

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO
SECRETARIA DE EDUCACIÓN CONTINUA
DIRECCIÓN DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIAS



TESIS DE DOCTORADO

**ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE LOS ESFUERZOS
EN LAS ARCILLAS CON BASE EN LAS PRUEBAS DE CORTE
DIRECTO Y TRIAXIAL EN EL VALLE CENTRAL DE TARIJA**

Autor: Trinidad Cinthia Baldiviezo Montalvo

**Tesis de doctorado, presentada a consideración de la
Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, como requisito
para optar el título de Doctor en Ciencias - Mención Ingeniería
Civil**

Tarija – Bolivia

2024

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO
SECRETARIA DE EDUCACIÓN CONTINUA
DIRECCIÓN DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIAS**

TESIS DE DOCTORADO

**ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE LOS ESFUERZOS
EN LAS ARCILLAS CON BASE EN LAS PRUEBAS DE CORTE
DIRECTO Y TRIAXIAL EN EL VALLE CENTRAL DE TARIJA**

Autor: Trinidad Cinthia Baldiviezo Montalvo

**Tesis de doctorado, presentada a consideración de la
Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, como requisito
para optar el título de Doctor en Ciencias - Mención Ingeniería
Civil**

Tarija – Bolivia

2024

HOJA DE APROBACIÓN
INVESTIGACIÓN TEÓRICA EXPERIMENTAL DE LA CONSOLIDACIÓN
DE LAS ARCILLAS, CON REFERENCIA PARTICULAR A LAS DEL
VALLE CENTRAL DE TARIJA

Postulante:

Laura Karina Soto Salgado

Tutor:

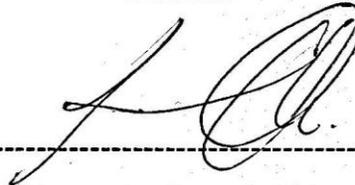
Ph.D. Ing. Iván Fernando Otálvaro Calle

Tribunal Calificador:



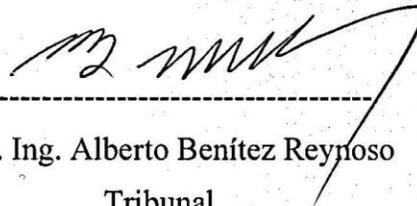
Ph.D. Ing. María Alejandra Leigue Fernández

Tribunal



D.Sc. Ing. Rosemary Janneth Llanque Ayala

Tribunal



Ph. D. Ing. Alberto Benítez Reynoso

Tribunal

Tarija, mayo de 2024

ADVERTENCIA

El tribunal calificador del presente trabajo de tesis de doctorado, no se solidariza con la forma, términos modos y expresiones vertidas en el mismo, siendo estas responsabilidades de la autora.

DEDICATORIA:

A Dios por otorgarme la sabiduría, paciencia, fuerza, voluntad y salud necesarias para culminar este proyecto de vida. A mi amada madre, Lía Montalvo, quien ha sido mi más grande apoyo y quien me enseñó que querer es poder.

A mi querida familia, a mi esposo Henry, a mi ángel Kevin y a mi hija Jhandira, les agradezco profundamente por su constante apoyo y comprensión durante el tiempo que no les dediqué mientras elaboraba este trabajo. Su amor incondicional fue mi inspiración y motivación para alcanzar este logro. Gracias por estar siempre a mi lado.

AGRADECIMIENTO:

Mi profundo agradecimiento a la Universidad Juan Misael Saracho en especial a la Coordinación del Doctorado, por brindarnos estos espacios que nos permiten seguir preparándonos para la vida profesional. Agradezco también a mis padres, cuyo inquebrantable apoyo ha sido fundamental en mi trayectoria profesional. A mis amados hijos, mi ángel Kevin y Jhandira, les agradezco por su comprensión y por ser mi mayor motivación en este camino. Y, por supuesto, agradezco infinitamente a mi esposo Henry, cuyo apoyo incondicional y amor han sido el pilar de todo este proceso. Sin su constante aliento, nada de esto sería posible.

