360.00	
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
Mano de Obra						
01020101	OPERARIO	HH	1.00	0.0222	28.39	0.63
01020102	OFICIAL	HH	1.00	0.0222	22.33	0.50
01020103	PEON	HH	2.000	0.0173	20.22	0.35
						1.48
Materiales						
01020201	PIEDRA CHANCADA 1/2"	M3		0.30	75.00	9.75
	ARENA GRUESA	M3		0.65	72.00	40.32
	ASFALTO PEN 85/100	Gln		32.00	17.86	571.52
						640.82
Equipo						
01020401	CARGADOR SOBRE LLANTAS DE 125-135 HP 3 yd3	HM	1.00	0.0222	263.45	5.85
	PLANTA DE ASFALTO EN CALIENTE M.E. 50,65-115 TON/H	HM	1.00	0.0220	315.39	6.94
01020404	HERRAMIENTAS COMPLEMENTARIAS (%MO)	%mo		3.0000	4.01	12.03
						24.82
Costo Unitario por M3K:						667.11

Nota. En la tabla 215, se muestra el análisis de precio unitario del DMAC, teniendo 667.11 soles por metro cúbico.

Tabla 216*Análisis de precio unitario de diseño de mezcla CON filler*

01.02 DMAC ADICIONANDO LPTAP COMO FILLER						
Rend:	m3/DIA	MO:	360.00	EQ:	360.00	
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
Mano de Obra						
01020101	OPERARIO	HH	1.00	0.0222	28.39	0.63
01020102	OFICIAL	HH	1.00	0.0222	22.33	0.50
01020103	PEON	HH	2.000	0.0173	20.22	0.35
						1.48
Materiales						
01020201	PIEDRA CHANCADA 1/2"	M3		0.32	75.00	24.00
	ARENA GRUESA	M3		0.63	72.00	45.36
	FILLER (LODO RESIDUAL)	M3		0.10		
	ASFALTO PEN 85/100	Gln		34.00	17.86	607.24
						676.60
Equipo						
01020401	CARGADOR SOBRE LLANTAS DE 125-135 HP 3 yd3	HM	1.00	0.0222	263.45	5.85
	PLANTA DE ASFALTO EN CALIENTE M.E. 50,65-115 TON/H	HM	1.00	0.0220	315.39	6.94
01020404	HERRAMIENTAS COMPLEMENTARIAS (%MO)	%mo		3.0000	4.01	12.03
						24.82
						702.89
						Costo Unitario por M3K:

