

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



**“CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL SUELO MEDIANTE EL  
ENSAYO TRIAXIAL APLICADO A LA ESTABILIZACIÓN DE  
TALUDES PARA EL DISTRITO 12 DE LA CIUDAD DE TARIJA”**

**Por:**

**MARIA RENEE MAMANI ARAMAYO**

Proyecto de grado presentado a consideración de la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”, como requisito para optar por el Grado Académico de Licenciatura en INGENIERÍA CIVIL.

**SEMESTRE I - 2022**

**TARIJA – BOLIVIA**

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

**“CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL SUELO MEDIANTE EL  
ENSAYO TRIAXIAL APLICADO A LA ESTABILIZACIÓN DE  
TALUDES PARA EL DISTRITO 12 DE LA CIUDAD DE TARIJA”**

**Por:**

**MARIA RENEE MAMANI ARAMAYO**

**SEMESTRE I - 2022**

**TARIJA – BOLIVIA**

## **DEDICATORIA**

El presente proyecto de investigación lo dedico principalmente a mi mami, Silvia Teresa, por ser el pilar fundamental en mi vida, sin su apoyo, sacrificio y entrega, no hubiese llegado hasta aquí. Todo esto es para ti Mom, tú has alcanzado este logro conmigo.

A mi hermano; Andrés, por estar apoyándome, guiándome en todo momento, por no perder la fé en mí.

A mi papá; que desde el cielo, guió cada uno de mis pasos para poder lograr este objetivo. Te prometí que estarías orgulloso de mí y que a pesar de todo podría lograrlo. Sé que desde el cielo estas muy feliz, sonriéndome.

¡¡Papi soy ingeniera...!!

# ÍNDICE GENERAL

## CAPÍTULO I

### DISEÑO TEÓRICO

	<b>Página</b>
1.1. Antecedentes .....	2
1.2. Justificación .....	3
1.3. Diseño teórico .....	4
1.3.1. Planteamiento del problema.....	4
1.3.1.1. Situación problemática.....	4
1.3.1.2. Problema .....	5
1.4. Objetivos .....	5
1.4.1. Objetivo general.....	5
1.4.2. Objetivos Específicos.....	5
1.5. Hipótesis .....	5
1.6. Alcance .....	5
1.7. Definición de Variables .....	6
1.7.1. Variables independientes .....	6
1.7.2. Variables dependientes.....	7
1.8. Diseño metodológico .....	7
1.8.1. Componentes.....	7
1.8.2. Población.....	7
1.8.3. Muestra.....	7
1.8.4. Muestreo.....	7
1.8.5. Métodos y técnicas empleadas .....	8

1.8.5.1. Método .....	8
1.8.5.2. Técnica .....	8

## CAPÍTULO II

### CARACTERIZACIÓN MECÁNICA CON EL ENSAYO TRIAXIAL

	<b>Página</b>
2.1. Caracterización de suelos.....	10
2.1.1. Caracterización física de los suelos.....	10
2.1.2. Caracterización mecánica de los suelos .....	11
2.2. Resistencia cortante del suelo. ....	11
2.2.1. Resistencia drenada y no drenada .....	12
2.2.1.1. Resistencia no drenada.....	12
2.2.1.2. Resistencia drenada.....	13
2.2.2. Criterios de falla Mohr-Coulomb.....	13
2.2.2.1. Inclinación del plano de falla causado por cortante .....	16
2.2.2.2. Ley de falla por cortante en suelos saturados.....	17
2.2.3. Parámetros fundamentales en la ecuación de Mohr-Coulomb.....	18
2.2.3.1. Ángulo de fricción.....	18
2.2.3.2. Cohesión.....	19
2.2.3.3. Presión de poros .....	19
2.2.3.4. Rangos de los ángulos de fricción y cohesión por diferentes autores.....	20
2.2.3.5. Esfuerzos totales y efectivos .....	22
2.2.3.5.1. Esfuerzo efectivo.....	23
2.2.3.5.2. Esfuerzo total .....	23
2.2.4. Determinación en laboratorio de los parámetros de la resistencia cortante. ....	24

