

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”**

**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFÍA Y VÍAS DE COMUNICACIÓN**



**“ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE EN  
ARCILLAS EN FUNCIÓN AL PORCENTAJE DE CAL AÑADIDO PARA SU  
ESTABILIZACIÓN”**

**Por:**

**JHONATAN DAVID SORZANO NAVAS**

**SEMESTRE I, GESTIÓN 2022**

**TARIJA-BOLIVIA**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”**  
**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**  
**DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFÍA Y VÍAS DE COMUNICACIÓN**

**“ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE EN  
ARCILLAS EN FUNCIÓN AL PORCENTAJE DE CAL AÑADIDO PARA SU  
ESTABILIZACIÓN”**

**Por:**

**JHONATAN DAVID SORZANO NAVAS**

**SEMESTRE I, GESTIÓN 2022**

**TARIJA-BOLIVIA**

**DEDICATORIAS:**

El presente proyecto está dedicado en primer lugar a Dios por brindarme el regalo de la vida y darme las fuerzas para poder alcanzar esta primera meta propuesta en la vida, y por darme las fuerzas en los momentos difíciles.

**A MIS PADRES:**

Daniel Silvestre Sorzano Verastegui y María Gloria Navas De Sorzano, sin su apoyo no hubiera llegado hasta aquí.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN AL DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

	Página.
1.1. Introducción.....	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Situación problemática.....	3
1.3.1. Conceptualización puntual del objeto de estudio.....	3
1.3.2. Descripción del fenómeno ocurrido.....	3
1.3.3. Breve explicación de la perspectiva de solución.....	3
1.3.4. Problema.....	4
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. Objetivo general.....	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
1.5. Hipótesis.....	4
1.5.1. Identificación de variables.....	5
1.5.1.1. Variable independiente.....	5
1.5.1.2. Variable dependiente.....	5
1.5.2. Conceptualización de variables.....	5
1.5.2.1. Cantidad de cal.....	5
1.5.2.2. Resistencia al corte.....	5
1.5.3. Operacionalización.....	6
1.6. Alcance de la investigación.....	6

## CAPÍTULO II

### ESTADO DE CONOCIMIENTO SOBRE LA RESISTENCIA AL CORTE Y ESTABILIZACIÓN CON CAL

	Página.
2.1. Generalidades.....	9
2.2. Marco conceptual.....	9
2.2.1. Suelos.....	9
2.2.2. Tipos de suelo.....	10
2.2.3. Suelos residuales.....	10
2.2.4. Suelos transportados.....	10
2.2.5. Tamaño de las partículas.....	11
2.2.6. Arcillas.....	11
2.2.6.1. Estructura de los filosilicatos.....	12
2.2.6.2. Propiedades físico-químicos.....	13
2.2.6.2.1. Superficie específica.....	13
2.2.6.2.2. Capacidad de intercambio iónico.....	13
2.2.6.2.3. Capacidad de absorción.....	14
2.2.6.2.4. Hidratación e hinchamiento.....	15
2.2.6.2.5. Plasticidad.....	15
2.2.7. Composición de suelos.....	16
2.2.8. Clasificación de suelos.....	17
2.2.8.1. Clasificación en base a norma AASHTO.....	17
2.2.8.2. Clasificación de suelos SUCS ASTM D 2487-00.....	20
2.2.9. Caracterización de los suelos.....	24
2.2.9.1. Parámetros de naturaleza.....	25

2.2.9.1.1. Variación volumétrica.....	25
2.2.9.1.2. Permeabilidad.....	25
2.2.9.1.3. Granulometría.....	25
2.2.9.1.4. Plasticidad.....	26
2.2.9.1.5. Límites de Atterberg.....	26
2.2.9.1.6. Índice de plasticidad (IP).....	27
2.2.9.2. Parámetros de estado del suelo.....	27
2.2.9.2.1. Resistencia mecánica.....	28
2.2.9.2.2. Compactación.....	28
2.2.9.2.3. Capacidad portante (CBR).....	28
2.2.10. Definición de la estabilidad de suelos.....	29
2.2.11. Estabilización suelo-cal.....	29
2.2.12. Tipo de suelos para estabilizar con cal.....	31
2.2.13. Definiciones de la cal.....	32
2.2.14. Propiedades de la cal.....	32
2.2.14.1. Propiedades físicas de la cal.....	32
2.2.14.2. Propiedades químicas de la cal.....	33
2.2.15. Cales utilizadas para la estabilización de suelos.....	33
2.2.15.1. Cales vivas.....	33
2.2.15.2. Cales hidratados.....	33
2.2.15.3. Cales en forma de lechada.....	34
2.2.16. Acción de la cal como estabilizante.....	34
2.2.17. Análisis de los materiales a utilizar en la estabilización.....	34
2.2.17.1. Cal.....	35
2.2.17.2. Agua.....	35