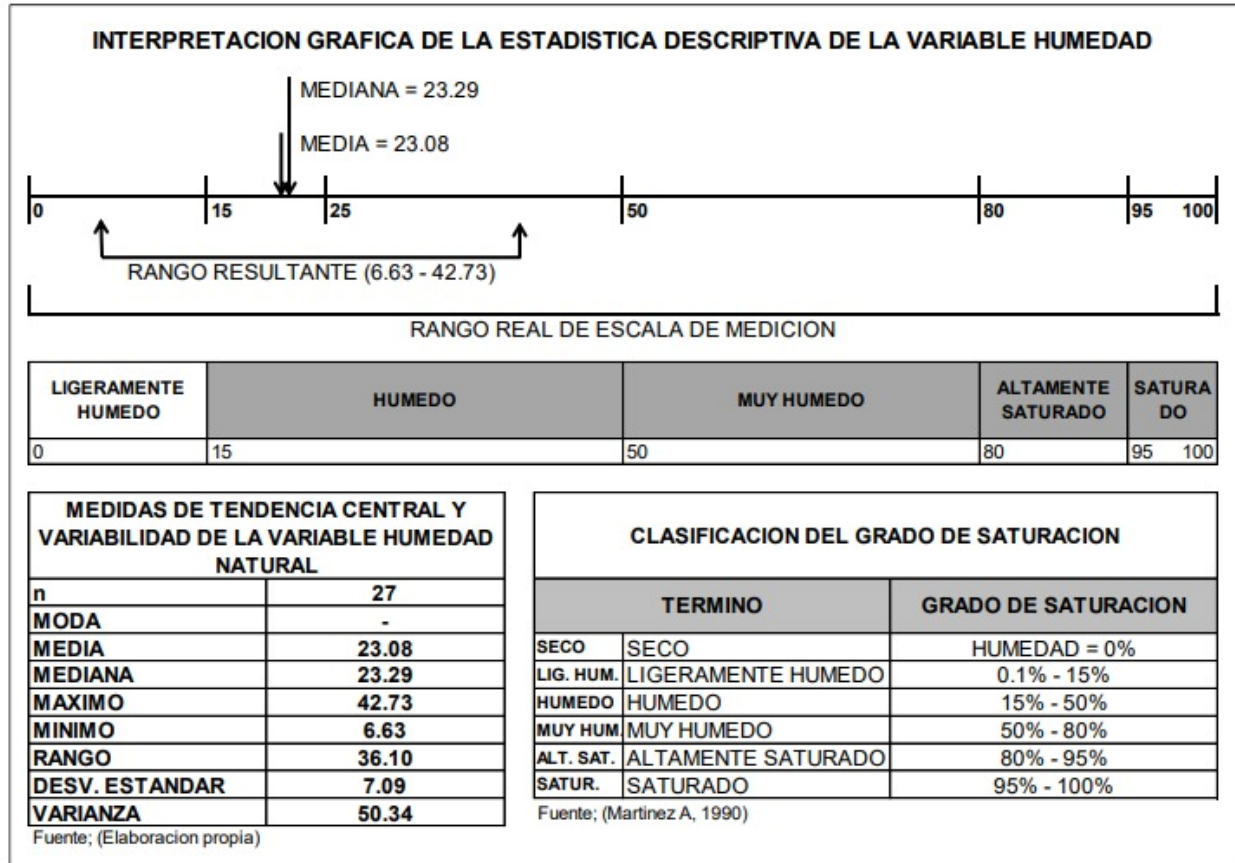
Nota. En la tabla 216, se muestra el análisis de precio unitario del diseño de mezcla asfáltica en caliente, teniendo 702.89 soles por metro cúbico.

Desde la perspectiva económica, la mezcla asfáltica con filler, pese a requerir de mayor contenido de bitumen, representa una alternativa más rentable en el ciclo de vida del pavimento. La diferencia de costos es mínima, pero en grandes cantidades de producción puede ser conveniente ya que, al tener mejor desempeño mecánico, puede presuponer que tendrá menor costo de mantenimiento.

Interpretación estadística descriptiva de las variables

Figura 65

Análisis estadístico de la variable humedad en los lodos



Nota. Los resultados obtenidos en el análisis estadístico de la variable humedad en los lodos evidencian un comportamiento homogéneo y representativo del material estudiado, ya que la media (23.08%) y la mediana (23.29%) presentan valores muy cercanos entre sí, lo cual indica la ausencia de sesgos significativos y una distribución aproximadamente simétrica, sin influencia notable de valores atípicos. Asimismo, el rango de datos (6.63% – 42.73%) muestra que, si bien existe una variabilidad mínima en el contenido de humedad —respaldada por una desviación estándar de 7.09—, la mayoría de las muestras se concentran alrededor del valor promedio, garantizando consistencia en los resultados. En términos de clasificación, estos valores se ubican

dentro del intervalo correspondiente a material “húmedo”, lo que implica que el lodo presenta un contenido de agua intermedio, suficiente para conferirle cierta cohesión, pero sin alcanzar niveles de saturación que comprometan gravemente su estabilidad o resistencia. Desde el punto de vista ingenieril, esta condición sugiere que el material posee características favorables de manejabilidad y comportamiento mecánico, no requiriendo medidas extremas de secado o estabilización, y pudiendo ser potencialmente aprovechado en aplicaciones constructivas, siempre que se consideren sus propiedades complementarias; en conjunto, estos resultados permiten concluir que el lodo presenta un estado hídrico controlado y adecuado dentro del contexto del estudio.