2.3. Ensayo Triaxial .....	24
2.3.1. Objetivos de la prueba triaxial .....	27
2.3.2. Etapas del ensayo triaxial.....	27
2.3.2.1. Consolidación.....	27
2.3.2.2. Corte.....	28
2.3.3. Ventajas y limitaciones del ensayo .....	29
2.3.4. Variables del ensayo triaxial .....	30
2.3.5. Algunas causas de error en el ensayo Triaxial .....	30
2.3.6. Tipos de pruebas triaxiales.....	31
2.3.6.1. Prueba lenta – Prueba con consolidación y con drenaje (CD).....	32
2.3.6.2. Prueba rápida – Prueba con consolidación y sin drenaje (CU).....	35
2.3.6.3. Prueba rápida – Prueba sin consolidación y sin drenaje (UU).....	37
2.4. Estabilidad de Taludes .....	40
2.4.1. Definición de talud.....	40
2.4.2. Partes de un Talud.....	40
2.4.3. Análisis de la estabilidad.....	42
2.5. Marco referencial de ensayos de caracterización.....	43
2.5.1. Contenido de humedad en suelos (ASTM D2216-98).....	43
2.5.2. Gravedad específica de los sólidos (ASTM D854-10) .....	43
2.5.3. Límites de Atterberg (ASTM D 4318).....	44
2.5.4. Granulometría (ASTM D422).....	45
2.5.5. Clasificación de los suelos .....	45
2.5.5.1. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) .....	46
2.5.5.2. Clasificación AASHTO .....	47

2.5.6. Ensayo triaxial .....	49
2.5.6.1. Maquina triaxial .....	49
2.5.6.1.1. Panel de control de distribución de agua y manómetro digital .....	49
2.5.6.1.2. Sistema automático de medición de la variación de volumen .....	51
2.5.6.1.3. Prensa triaxial.....	52
2.5.6.1.4. Sistema neumático para aplicar presiones constantes (Blader).....	53
2.5.6.1.5. Tanque de desaireación de agua, panel de control y bomba de vacío.....	55
2.5.6.1.6. Geodatalog .....	57
2.5.6.1.7. Cámara o celda triaxial.....	58

### **CAPÍTULO III**

#### **UBICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN FÍSICA**

	<b>Página</b>
3.1. Ubicación .....	60
3.1.1. Barrio San Blas .....	60
3.1.2. Barrio Miraflores.....	62
3.1.3. Barrio Germán Busch.....	63
3.1.4. Barrio San Martín.....	64
3.1.5. Barrio Aranjuez.....	65
3.2. Extracción de las muestras .....	67
3.2.1. Equipo utilizado para la extracción.....	67
3.2.2. Memoria de la extracción de muestras.....	68
3.3. Caracterización física de los suelos .....	70
3.3.1. Contenido de humedad (ASTM D 2216).....	70
3.3.2. Análisis granulométrico (ASTM D 422).....	72

3.3.2.1. Análisis granulométrico mediante lavado.....	72
3.3.2.2. Análisis granulométrico método del hidrómetro.....	76
3.3.3. Límites de Atterberg (ASTM D 4318).....	80
3.3.3.1. Limite liquido.....	80
3.3.3.2. Limite plástico.....	81
3.3.4. Gravedad específica de los sólidos del suelo (ASTM D-854).....	84