2.2.18.	Mezcla suelo-cal.....	35
2.2.19.	Propiedades de la mezcla suelo-cal.....	35
2.2.19.1.	Resistencia.....	35
2.2.19.2.	Plasticidad.....	36
2.2.20.	Ventajas y desventajas de los diferentes métodos de aplicación de la cal.....	36
2.2.21.	Resistencia cortante de los suelos.....	37
2.2.21.1.	Esfuerzo efectivo.....	39
2.2.21.2.	Naturaleza del esfuerzo efectivo.....	39
2.2.21.3.	Principio de los esfuerzos efectivos en suelos secos o saturados.....	41
2.2.22.	Parámetros de resistencia cortante.....	42
2.2.22.1.	Ángulo de fricción.....	42
2.2.22.2.	Esfuerzo principal mayor.....	42
2.2.22.3.	Esfuerzo principal menor.....	43
2.2.23.	Ensayo de corte directo.....	43
2.2.24.	Ensayo de consolidación drenado (CD).....	47
2.2.25.	Ensayo consolidado no drenado (CU).....	47
2.2.26.	Ensayo triaxial no consolidado no drenado (UU).....	48
2.2.27.	Ensayo de compresión inconfínada.....	51
2.2.28.	Preparación de la muestra.....	54
2.2.28.1.	Muestra.....	54
2.2.28.2.	Especímenes compactados.....	55
2.2.29.	Marco normativo.....	57

## CAPÍTULO III

### RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN

	Página.
3.1. Criterios Metodológicos.....	58
3.1.1. Unidad de Muestreo.....	58
3.1.2. Población y muestra.....	58
3.1.2.1. Población.....	59
3.1.2.2. Muestra.....	59
3.1.3. Selección de la técnica de Muestreo.....	60
3.1.4. Tamaño de la Muestra.....	60
3.1.5. Datos para el Cálculo del tamaño de Muestra.....	60
3.1.6. Número de ensayos (suelo natural).....	60
3.1.6.1. Número de ensayos (suelo-cal).....	61
3.1.6.2. Tipos de suelo a ser sujetos a estudio (arcilla).....	62
3.1.6.3. Porcentajes de cal.....	62
3.1.6.4. Total, de ensayos.....	62
3.2. Ubicación de las zonas de extracción.....	64
3.2.1. Coordenadas Geografías y UTM de las zonas de extracción de muestras para la caracterización del suelo.....	64
3.2.2. Mapa satelital de la zona de extracción de muestras de suelo.....	65
3.3. Caracterización del suelo.....	68
3.3.1. Desarrollo o diseño.....	68
3.3.2. Procedimiento a seguir para el análisis del suelo, previo y posterior a su estabilización.....	68
3.3.3. Exploración de suelo y técnicas de muestreo (Normas ASTM D4220 y AASHTO T248).....	68



3.3.4.	Determinación de los límites de Atterberg.....	70
3.3.4.1.	Límite líquido.....	72
3.3.4.2.	Límite plástico.....	73
3.3.4.3.	Índice de plasticidad.....	74
3.3.5.	Material más fino que pasa el tamiz N° 200 en agregado mineral por lavado ASTM D4222 y AASHTO T88.....	75
3.3.6.	Clasificación de suelos AASHTO M 145-91 Y ASTM D 2487.....	78
3.3.6.1.	Clasificación de suelos por método AASHTO M 145-91(2000).....	78
3.3.6.2.	Clasificación de suelos por el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) ASTM D 2487.....	79
3.4.	Selección de la muestra para realizar la estabilización.....	80
3.4.1.	Determinación de la gravedad específica de los sólidos ASTM D 854-02 Material y equipo.....	81
3.4.2.	Determinación del tamaño de las partículas por ensayo de hidrometría ASTM 422-63.....	86
3.4.3.	Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de los suelos y rocas a través de su masa ASTM D 2216-03.....	91
3.4.4.	Compactación AASHTO T 99-03.....	93
3.5.	Caracterización de la cal.....	100
3.5.1.	Pruebas para la caracterización física y química de la cal hidratada.....	100
3.5.2.	Resultados de la caracterización física y química de la cal.....	101
3.6.	Valor de Soporte de California (CBR).....	102
3.7.	Elaboración de especímenes.....	110
3.8.	Resistencia a la compresión inconfiada.....	115
3.9.	Procedimiento.....	116
3.10.	Tiempo de curado.....	118

