

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**“ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE CAL Y ADITIVO TERRASIL EN
ARCILLAS DE BAJA A MEDIA COMPRESIBILIDAD CONSIDERANDO
COMO PARÁMETRO DE MEDICIÓN EL ENSAYO CBR”**

Por:

WILBERT JUNNIOR OROPEZA BERRIOS

Proyecto presentado a consideración de la "UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
JUAN MISAEL SARACHO", como requisito para optar el grado académico de
Licenciatura en Ingeniería Civil

Semestre II - 2025

TARIJA – BOLIVIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**“ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE CAL Y ADITIVO TERRASIL EN
ARCILLAS DE BAJA A MEDIA COMPRESIBILIDAD CONSIDERANDO
COMO PARÁMETRO DE MEDICIÓN EL ENSAYO CBR”**

Por:

WILBERT JUNNIOR OROPEZA BERRIOS

Proyecto presentado a consideración de la "UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
JUAN MISAEL SARACHO", como requisito para optar el grado académico de
Licenciatura en Ingeniería Civil

Semestre II - 2025

TARIJA – BOLIVIA

DEDICATORIA:

"A Dios, mi guía y mi
protección, y a mi familia,
mi apoyo y mi razón.

A aquellos cuyas enseñanzas
han sido un faro, gracias por
moldear mi ser."

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

	Página
1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes.....	2
1.3 Justificación	3
1.4 Situación problemática.....	4
1.4.1 Problema.....	5
1.4.2 Relevancia y factibilidad del problema.....	5
1.4.3 Delimitación temporal y espacial de la investigación	5
1.5 Objetivos.....	7
1.5.1 Objetivo general.....	7
1.5.2 Objetivos específicos.....	7
1.6 Hipótesis	7
1.7 Operacionalización de las variables	8
1.8 Identificación del alcance de la investigación	10

CAPÍTULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO

	Página
2.1 Marco teórico.....	11
2.1.1 Suelo	11
2.1.2 Estabilización de suelos.....	11
2.1.3 Tipos de estabilización.....	12

2.1.3.1 Estabilización mecánica y física.....	12
2.1.3.2 Estabilización química	13
2.1.3.2.1 Proceso de estabilización con cal	14
2.1.4 Definiciones de cal.....	16
2.1.4.1 Cales vivas	17
2.1.4.2 Cales hidratados	18
2.1.4.3 Caracterización de la cal.....	18
2.1.5 Proceso de estabilización con Terrasil	20
2.1.6 Propiedades del suelo y de los aditivos para la estabilización.....	22
2.1.7 Resultados esperados de la estabilización con cal y Terrasil	23
2.1.8 Análisis estadístico.....	23
2.1.8.1 Estadística descriptiva	23
2.1.8.2 Estadística inferencial.....	24
2.1.8.3 Prueba de hipótesis	24
2.1.9 Clasificación de suelos.....	25
2.1.9.1 Clasificación de suelos AASHTO	25
2.1.9.2 Clasificación de suelos SUCS.....	27
2.1.10 Arcillas	32
2.1.10.1 Características de las arcillas	32
2.1.11 Permeabilidad.....	32
2.1.12 Compresibilidad.....	33
2.1.13 Plasticidad	34
2.1.13.1 Límite líquido (LL)	34
2.1.13.2 Límite plástico (LP).....	36

2.1.14 Compactación	36
2.1.14.1 Variables que afectan el proceso de compactación de los suelos	39
2.1.15 Ensayo de Relación de Soporte de California (CBR)	42
2.2 Marco referencial	44
2.3 Marco normativo	46
2.4 Marco referencial	47
2.5 Análisis del aporte técnico.....	49

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN

	Página
3.1 Recopilación de información	51
3.1.1 Introducción	51
3.2 Delimitación de la zona de muestreo	51
3.2.1 Coordenadas geográficas de las zonas de extracción de muestras	52
3.2.2 Mapa satelital de la zona de extracción de muestras del suelo	55
3.3 Criterios de diseño metodológico.....	55
3.3.1 Unidades de estudio y decisión muestral.....	55
3.3.1.1 Unidad de estudio	55
3.3.1.2 Población	55
3.3.1.3 Muestra.....	56
3.3.2 Selección de las técnicas de muestro	56
3.3.3 Tamaño de muestra	56
3.4 Caracterización del suelo	58
3.5 Determinación de los límites de atterberg	61

3.5.1 Límite líquido	65
3.5.2 Límite plástico	65
3.5.3 Índice de plasticidad	66
3.6 Material más fino que pasa el tamiz N° 200 en agregado mineral por lavado	
ASTM D4222 y AASHTO T88.....	68
3.7 Clasificación de suelos AASHTO M 145-91 y ASTM D 2487	70
3.7.1 Clasificación de suelos por método AASHTO M 145-91.....	70
3.7.2 Clasificación de suelos por el sistema unificado de clasificación de suelos	
(SUCS) ASTM D 2487	71
3.8 Selección de la muestra para realizar la estabilización.....	73
3.8.1 Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de los suelos y	
rocas a través de su masa ASTM D 2216-03	75
3.8.2 Compactación AASHTO T-180.....	77
3.8.3 Valor de Soporte de California (CBR).....	81
3.9 Elaboración con aditivos.....	91
3.9.1 Criterios para dosificar.....	91
3.9.2 Compactación suelo – aditivos	95
3.9.3 Valor Soporte de California (CBR) suelo – aditivos	96
3.10 Resumen de caracterización y ensayos	101