Medidas de tendencia central y variabilidad

Figura 66

Resultados estadísticos correspondientes a la variable tamaño de partículas

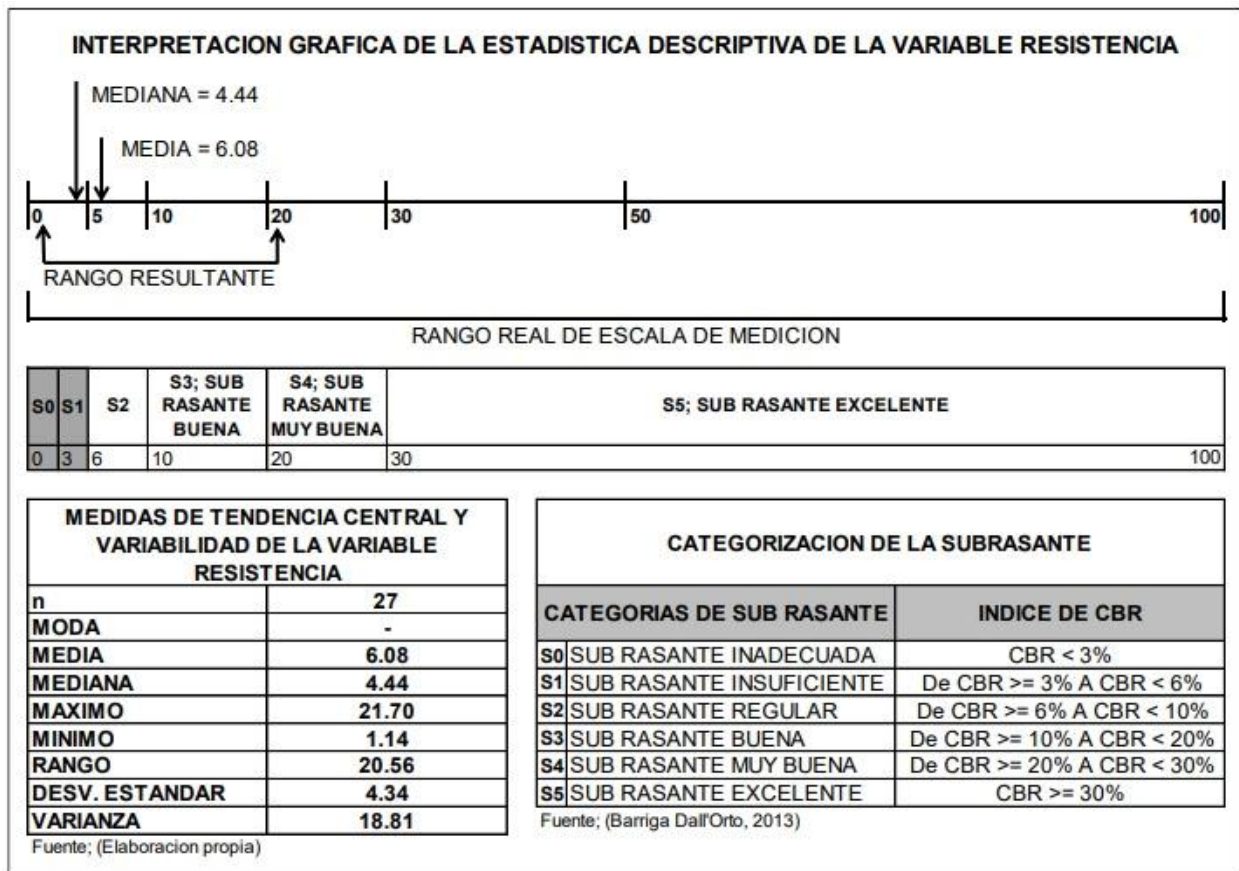
MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL Y VARIABILIDAD DE LA VARIABLE TAMAÑO			
MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL Y VARIABILIDAD	TAMAÑO DE PARTICULAS (%)		
	GRAVA	ARENA	FINO
n	27	27	27
MODA	-	-	-
MEDIA	0.45	21.52	78.03
MEDIANA	0.00	19.08	80.92
MAXIMO	6.90	56.02	97.39
MINIMO	0.00	2.61	43.46
RANGO	6.90	53.41	53.93
DESV. ESTANDAR	1.35	14.22	14.72
VARIANZA	1.82	202.15	216.65