3.11.	Resultados obtenidos de la resistencia a la compresión simple.....	119
3.12.	Compresión inconfinado de suelo natural.....	119
3.13.	Selección del agente estabilizante.....	119
3.14.	Criterios para la dosificación de la mezcla suelo-cal.....	123
3.15.	Selección del porcentaje óptimo de cal utilizando los límites de Atterberg..	123
3.16.	Elaboración de especímenes y pruebas para la muestra suelo-cal.....	125
3.16.1.	Límites de Atterberg.....	125
3.16.2.	Granulometría de la muestra suelo-cal método de lavado.....	127
3.16.3.	Determinación de la gravedad específica de los sólidos.....	128
3.16.4.	Determinación del tamaño de las partículas por hidrometría.....	129
3.16.5.	Clasificación de la mezcla suelo-cal.....	130
3.16.5.1.	Clasificación AASHTO M-145.....	130
3.16.5.2.	Clasificación ASTM D2487-00 (SUCS).....	130
3.16.6.	Determinación de la relación humedad-densidad de la mezcla suelo-cal....	132
3.17.	Ensayo de compresión inconfineda suelo natural.....	133
3.18.	Ensayo de compresión inconfineda suelo-cal 3%.....	136
3.19.	Resumen de resultados de caracterización.....	139

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS Y CONFIABILIDAD DE RESULTADOS

	Página.	
4.1.	Base de datos resistencia cortante.....	140
4.1.1.	Ensayo de compresión inconfineda (suelo natural).....	140
4.1.2.	Ensayo de compresión inconfineda (suelo-cal).....	140
4.1.3.	Comparación de resultados.....	142
4.2.	Tratamiento estadístico descriptivo.....	143

4.2.1.	Tratamiento estadístico inferencial.....	145
4.2.2.	Prueba de hipótesis.....	145
4.3.	Especificación técnica del uso.....	146

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

	Página.	
5.1.	Conclusiones.....	148
5.2.	Recomendaciones.....	149

#### Bibliografía

#### ANEXOS

ANEXO I Granulometría

ANEXO II Límites de Atterberg

ANEXO III Clasificación de suelos

ANEXO IV Contenido de humedad

ANEXO V Gravedad específica de los sólidos

ANEXO VI Hidrometría

ANEXO VII Compactación (proctor T-99)

ANEXO VIII California bearing ratio (CBR)

ANEXO IX Preparación de muestras AASTHO T 307-99(2012)

ANEXO X Compresión inconfiada

ANEXO XI Parámetros de resistencia círculo de mohr

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página.
Tabla 1.1. Operacionalización de la variable independiente.....	6
Tabla 1.2. Operacionalización de la variable dependiente.....	6
Tabla 2.1. Clasificación de suelos según AASTHO M-145.....	20
Tabla 2.2. Carta de plasticidad.....	22
Tabla 2.3. Clasificación de suelos ASTM D-2487.....	23
Tabla 2.4. Simbología de suelos ASTM-2487.....	24
Tabla 2.5. Relación de clasificación AASTHO-SUCS.....	24
Tabla 2.6. Consistencia de la arcilla.....	54
Tabla 2.7. Marco normativo.....	57
Tabla 3.1. Unidad de muestreo.....	58
Tabla 3.2. Población.....	59
Tabla 3.3. Muestra estadística.....	59
Tabla 3.4. Datos para el cálculo.....	60
Tabla 3.5. Número de ensayos en suelo natural.....	60
Tabla 3.6. Número de ensayos en muestra suelo-cal 3%.....	61
Tabla 3.7. Número de ensayos en muestra suelo-cal 5%.....	61
Tabla 3.8. Número de ensayos en muestra suelo-cal 7%.....	61
Tabla 3.9. Tipo de suelo a usar.....	62
Tabla 3.10. Porcentaje de cal.....	62
Tabla 3.11. Total de ensayos a realizar.....	62
Tabla 3.12. Tabla de fijación estadística.....	63
Tabla 3.13. Coordenadas Geográficas y UTM.....	65
Tabla 3.14. Tabla resumen de límites de Atterberg.....	75