PENSAMIENTO:

“Nunca consideres el estudio como un deber, sino como una oportunidad para penetrar en el maravilloso mundo del saber”

(Albert Einstein)

ÍNDICE DE CONTENIDO

PRELIMINARES

Hoja de aprobación	i
Advertencia.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimiento.....	iv
Pensamiento.....	v
Resumen	vi
Abstract	vii

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes	1
1.2 Descripción del problema	2
1.3 Planteamiento del problema	5
1.4 Justificación del problema	6
1.5 Objetivos de la investigación	8
1.5.1 Objetivo general	8
1.5.2 Objetivos específicos	8
1.5.3 Hipótesis	9

1.5.4 Limitaciones del estudio	10
--------------------------------------	----

CAPÍTULO II ESFUERZO DEFORMACIÓN EN SUELOS COHESIVOS

2.1 Introducción	11
2.2 Criterio de falla de Mohr-Coulomb	13
2.3 Inclinación del plano de falla causado por cortante	15
2.4 Determinación en laboratorio de los parámetros de resistencia cortante	18
2.4.1 Prueba de corte directo	18
2.4.1.1 Prueba drenada de corte directo sobre arena y arcilla saturadas	25
2.4.2 Prueba triaxial de corte	29
2.4.2.1 Prueba consolidada-drenada	33
2.4.2.2 Ángulo de fricción de esfuerzo efectivo para suelos cohesivos	40
2.4.2.3 Prueba consolidada-no drenada	41
2.4.2.4 Prueba no consolidada-no drenada	47
2.5 Correlación y regresión en Mecánica de Suelos de Ingeniería Geotécnica ...	57

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

3.1 Tipo de investigación	58
3.2 Materiales	61

3.3 Métodos y técnicas de la investigación	62
3.3.1 Métodos a emplear	62
3.3.2 Técnicas	64
3.3.3 Diseño de instrumentos para la recolección de información	65
3.4 Población y muestra	67
3.5 Identificación de variables	69
3.6 Recolección de datos	69
3.7 Zona de estudio	71
3.8 Selección de datos	78
3.9 Plan experimental	79
3.9.1 Objetivo del Experimento	79
3.9.2 Diseño experimental	79
3.10 Resumen de resultados.....	83
3.10.1 Caracterización de los suelos a 1m, 2m y 3m	83
3.10.2 Caracterización mecánica de los suelos a 1m, 2m y 3m	87
3.10.2.1 Corte Directo	87
3.10.2.2 Ensayo Triaxial	93
3.10.3 Resumen de resultados del ensayo de Corte Directo y Triaxial	100

CAPÍTULO IV RESULTADOS

4.1 Estadísticos de la caracterización básica de los suelos	106
4.1.1 Profundidad de 1m	108
4.1.1.1 Resumen general a la profundidad de 1m	108
4.1.1.2 Arcillas a la profundidad de 1m	109
4.1.1.3 Limos a la profundidad de 1m	110
4.1.2 Profundidad de 2m	111
4.1.2.1 Resumen general a la profunda de 2m	111
4.1.2.2 Arcillas a la profundidad de 2m	112
4.1.2.3 Limos a la profundidad de 2m	112
4.1.3 Profundidad de 3m	113
4.1.3.1 Resumen general a la profundidad de 3m	113
4.2 Carta de plasticidad	114
4.2.1 Profundidad de 1m	115
4.2.1.1 Suelos a 1m de profundidad	115
4.2.1.2 Arcillas a 1m de profundidad	116
4.2.1.3 Limos a 1m de profundidad.....	117
4.2.2 Profundidad de 2m	117
4.2.3 Profundidad de 3m	118