Nota. Los resultados estadísticos correspondientes a la variable tamaño de partículas evidencian una clara predominancia de arena dentro del material analizado, ya que presenta el mayor valor promedio (85.73%), seguido por los finos (14.27%) y una participación prácticamente nula de la

grava (0.00%). Esta tendencia se confirma con la mediana, donde la arena alcanza 80.92%, reforzando la idea de que más de la mitad de las muestras están altamente compuestas por estas partículas. La ausencia de moda en las tres fracciones indica que no existe un valor que se repita con frecuencia, lo cual es común en datos continuos de este tipo. En cuanto a la variabilidad, la grava muestra una dispersión mínima (desviación estándar de 1.35), lo que confirma su baja presencia y poca influencia en el comportamiento global del material; en contraste, tanto la arena como los finos presentan desviaciones estándar mayores (14.22 y 14.72 respectivamente), evidenciando una variabilidad moderada en su distribución. Los rangos obtenidos (6.90 para grava, 53.41 para arena y 53.93 para finos) indican que, aunque la composición está dominada por arenas, existen diferencias considerables entre muestras, especialmente en la proporción de arena y finos. Desde el punto de vista ingenieril, estos resultados permiten clasificar el material como predominantemente arena, lo cual sugiere un comportamiento típico de suelos destinados a subrasante, con menor capacidad de retención de agua y mayor permeabilidad, aspectos que influyen directamente en su resistencia, compresibilidad y desempeño en aplicaciones geotécnicas, siendo fundamental considerar estas características en el diseño y evaluación de su uso en obras civiles.

Figura 67

Interpretación gráfica de la estadística descriptiva de la variable resistencia (CBR)



Nota. En la figura 67 se presenta la interpretación gráfica de la estadística descriptiva de la variable resistencia (CBR), donde se observa que la media es 6.08% y la mediana es 4.44%, con un rango de valores que va desde 1.14% hasta 21.70%. Estos resultados evidencian una variabilidad moderada en el comportamiento del suelo, con una desviación estándar de 4.34. De acuerdo con la categorización del índice CBR, se identifican distintos niveles de calidad de subrasante; sin embargo, los valores más representativos del estudio muestran una tendencia hacia categorías superiores. En particular, considerando los resultados más altos obtenidos y el comportamiento general del material, se determina que la subrasante puede clasificarse como S5: subrasante excelente (CBR \geq 30%) en condiciones óptimas de diseño.

Este comportamiento favorable está asociado a la mayor proporción de arena en la dosificación, lo cual contribuye a mejorar la resistencia y la capacidad portante del suelo, debido a una mejor distribución granulométrica y menor plasticidad. En consecuencia, el material analizado presenta características adecuadas para su uso en estructuras de pavimento, garantizando un buen desempeño estructural.



CONCLUSIONES

Se realizó la caracterización de las propiedades físicas y químicas de los lodos residuales provenientes del tratamiento de agua potable, clasificándose como un tipo A-2-4(0) según la clasificación AASHTO y un SC según la clasificación SUCS, en ambos casos es un suelo con contenido de arena y contenido de limo o arcilla, el índice de plasticidad es de 0, esto indica que el lodo o sedimento puede ser un material de buena calidad para subrasante, además, del ensayo de FTIR se observa que la banda entre $3600-3200\text{ cm}^{-1}$ tiene el grupo hidroxilo (O-H) el cual representa contenido de agua absorbida en minerales arcillosos como caolinita, illita o montmorillonita. La banda entre $1700-1650\text{ cm}^{-1}$ tiene la banda de carbonilo (C=O), el cual representa presencia orgánica en la muestra. La banda entre $110-900\text{ cm}^{-1}$, representa los grupos de Si-O y P-O, el material tiene una estructura silicatada, lo que puede significar arcilla o materiales volcánicos. La banda $800-500\text{ cm}^{-1}$, representa los grupos de Si-O-AL y Si-O-Si, se tiene presencia de aluminosilicatos típico de suelos volcánicos, arcillas, cenizas o materiales puzolánicos. El material puede provenir de restos de fosfato o minerales accesorios que pueden mezclarse con suelos naturales para subrasante, siempre y cuando se tengan resultados de CBR mayores a 6.