## CAPÍTULO IV

### CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LOS SUELOS

	<b>Página</b>
4.1. Preparación de las muestras.....	94
4.2. Armado de la muestra en el equipo.....	96
4.3. Ensayo triaxial consolidado no drenado CU.....	98
4.3.1. Etapa de saturación.....	98
4.3.2. Etapa de consolidación.....	100
4.3.3. Etapa de compresión.....	102
4.3.4. Círculos de esfuerzos de Mohr.....	107
4.4. Ensayo triaxial no consolidado no drenado UU.....	110
4.5. Análisis de resultados.....	121
4.5.1. Análisis de resultados en el ensayo de compresión triaxial.....	121
4.5.1.1. Análisis de resultados en la condición Consolidada no drenada.....	121
4.5.1.2. Análisis de resultados en la condición No consolidada no drenada.....	121
4.5.2. Análisis de los resultados obtenidos en ambas condiciones.....	122
4.5.3. Análisis comparativo de resultados.....	122
4.6. Elaboración del mapa de características geotécnicas del distrito.....	124



4.7. Análisis de estabilidad de taludes .....	126
4.7.1. Descripción del talud en estudio .....	126
4.7.2. Análisis de datos con el Software GEO5 .....	127
4.7.2.1. Ingreso de datos.....	130
4.7.2.2. Factores de seguridad obtenidos con el software.....	132

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

	<b>Página</b>
5.1. Conclusiones .....	135
5.2. Recomendaciones.....	136

## **BIBLIOGRAFÍA**

### **ANEXOS**

ANEXO I Memoria fotográfica general

ANEXO II Caracterización física de las muestras

ANEXO III Caracterización mecánica de las muestras

ANEXO IV Mapas de caracterización del distrito

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Página</b>
Fig. 2.1. Plano de falla .....	14
Fig. 2.2. Envolvente de falla de Mohr y los criterios de falla de Mohr-Coulomb.....	15
Fig. 2.3. Envolvente de falla de Mohr. ....	15
Fig. 2.4. Inclinación del plano de falla en el suelo con respecto al plano principal mayor.....	16
Fig. 2.5. Círculo de Mohr y envolvente de falla. ....	17
Fig. 2.6. La presión de poros en las partículas de suelo.....	20
Fig. 2.7. Esfuerzos dentro una masa de suelo .....	23
Fig. 2.8. Esquema de un ensayo triaxial.....	25
Fig. 2.9. Detalle de la celda triaxial. ....	26
Fig. 2.10. Detalle del equipo triaxial.....	26
Fig. 2.11. Diagrama del ensayo triaxial. ....	27
Fig. 2.12. Ejemplos de cambios de esfuerzos que conducen al fracaso en el campo .....	29
Fig. 2.13. Ensayo consolidado drenado CD.....	33
Fig. 2.14. Ejemplos de situaciones en campo para los que la estabilidad a largo plazo se puede determinar sobre la base de los resultados de las pruebas drenadas CD .....	34
Fig. 2.15. Ilustración esquemática de un diagrama de Mohr con envolvente de falla para las pruebas drenadas en el suelo.....	34
Fig. 2.16. Ensayo consolidado – no drenado CU.....	36
Fig. 2.17. Ejemplos de casos de campo para el cual la estabilidad a corto plazo se puede determinar sobre la base de los resultados de la prueba CU. ....	37
Fig. 2.18. Ensayo no consolidado no-drenado UU. ....	38
Fig. 2.19. Ejemplos de casos de campo para el cual la estabilidad a corto plazo se puede determinar sobre la base de los resultados de la prueba UU. ....	39
Fig. 2.20. Ilustración esquemática de los esfuerzos obtenidos de un suelo parcialmente saturados obtenidos a partir de la prueba UU.....	40
Fig. 2.21. Nomenclatura de taludes y laderas .....	42
Fig. 2.22. Equipo triaxial del laboratorio UAJMS .....	49