Tabla 3.15.	Resumen de granulometría método de lavado (suelo natural).....	77
Tabla 3.16.	Ejemplo de clasificación de suelos método AASHTO.....	79
Tabla 3.17.	Ejemplo de clasificación de suelos método SUCS.....	80
Tabla 3.18.	Tabla resumen de clasificación de suelos.....	81
Tabla 3.19.	Calibración de frasco volumétrico.....	83
Tabla 3.20.	Tabla de peso específico para diferentes suelos.....	84
Tabla 3.21.	Tabla resumen de gravedad específica de los sólidos.....	86
Tabla 3.22.	Resumen de ensayo de hidrómetro.....	90
Tabla 3.23.	Tabla resumen de contenido de humedad.....	93
Tabla 3.24.	Tabla resumen de compactación T-99.....	99
Tabla 3.25.	Norma para la caracterización física y química de la cal.....	100
Tabla 3.26.	Característica física y química de la cal.....	101
Tabla 3.27.	Análisis granulométrico de la cal.....	102
Tabla 3.28.	Ensayo de Soporte de California (CBR).....	108
Tabla 3.29.	Ensayos de CBR suelos estabilizados y natural.....	110
Tabla 3.30.	Resumen de resultados suelo natural.....	119
Tabla 3.31.	Selección del estabilizante.....	121
Tabla 3.32.	Selección de estabilizante según el tipo de suelo.....	122
Tabla 3.33.	Variación de IP en mezclas de suelo-cal.....	124
Tabla 3.34.	Resumen de límites de Atterberg suelo-cal.....	126
Tabla 3.35.	Granulometría de suelo método de lavado suelo-cal.....	128
Tabla 3.36.	Resumen de gravedad específica de sólidos suelo-cal.....	129
Tabla 3.37.	Cuadro de resumen de hidrometría.....	129
Tabla 3.38.	Resumen de clasificación de suelos-cal.....	131
Tabla 3.39.	Ensayo de compactación (5% de cal).....	132

Tabla 3.40.	Ensayo de compresión inconfiada suelo natural.....	133
Tabla 3.41.	Ensayo de compresión inconfiada suelo-cal 3%.....	136
Tabla 3.42.	Resumen primera parte de caracterización de las muestras de suelos...	139
Tabla 3.43.	Resumen segunda parte de caracterización de las muestras de suelos...	139
Tabla 4.1.	Resultados del ensayo de compresión inconfiada suelo natural.....	140
Tabla 4.2.	Resultados del ensayo de compresión inconfiada suelo-cal 3%.....	141
Tabla 4.3.	Resultados del ensayo de compresión inconfiada suelo-cal 5%.....	141
Tabla 4.4.	Resultados del ensayo de compresión inconfiada suelo-cal 7%.....	142
Tabla 4.5.	Cuadro de diferencia de resultados de resistencia al corte.....	142
Tabla 4.6.	Tabla de intervalos y clasificación.....	143
Tabla 4.7.	Media de datos – media de la media.....	145
Tabla 4.8.	Nivel de confianza y significancia.....	145

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página.
Figura 2.1. Origen y formación de los suelos.....	10
Figura 2.2. Estratigrafía de suelos transportados.....	11
Figura 2.3. Rango de tamaños de partículas de un suelo.....	11
Figura 2.4. Composición de un suelo.....	17
Figura 2.5. Estabilización suelo-cal.....	31
Figura 2.6. Bloque deslizante en un plano.....	38
Figura 2.7. Oblicuidad del esfuerzo resultante.....	38
Figura 2.8. Diagrama de esfuerzo para un bloque deslizante en un plano.....	39
Figura 2.9. Modelo intuitivo del suelo demostrado la naturaleza del esfuerzo efectivo.....	40
Figura 2.10. Aparato de corte directo.....	43
Figura 2.11. Diagrama de la falla en Corte Directo.....	44
Figura 2.12. Diagrama de falla para arcilla dura ensayada en Corte Directo.....	45
Figura 2.13. Muestra como el esfuerzo aumenta con el desplazamiento de corte.....	46
Figura 2.14. Grafica del esfuerzo cortante y el cambio en la altura de la muestra frente al desplazamiento cortante para la arena densa y seca.....	46
Figura 2.15. Envolvente de falla de mohr.....	47
Figura 2.16. Envolvente de falla no drenado resultante del triaxial UU.....	49
Figura 2.17. Deformación vertical en función al esfuerzo desviador en un ensayo triaxial UU.....	50
Figura 2.18. Ensayo de compresión inconfínada.....	51
Figura 2.19. Deformación vertical respecto al esfuerzo axial en la compresión inconfínada.....	52