Al evaluar los resultados del ensayo CBR para subrasante, de la mezcla de suelo con lodos residuales, podemos ver que el resultado es aceptado bajo la normativa por encima de lo requerido, los CBR de los suelos mezclados parcialmente con lodo presentan mejores resultados y mayor CBR que de los suelos naturales presentados en diferentes proporciones, si bien bajo la normativa se pide que los suelos deben de tener un CBR mayor a 6, en este caso los suelos con mezcla parcial de lodo presentan un CBR de 121 en C2-E2 con 20% de lodo, 136 en C4-E2 con 60% de lodo y 154 en C6-2 con 40% de lodo, por lo cual se puede concluir que si se puede utilizar lodos para

subrasante sabiendo también que en la mezcla con 40% es el mejor resulta de CBR, cumpliendo con lo solicitado por la Norma Técnica Peruana.

Se analizó el desempeño mecánico de los LPTAP en el DM por el método ACI para pavimento rígido. Se analizaron cuatro diseños de mezcla, la primera sin adicionar lodo, una segunda sustituyendo el agregado fino por un 5% de lodo, una tercera sustituyendo el agregado fino por un 10% de lodo y por último un cuarto diseño sustituyendo el agregado fino por un 15% de lodo. Realizándose dos vaciados, el primer vaciado se realiza para los 3 diseños de mezcla que incluyen lodo residual proveniente de la plata de tratamiento de agua potable, donde se puede tener como primer resultado que el diseño de mezcla con 15% de lodo no llega a la resistencia a la compresión requerida y teniendo que los diseños de mezcla con 5 % y 10% de lodo cumple con la resistencia requerida, en el segundo vaciado se realiza para 3 diseños uno sin adicionar lodo y dos diseños con 5% y 10% de lodo, en el cual se puede tener como resultado que el diseño de mezcla sin lodo y con 10% de lodo cumplen con la resistencia requerida, pero el diseño de mezcla con 5% de lodo supera y tiene la mejor resistencia a la compresión, por lo cual se concluye que el diseño de mezcla con 5% de lodo residual proveniente de tratamiento de agua potable es el mejor resultado. Cumpliendo los parámetros establecidos en las EE.TT. del MTC.

Se analizó el desempeño mecánico de los LPTAP en mezclas asfálticas en caliente para pavimento flexible, Se analizaron muestras con cuatro contenidos de asfalto: 4.5%, 5,0%, 5,5% y 6,0% sobre la masa total. Estos porcentajes se escogieron por ser los más frecuentes en el diseño de mezclas o plantas de pavimentación en Perú. Se realizó dos DM, siendo el primero una mezcla convencional de agregado grueso, agregado fino y bitumen. El segundo una mezcla de agregado grueso, agregado fino, filler (se adicionó el lodo residual proveniente del tratamiento de agua potable como filler en un 5% de la masa total) y bitumen. Los resultados obtenidos del diseño de

mezcla asfáltica en caliente por el método Marshal SIN adicionar FILLER, se tiene como contenido óptimo de asfalto de 5%, estabilidad (kg) 2116.5, flujo (0.01”) 8, estabilidad – flujo (kg/cm) 2713.46, rice (kg/m³) 2506.3, bulk (kg/m³) 2023.27 y relación polvo – asfalto de 1.26. Los resultados obtenidos del DMAC por el método Marshal adicionando FILLER (lodo residual proveniente del tratamiento de agua potable) pasante de la malla 200, se tiene como contenido óptimo de asfalto de 5.5%, estabilidad (kg) 2907.1, flujo (0.01”) 9, estabilidad – flujo (kg/cm) 3311.05, rice (kg/m³) 2450.9, bulk (kg/m³) 2315.79 y relación polvo – asfalto de 0.99. Cumpliendo los parámetros establecidos en las EE.TT. del MTC.

Al realizarse el análisis de viabilidad de la mezcla del suelo con LPTAP, incorporando proporciones de 20%, 40% y 60%, para la aplicación en subrasantes, se tiene que en la compracion técnica conviene la incorporación de LPTAP ya que como se ve en los resultados tiene un mejor resultado de CBR, lo que indica una mayor resistencia a la penetración. Tiene mayor densidad lo que indica que tiene mejor compactación y menor permeabilidad. Por consiguiente, puede decirse que dicha mezcla es más resistente, estable y técnicamente superior para el uso de subrasantes. Asimismo, desde la perspectiva económica, el suelo con una mezcla de lodo residual proveniente del tratamiento de agua es más económico que un suelo natural.