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y CONFIABILIDAD DE RESULTADOS

	Página
4.1 Base datos	105
4.1.1 Análisis estadístico descriptiva.....	105

4.1.2 Análisis intervalo de confianza al 95% (IC 95%).....	109
4.1.3 Prueba de hipótesis.....	110
4.1.4 Análisis estadística inferencial	111
4.1.4.1 Análisis distribución t-Student.....	111
4.1.5 Especificación técnica elaborada	113
4.1.6 Costo económico en estabilizaciones de suelo arcilloso	117
4.1.6.1 Comparación y análisis económico con otros productos	117
4.2 Síntesis de resultados	119

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

	Página
5.1 Conclusiones.....	121
5.2 Recomendaciones.....	122

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ANEXO I	RESULTADOS CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS
ANEXO II	RESULTADOS ENSAYOS CBR SUELO NATURAL
ANEXO III	RESULTADOS ENSAYOS CBR SUELO + 2%CAL + TERRASIL
ANEXO IV	RESULTADOS ENSAYOS CBR SUELO + 4%CAL + TERRASIL
ANEXO V	RESULTADOS ENSAYOS CBR SUELO + 6%CAL + TERRASIL
ANEXO VI	FICHA TÉCNICA DEL ADITIVO TERRASIL
ANEXO VII	ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS
ANEXO VIII	INFORME TÉCNICO DE AJUSTE Y CALIBRACIÓN

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1.1 Delimitación temporal.....	6
Tabla 1.2 Operacionalización de la variable independiente.....	8
Tabla 1.3 Operacionalización de la variable dependiente.....	9
Tabla 2.1 Característica física y química de la cal.....	19
Tabla 2.2 Análisis granulométrico de la cal.....	19
Tabla 2.3 Clasificación de suelos AASHTO.....	26
Tabla.2.4 Clasificación de suelos SUCS.....	29
Tabla 2.5 Relación de clasificación AASTHO-SUCS.....	31
Tabla 2.6 Clasificación de la compresibilidad de suelos finos.....	33
Tabla 2.7 Especificaciones para prueba de Proctor estándar.....	37
Tabla 2.8 Especificaciones para prueba de Proctor modificada (ASTM D 1557-91).....	38
Tabla 2.9 Valores referenciales de CBR, usos y suelos.....	44
Tabla 2.10 (Parte 1). Marco normativo.....	46
Tabla 2.11 (Parte 2). Marco normativo.....	47
Tabla 3.1 (Parte 1). Barrios de muestreo.....	52
Tabla 3.1 (Parte 2). Barrios de muestreo.....	53
Tabla 3.1 (Parte 3). Barrios de muestreo.....	54
Tabla 3.2 Ecuaciones para el cálculo del tamaño de la muestra.....	57
Tabla 3.3 (Parte 1). Planilla de ajuste de números de ensayos.....	57
Tabla 3.3 (Parte 2). Planilla de ajuste de números de ensayos.....	58
Tabla 3.4 (Parte 1). Tabla resumen de Límites de Atterberg.....	66
Tabla 3.4 (Parte 2). Tabla resumen de Límites de Atterberg.....	67
Tabla 3.4 (Parte 3). Tabla resumen de Límites de Atterberg.....	68

Tabla 3.5 (Parte 1). Tabla resumen del análisis granulométrico.	68
Tabla 3.5 (Parte 2). Tabla resumen del análisis granulométrico.	69
Tabla 3.5 (Parte 3). Tabla resumen del análisis granulométrico.	70
Tabla 3.6 (Parte 1). Tabla resumen de clasificación de suelos AASHTO M-145 y ASTM D2487.	71
Tabla 3.6 (Parte 2). Tabla resumen de clasificación de suelos AASHTO M-145 y ASTM D2487.	72
Tabla 3.6 (Parte 3). Tabla resumen de clasificación de suelos AASHTO M-145 y ASTM D2487.	73
Tabla 3.7 Muestras agrupadas	74
Tabla 3.8 Grado de Compresibilidad	75
Tabla 3.9 (Parte 1). Tabla resumen contenido de humedad	75
Tabla 3.9 (Parte 2). Tabla resumen contenido de humedad	76
Tabla 3.9 (Parte 3). Tabla resumen contenido de humedad	77
Tabla 3.10 Tabla resumen Compactación suelo sin aditivos	81
Tabla 3.11 Tabla resumen CBR suelo sin aditivos	91
Tabla 3.12 (Parte 1). Tabla de dosificaciones	93
Tabla 3.12 (Parte 2). Tabla de dosificaciones	94
Tabla 3.13 Tabla resumen Compactación suelo con aditivos	96
Tabla 3.14 Tabla resumen CBR suelo con aditivos	100
Tabla 3.15 (Parte 1). Resumen de la clasificación de suelos ASTM D 2487 / AASHTO M-145	101
Tabla 3.15 (Parte 2). Resumen de la clasificación de suelos ASTM D 2487 / AASHTO M-145	102
Tabla 3.16 Resumen de expansión	103
Tabla 3.17 Resumen compactación Proctor modificado AASHTO T-180 y CBR AASHTO T-193 de los suelos agrupados escogidos.....	104