Figura 2.20.	Combinación de esfuerzos en la falla en el ensayo de compresión inconfiada.....	53
Figura 2.21.	Molde de gradiente de densidad.....	56
Figura 3.1.	Mapa de la provincia Cercado Tarija.....	64
Figura 3.2.	Mapa satelital zona de Moto Mendez.....	65
Figura 3.3.	Mapa satelital zona Los Chapacos.....	66
Figura 3.4.	Mapa satelital zona de San Blas.....	66
Figura 3.5.	Mapa satelital zona de INCERTAR.....	67
Figura 3.6.	Molde de gradiente de densidad.....	111
Figura 3.7.	Índice de plasticidad vs % de cal.....	124
Figura 3.8.	Carta de clasificación ASSTHO M-145.....	131
Figura 4.1.	Histograma.....	143
Figura 4.2.	Prueba de hipótesis de dos colas.....	146



## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

	Página.
Fotografía 3.1. Extracción de muestra zona Moto Méndez.....	69
Fotografía 3.2. Extracción de muestra zona Los Chapacos y carretera a Sella.....	70
Fotografía 3.3. Preparación de muestra para el ensayo de límite líquido.....	71
Fotografía 3.4. Equipo casa Grande y muestra de suelo para ensayo.....	72
Fotografía 3.5. Realización de ensayo de casa grande.....	73
Fotografía 3.6. Ensayo de límite plástico.....	74
Fotografía 3.7. Muestra para ensayo de granulometría método de lavado.....	76
Fotografía 3.8. Lavado de muestra.....	76
Fotografía 3.9. Secado, pesado de muestra.....	77
Fotografía 3.10. Calibración de frasco volumétrico.....	82
Fotografía 3.11. Gravedad específica de los sólidos.....	84
Fotografía 3.12. Preparación de muestra para ensayo de hidrómetro.....	87
Fotografía 3.13. Probeta más muestra de suelo.....	88
Fotografía 3.14. Preparación de muestra para ensayo de contenido de humedad.....	92
Fotografía 3.15. Preparación de muestra para compactación T-99.....	96
Fotografía 3.16. Muestra con 5 % de humedad para compactación.....	97
Fotografía 3.17. Compactación de suelo T-99.....	98
Fotografía 3.18. Pesado de muestra más molde T-99.....	98
Fotografía 3.19. Molde contrapesos y collar de extensión.....	104
Fotografía 3.20. Taras y muestras.....	105
Fotografía 3.21. Realizando prueba de CBR.....	107
Fotografía 3.22. Preparación de muestras.....	112
Fotografía 3.23. Reposo hermético para que se homogenice la muestra.....	112

Fotografía 3.24. Peso de las 5 capas que serán sometidas a compactación estática....	113
Fotografía 3.25. Compactador manual.....	113
Fotografía 3.26. Verificación de alturas por cada capa.....	114
Fotografía 3.27. Elaboración de probetas.....	114
Fotografía 3.28. Preparación de muestras.....	115
Fotografía 3.29. Equipo de compresión inconfiada.....	116
Fotografía 3.30. Configuración de equipo para romper probetas.....	117
Fotografía 3.31. Muestra siendo sometida a una carga axial.....	118
Fotografía 3.32. Muestra de suelo 3,5 y 7% de cal para ensayos de límites.....	125
Fotografía 3.33. Ensayos de límite líquido y límite plástico para muestras suelo-cal.	126
Fotografía 3.34. Muestra a 3,5 y 7% de cal para ensayo de granulometría método de lavado.....	127
Fotografía 3.35. Tamizado de cal para ensayo de peso específico.....	128