Fig. 2.23. Panel de control de agua y manómetro digital.....	50
Fig. 2.24. Manómetro digital.....	51
Fig. 2.25. Cilindros de medición de cambios de volumen.....	52
Fig. 2.26. Prensa triaxial.....	53
Fig. 2.27. Blader utilizado en los ensayos.....	54
Fig. 2.28. Sistema de Bladers.....	54
Fig. 2.29. Tanque de desaireación de agua.....	55
Fig. 2.30. Panel de control de entrada de aire y agua.....	56
Fig. 2.31. Bomba de vacíos y desecador.....	56
Fig. 2.32. Compresor de aire.....	57
Fig. 2.33. Geodatalog series 6000.....	57
Fig. 2.34. Software DATACOMM.....	58
Fig. 2.35. Celda triaxial.....	58
Fig. 3.1. Imagen satelital de la distribución de los puntos de extracción del barrio San Blas.....	61
Fig. 3.2. Imagen satelital de la distribución de los puntos de extracción del barrio Miraflores.....	62
Fig. 3.3. Imagen satelital de la distribución de los puntos de extracción del barrio Germán Busch.....	63
Fig. 3.4. Imagen satelital de la distribución de los puntos de extracción del barrio San Martín.....	64
Fig. 3.5. Imagen satelital de la distribución de los puntos de extracción del barrio Aranjuez.....	66
Fig. 3.6. Imagen de la distribución de los puntos en el distrito 12.....	66
Fig. 3.7. Equipo utilizado en la extracción de muestras.....	67
Fig. 3.8. Limpieza superficial del punto de extracción.....	68
Fig. 3.9. Extracción de muestras del talud del barrio San Blas.....	69
Fig. 3.10. Extracción de muestras.....	69
Fig. 3.11. Muestras envueltas con el papel film.....	70
Fig. 3.12. Esquema de realización del ensayo de contenido de humedad.....	70
Fig. 3.13. Esquema de realización del ensayo granulométrico mediante lavado.....	72

Fig. 3.14. Esquema de realización del ensayo de granulometría por hidrómetro .....	76
Fig. 3.15. Esquema de realización del ensayo de límite líquido. ....	80
Fig. 3.16. Esquema del ensayo de límite plástico .....	81
Fig. 3.17. Esquema de la realización del ensayo de gravedad específica de los sólidos de un suelo. ....	84
Fig. 4.1. Muestras extraídas. ....	94
Fig. 4.2. Tallado y lijado de las probetas .....	95
Fig. 4.3. Probeta terminada junto al extractor. ....	95
Fig. 4.4. Pesado de la probeta .....	96
Fig. 4.5. Esquema del montaje de la muestra en la celda. ....	97
Fig. 4.6. Manejo de las presiones y dataloger en el inicio .....	98
Fig. 4.7. Disipación del exceso de presión de poros en función del tiempo (Espécimen 1 Punto 2). ....	101
Fig. 4.8. Método de la raíz del tiempo para determinar el tiempo de consolidación (Espécimen 1 Punto 2). ....	101
Fig. 4.9. Canales mostrados en el ordenador del triaxial generados por el DATACOMM (Espécimen 1 Punto 2). ....	102
Fig. 4.10. Esquema del retiro del espécimen al concluir el ensayo CU. ....	104
Fig. 4.11. Curva esfuerzo – deformación (Espécimen 1 Punto 2) .....	107
Fig. 4.12. Círculos de Mohr y envolvente de falla (Punto 2). ....	110
Fig. 4.13. Canales mostrados en el ordenador del triaxial generados por el DATACOMM (Espécimen 1, Punto 5). ....	111
Fig. 4.14. Esquema de remoción del espécimen al finalizar el ensayo UU .....	112
Fig. 4.15. Curva esfuerzo – deformación (Espécimen 1 Punto 2). ....	117
Fig. 4.16. Círculos de Mohr y envolvente de falla (Punto 2). ....	119
Fig. 4.17. Talud barrio San Blas (Punto 2) .....	127
Fig. 4.18. Inicio GEO5 .....	128
Fig. 4.19. Selección de subprogramas. ....	128
Fig. 4.20. Ajustes de los parámetros en el GEO5 .....	129
Fig. 4.21. Configuración de los parámetros en el GEO5 .....	129
Fig. 4.22. Ingreso propiedades del suelo GEO5. ....	130