Al realizarse el análisis de viabilidad del DM por el método ACI para el diseño de pavimento rígido, se tiene que el diseño de mezcla con 5% de lodo residual como reemplazo de agregado fino es el que tiene mejor resistencia a la compresión. Por lo que se puede decir que este diseño de mezcla es el más resistente, estable y técnicamente superior para una carpeta asfáltica sometida a cargas pesadas o tránsito medio. Asimismo, desde la perspectiva económica se puede ver que el diseño de mezcla con 5 % de lodo es más rentable, si bien en la diferencia por un metro cubico es

mínima, en un proyecto de mayor capacidad se puede ver una gran diferencia la cual la hace más rentable.

Al realizarse el análisis de viabilidad del DMAC por el método Marshall, se tiene que en la comparación técnica conviene el diseño de mezcla CON filler de porcentaje óptimo de bitumen 5.5%, esto debido a que presenta mayor estabilidad, lo que indica una mayor resistencia a roderas. Tiene mayor densidad lo que indica que tiene mejor compactación y menor permeabilidad. Por consiguiente, puede decirse que dicha mezcla es más resistente, estable y técnicamente superior para una carpeta asfáltica sometida a cargas pesadas o tránsito medio. Asimismo, desde la perspectiva económica, la mezcla asfáltica con filler, pese a requerir de mayor contenido de bitumen, representa una alternativa más rentable en el ciclo de vida del pavimento. La diferencia de costos es mínima, pero en grandes cantidades de producción puede ser conveniente ya que, al tener mejor desempeño mecánico, puede presuponer que tendrá menor costo de mantenimiento.

RECOMENDACIONES

Se recomienda estudiar los efectos a largo plazo del uso de LPTAP en subrasante, pavimento rígido y pavimento flexible. Todo material nuevo debe evaluarse en cuanto a su durabilidad y rendimiento a largo plazo antes de su uso definitivo en la construcción. Es importante evaluar la durabilidad y rendimiento a largo plazo de los lodos, a pesar de tener resultados positivos y prometedores, la construcción de carreteras representa una inversión a largo plazo. Los efectos a largo plazo del uso de lodos como sustituto de materiales para la construcción de vías pueden incluir agrietamiento, deformación e inestabilidad. Es posible que estos efectos no sean evidentes de inmediato, sino que se manifiestan con el tiempo.

Se recomienda hacer el estudio particular de los LPTAP, ya que su composición depende de diversos factores como la ubicación de la planta de tratamiento, el método de tratamiento de agua potable y la turbidez del agua. Se requieren futuras investigaciones para evaluar todo el ciclo de vida y los diferentes tipos de lodos según su composición.

Perú aún no ha regulado el uso de LPTAP, pero cuenta con normas técnicas para la construcción de obras viales. Esta investigación presenta un nuevo uso potencial para los lodos de PTAP, que contribuye a minimizar la contaminación actual causada por su eliminación irregular y la extracción de materiales naturales. La autorización legal y la aplicación a gran escala de esta alternativa impulsaría el logro de los objetivos de desarrollo sostenible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amakye, S. Y., & Abbey, S. J. (2021). Understanding the performance of expansive subgrade materials treated with non-traditional stabilisers: A review. In *Cleaner Engineering and Technology* (Vol. 4). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100159>
- Bensitel, N., Haboubi, K., Azar, F. Z., El Hammoudani, Y., El Abdouni, A., Haboubi, C., Dimane, F., & El Kasmi, A. (2023). Potential reuse of sludge from a potable water treatment plant in Al Hoceima city in northern Morocco. *Water Cycle*, 4, 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2023.07.002>
- G, S. K., Mahesh, R., M.S., U., Pandit, P., K.N., R., A., C., & Ramaraju, H. K. (2025). Enhancing performance of bituminous mixtures using digested sludge ash: A response surface methodology approach. *Case Studies in Construction Materials*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05113>
- Guo, K., Yu, B., Ma, Q., Liu, S., Tao, K., Zhou, B., & Jiang, N. (2024). Calcium carbide residue-based material for the stabilization of dredged sludge and its use in road subgrade construction. *Case Studies in Construction Materials*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03452>
- Jeremiah, J. J., Abbey, S. J., Booth, C. A., & Eyo, E. U. (2024). Viability of calcinated wastepaper sludge ash geopolymer in the treatment of road pavement subgrade materials. *Transportation Geotechnics*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101165>
- Kamizela, T., & Kowalczyk, M. (2023). Water purification sludge as a substrate in metal bioleaching. *Desalination and Water Treatment*, 301, 125–134. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29557>