4.2.4 Comparación de Modelos de Plasticidad de los suelos en el Valle Central de Tarija	119
4.3. Determinación experimental del Módulo de Elasticidad (E)	120
4.3.1 Módulo de Elasticidad Inicial	123
4.3.1.1 Muestra P1	124
4.3.1.2 Modelos matematicos obtenidos para determinar el Módulo de Elasticidad Inicial	126
4.3.1.2.1 Resultados de los modelos obtenidos para determinar el Módulo de Elasticidad Inicial para Arcillas	126
4.3.1.2.2 Modelos matemáticos obtenidos para determinar el Módulo Elástico Inicial de Arcillas	132
4.3.1.2.3 Modelos matemáticos obtenidos para determinar el Módulo Elástico Inicial para Limos	135
4.3.1.2.4 Resumen de resultados modelos matematicos para determinar el Modulo Elastico Inicial para Limos	139
4.3.2 Módulo Elástico Secante	140
4.3.2.1 Módulo Elástico Secante para Arcillas	141
4.3.2.1.1 Muestra P1	141
4.3.2.1.2 Muestra P2.....	144
4.3.2.1.3 Muestra P3	144
4.3.2.1.4 Muestra P4.....	145
4.3.2.1.5 Muestra P5	145

4.3.2.1.6 Muestra P6	146
4.3.2.1.7 Muestra P7	146
4.3.2.1.8 Muestra P11.....	147
4.3.2.1.9 Muestra P12.....	147
4.3.2.1.10 Muestra P16.....	148
4.3.2.1.11 Muestra P17	148
4.3.2.1.12 Muestra P23.....	149
4.3.2.1.13 Muestra P24	149
4.3.2.2 Módulo Elástico Secante para Limos	150
4.3.2.2.1 Muestra P8	150
4.3.2.2.2 Muestra P9	150
4.3.2.2.3 Muestra P10.....	151
4.3.2.2.4 Muestra P13.....	151
4.3.2.2.5 Muestra P14.....	152
4.3.2.2.6 Muestra P15	152
4.3.2.2.7 Muestra P18.....	153
4.3.2.2.8 Muestra P21	153
4.3.2.2.9 Muestra P22	154
4.3.2.2.10 Muestra P26	154
4.3.2.2.11 Muestra P30	155

4.3.2.3 Modelos matemáticos obtenidos para determinar el Módulo de Elasticidad Secante para Arcillas	155
4.3.2.4 Modelos matemáticos obtenidos para determinar el Módulo de Elasticidad Secante para los limos	158
4.4 Modelos constitutivos	158
4.4.1 Modelo de Mohr-Coulomb	159
4.4.2 Modelo de Cam-Clay	161
4.4.1 Modelo constitutivo no lineal	164
4.4.1.1 Modelo Constitutivo para Arcillas	166
4.4.1.2 Resumen de factores a y b para Arcillas	167
4.4.1.3 Modelo Costitutivo generado para Arcillas	168
4.4.2 Modelo Constitutivo para Limos	168
4.4.2.1 Resumen de factores a y b para Limos	169
4.4.2.2 Modelo Constitutivo generado para Limos	170
4.5 Correlaciones adicionales	172

**CAPÍTULO V
CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTURAS
INVESTIGACIONES**

5.1 CONCLUSIONES	174
5.2 RECOMENDACIONES	175
5.3 FUTURAS INVESTIGACIONES	176

BIBLIOGRAFÍA 177

ÍNDICE DE TABLAS

N°		Pág.
Tabla		
1	Valores teóricos de B a saturación completa	35
2	Valores principales de parámetros de la prueba Triaxial (TS) con el esquema UU y la prueba Corte Directo (DS)	52
3	Valores principales de parámetros de la prueba Triaxial (TS) con el esquema CU y la prueba Corte Directo (DS)	53
4	Principales valores de los parámetros del esquema CU y la prueba DS en el caso de esfuerzo efectivo	54
5	Coordenadas de los puntos de muestreo	77
6	Caracterización a 1m	85
7	Caracterización a 2m	86
8	Caracterización a 3m	87
9	Planilla datos del ensayo de corte directo	89
10	Planilla de resultados del ensayo de corte directo	90
11	Planilla $\tau - \sigma$	91
12	Resumen de resultados de Corte Directo	93
13	Datos del ensayo triaxial	94
14	Resultados del ensayo triaxial espécimen 1	95
15	Esfuerzo normal (σ) y cortante (τ)	97