Fig. 4.23. Ingreso de la topografía en el GEO5 .....	131
Fig. 4.24. Propiedades del suelo adoptadas en GEO5.....	131
Fig. 4.25. Factor de seguridad del talud - ensayo UU.....	132
Fig. 4.26. Factor de seguridad del talud - ensayo CU.....	132

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Página</b>
Tabla 1.1. Operacionalización de las variables independientes.....	6
Tabla 1.2. Operacionalización de las variables dependientes.....	7
Tabla 2.1. Valores típicos del ángulo de fricción de algunos suelos .....	21
Tabla 2.2. Rangos de ángulos de fricción para suelos (grados).....	21
Tabla 2.3. Resumen de datos estadísticos de cohesión y de rozamiento .....	22
Tabla 2.4. Tabla de clasificación SUCS.....	46
Tabla 2.5. Tabla de clasificación AASHTO .....	48
Tabla 3.1. Tabla de coordenadas de los puntos de muestreo del barrio San Blas.....	61
Tabla 3.2. Tabla de coordenadas de los puntos de muestreo del barrio Miraflores.....	62
Tabla 3.3. Tabla de coordenadas de los puntos de muestreo del barrio Germán Busch.....	63
Tabla 3.4. Tabla de coordenadas de los puntos de muestreo del barrio San Martín.....	64
Tabla 3.5. Tabla de coordenadas de los puntos de muestreo del barrio Aranjuez .....	65
Tabla 3.6. Resumen de contenido de humedad a distintas profundidades.....	71
Tabla 3.7. Resumen granulométrico de los tamices predominantes .....	74
Tabla 3.8. Resumen granulométrico por medio del hidrómetro. ....	78
Tabla 3.9. Resumen de límites e índice de plasticidad a distintas profundidades .....	82
Tabla 3.10. Resumen de clasificación de las muestras .....	83
Tabla 3.11. Resumen de la gravedad específica de los sólidos de los suelos a diferentes profundidades .....	86
Tabla 3.12. Resumen de la caracterización física de los suelos a un metro de profundidad. ....	87
Tabla 3.13. Resumen de la caracterización física de los suelos a dos metros de profundidad. ....	89
Tabla 3.14. Resumen de la caracterización física de los suelos a tres metros de profundidad. ....	91
Tabla 4.1. Tabla de datos y cálculo del valor del coeficiente B en la etapa de Saturación (Espécimen 1 Punto 2).....	99
Tabla 4.2. Planilla de registro de la etapa de consolidación (Espécimen 1 Punto 2)...	100

Tabla 4.3. Datos registrados por el programa DATACOMM .....	103
Tabla 4.4. Planilla de cálculos de la etapa de compresión de la muestra, ensayo triaxial CU (Espécimen 1 Punto 2) .....	106
Tabla 4.5. Esfuerzos encontrados con el ensayo CU (Espécimen 1 Punto 2).....	107
Tabla 4.6. Valores necesarios para graficar los círculos de Mohr (Punto 2) .....	109
Tabla 4.7. Resultados de los ensayos CU realizados. ....	110
Tabla 4.8. Datos registrados por el programa DATACOMM .....	112
Tabla 4.9. Planilla de cálculos de la etapa de compresión de la muestra, ensayo triaxial UU (Espécimen 1 Punto 2) .....	114
Tabla 4.10. Esfuerzos encontrados con el ensayo UU (Espécimen 1 Punto 2). ....	117
Tabla 4.11. Valores necesarios para graficar los círculos de Mohr (Punto 2) .....	118
Tabla 4.12. Resultados obtenidos en el ensayo triaxial UU.....	120
Tabla 4.13. Cuadro comparativo del ángulo de fricción de los distintos tipos de suelos estudiados .....	123
Tabla 4.14. Cuadro comparativo de la cohesión en los distintos tipos de suelos estudiados. ....	123
Tabla 4.15. Parámetros geotécnicos que se representarán en los mapas de caracterización.....	125
Tabla 4.16. Resultados de los factores de seguridad.....	133