- Bensitel, N., Haboubi, K., Azar, F. Z., El Hammoudani, Y., El Abdouni, A., Haboubi, C., Dimane, F., & El Kasmi, A. (2023). Potential reuse of sludge from a potable water treatment plant in Al Hoceima city in northern Morocco. *Water Cycle*, 4, 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2023.07.002>
- G, S. K., Mahesh, R., M.S., U., Pandit, P., K.N., R., A., C., & Ramaraju, H. K. (2025). Enhancing performance of bituminous mixtures using digested sludge ash: A response surface methodology approach. *Case Studies in Construction Materials*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05113>
- Guo, K., Yu, B., Ma, Q., Liu, S., Tao, K., Zhou, B., & Jiang, N. (2024). Calcium carbide residue-based material for the stabilization of dredged sludge and its use in road subgrade construction. *Case Studies in Construction Materials*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03452>
- Jeremiah, J. J., Abbey, S. J., Booth, C. A., & Eyo, E. U. (2024). Viability of calcinated wastepaper sludge ash geopolymer in the treatment of road pavement subgrade materials. *Transportation Geotechnics*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101165>
- Kamizela, T., & Kowalczyk, M. (2023). Water purification sludge as a substrate in metal bioleaching. *Desalination and Water Treatment*, 301, 125–134. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29557>
- Nguyen, M. D., Thomas, M., Surapaneni, A., Moon, E. M., & Milne, N. A. (2022). Beneficial reuse of water treatment sludge in the context of circular economy. In *Environmental Technology and Innovation* (Vol. 28). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102651>

- Salimi, M., Payan, M., Hosseinpour, I., Arabani, M., & Zanganeh Ranjbar, P. (2025). Geopolymer stabilization of construction and demolition waste using water treatment sludge and silica fume for pavement applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 37, 1834–1849. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.06.096>
- Świerczek, L., Cieřlik, B. M., & Konieczka, P. (2018). The potential of raw sewage sludge in construction industry – A review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 200, pp. 342–356). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.188>
- Taki, K., Choudhary, S., Gupta, S., & Kumar, M. (2020). Enhancement of geotechnical properties of municipal sewage sludge for sustainable utilization as engineering construction material. *Journal of Cleaner Production*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119723>
- Thushanthan, K., Mannan, M. A., Rahman, M. E., Poologanathan, K., & Rahman, M. (2026). Thermal valorisation of sewage sludge into artificial aggregates: A critical review of processes, environmental performance, and circular bioeconomy implications. In *Bioresource Technology Reports* (Vol. 34). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2026.102658>
- MC-01-13 Especificaciones Técnicas Generales para Construcción - EG-2013 - (Versión Revisada - JULIO 2013)*. (n.d.). Ministerio de Transportes y Comunicaciones
- Manual de Carreteras – Suelos geología, geotecnia y pavimentos - (R.D.Nº10 -2014-MTC)*. (2014). Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Manual de ensayo de Materiales*, Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Nguyen, M. D., Thomas, M., Surapaneni, A., Moon, E. M., & Milne, N. A. (2022a). Beneficial reuse of water treatment sludge in the context of circular economy. In *Environmental Technology and Innovation* (Vol. 28). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102651>

Nguyen, M. D., Thomas, M., Surapaneni, A., Moon, E. M., & Milne, N. A. (2022b). Beneficial reuse of water treatment sludge in the context of circular economy. In *Environmental Technology and Innovation* (Vol. 28). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102651>