Tabla 4.1 (Parte 1). Datos para la estadística descriptivas.	105
Tabla 4.1 (Parte 2). Datos para la estadística descriptivas.	106
Tabla 4.2 Resultados para los datos estadísticos descriptivos.....	107
Tabla 4.3 distribución de frecuencias CBR suelos tratados	108
Tabla 4.4 Tabla de intervalo de confianza al 95%.	110
Tabla 4.5 Tabla con los resultados de Anderson-Darling.	111
Tabla 4.6 Planilla de datos para a distribución t-Student.	112
Tabla 4.7 Especificaciones técnicas recomendadas.	114
Tabla 4.8 Datos promedios de CBR 0.1”.	116
Tabla 4.9 Comparación costos económicos (ANEXO VII).....	117
Tabla 4.10 Resultado costo de subrasante para 0,1km.....	118

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1 Niveles de investigación	10
Figura 2.1 Límites de consistencia-límites de Atterberg.....	34
Figura 2.2 Dispositivo Casagrande (vista lateral)	35
Figura 2.3 Curva de flujo para la determinación del límite líquido de una arcilla limos	35
Figura 2.4 Prueba de limite plástico	36
Figura 2.5 Grafica esfuerzo vs penetración.....	43
Figura 3.1 Mapa de la provincia Cercado Tarija.....	51
Figura 3.2 Mapa de la provincia Cercado Tarija.....	55
Figura 3.3 Extracción de muestra barrio 24 de Junio.....	59
Figura 3.4 Extracción de muestra barrio Torrecillas.....	60
Figura 3.5 Almacenamiento de muestras de suelo para preservación y cuidado óptimos	60
Figura 3.6 Copa de Casa Grande.....	61
Figura 3.7 Ranurador.....	61
Figura 3.8 Placa de vidrio.....	62
Figura 3.9 Taras para almacenamiento.....	62
Figura 3.10 Recipiente de mezclado	62
Figura 3.11 Espátula.....	63
Figura 3.12 Proceso preparación de muestra.....	63
Figura 3.13 Muestras tamizadas	64
Figura 3.14 Reposo o curado de tres muestras	64
Figura 3.15 Ranurado del suelo en la copa de Casagrande	65
Figura 3.16 Ensayo del Límite Plástico.....	66

Figura 3.17 Carta de plasticidad AASHTO barrio Los Laureles	70
Figura 3.18 Carta de plasticidad SUCS barrio los Laureles.....	71
Figura 3.19 Molde metálico de 4 pulgadas de diámetro	77
Figura 3.20 Probeta graduada.....	78
Figura 3.21 Preparación de la muestra	79
Figura 3.22 Compactación suelo T -180	79
Figura 3.23 Pesado del molde y la muestra enrasada.....	80
Figura 3.24 Muestras extraídas	80
Figura 3.25 Prensa de carga	81
Figura 3.26 Moldes cilíndricos de metal	82
Figura 3.27 Martillo metálico de 4.5 kg y altura de caída de 46 cm.....	82
Figura 3.28 Disco espaciador metálico	83
Figura 3.29 Pesado del molde y la muestra enrasada.....	83
Figura 3.30 Utensilios y herramientas de uso general.....	84
Figura 3.31 Tanques de inmersión	84
Figura 3.32 Preparación de la muestra	85
Figura 3.33 Toma de mediciones	86
Figura 3.34 Compactado por capas	87
Figura 3.35 Muestras en saturación.....	88
Figura 3.36 Medición de la expansión	88
Figura 3.37 Penetración de la muestra	89
Figura 3.38 Extracción de muestras del ensayo CBR para análisis posterior	90
Figura 3.39 Preparación de muestras para secado en horno.....	90
Figura 3.40 Pesado de la cal.....	92
Figura 3.41 Aditivo Terrasil.....	92

Figura 3.42 Enraizado de la muestra durante el proceso de compactación.....	95
Figura 3.43 Mezclado de la cal con el suelo en bandeja	97
Figura 3.44 Medición de la expansión	97
Figura 3.45 Preparación de la prensa para el ensayo CBR	98
Figura 3.46 Suelo penetrado.....	98
Figura 3.47 Extracción muestras del molde	99
Figura 3.48 Pesado de las taras con muestras después del secado en horno	99

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Página
Gráfico 4.1 Histograma y polígono de frecuencia CBR suelos tratados.....	108
Gráfico 4.2 Polígono de frecuencia acumulada CBR suelo natural.	109
Gráfico 4.4 Expansión de los suelos.	115
Gráfico 4.5 Columnas del incremento CBR.....	115
Gráfico 4.6 Barras comparación de costos.....	118