16	Resumen de resultados del ensayo Triaxial	99
17	Resumen de resultados del ensayo Triaxial	101
18	Resumen general de estadísticos a la profundidad de 1m	104
19	Comparación de Resultados de Corte Directo y Triaxial	108
20	Resumen de estadísticos de Arcillas a la profundidad de 1m	109
21	Resumen de estadísticos de limos a la profundidad de 1m	110
22	Resumen general de estadísticos a la profundidad de 2m	111
23	Resumen de estadísticos de Arcillas a la profundidad de 2m	112
24	Resumen general de estadísticos a la profundidad de 3m	113
25	Resumen de modelos de plasticidad	119
26	Modelos matemáticos y módulo de elasticidad inicial E para arcillas	126
27	Módulo de elasticidad inicial E en función de la presión de confinamiento σ_3	133
28	Modelos matemáticos y módulo de elasticidad inicial E para limos ...	135
29	Módulo de elasticidad inicial E en función de la presión de confinamiento σ_3	139
30	Módulo de elasticidad secante E para arcillas muestra P1	143
31	Módulo de elasticidad secante E para arcillas muestra P2	144
32	Módulo de elasticidad secante E para arcillas muestra P3	144
33	Módulo de elasticidad secante E para arcillas muestra P4	145

34	Módulo de elasticidad secante E para arcillas muestra P5	145
35	Módulo de elasticidad secante E para arcillas muestra P6	146
36	Módulo de elasticidad secante E para arcillas muestra P7	146
37	Módulo de elasticidad secante E para arcillas muestra P11	147
38	Módulo de elasticidad secante E para arcillas muestra P12	147
39	Módulo de elasticidad secante E para arcillas muestra P16	148
40	Módulo de elasticidad secante E para arcillas muestra P17	148
41	Módulo de elasticidad secante E para arcillas muestra P23	149
42	Módulo de elasticidad secante E para arcillas muestra P24	149
43	Módulo de elasticidad secante E para arcillas muestra P8	150
44	Módulo de elasticidad secante E para arcillas muestra P9	150
45	Módulo de elasticidad secante E para arcillas muestra P10	151
46	Módulo de elasticidad secante E para arcillas muestra P13	151
47	Módulo de elasticidad secante E para arcillas muestra P14	152
48	Módulo de elasticidad secante E para arcillas muestra P15	152
49	Módulo de elasticidad secante E para arcillas muestra P18	153
50	Módulo de elasticidad secante E para arcillas muestra P21	153
51	Módulo de elasticidad secante E para arcillas muestra P22	154
52	Módulo de elasticidad secante E para arcillas muestra P26	154
53	Módulo de elasticidad secante E para arcillas muestra P30	155

54	Modelos obtenidos para determinar el Módulo de Elasticidad Secante de arcillas	156
55	Modelos obtenidos para determinar el Módulo de Elasticidad Secante de limos	158
56	Modelos constitutivos para determinar σ_d en arcillas	166
57	Factores a y b para determinar σ_d en arcillas	167
58	Modelos constitutivos para determinar σ_d en limos	169
59	Factores a y b para determinar σ_d en limos	170

ÍNDICE DE FIGURAS

N° Fig.		Pág.
1	Banco barrio San Blas	5
2	Envolvente de falla de Mohr y criterio de rotura de Mohr-Coulomb ..	14
3	Inclinación del plano de falla en el suelo con respecto al plano principal mayor	17
4	Diagrama de un arreglo de prueba de corte directo	20
5	Equipo de prueba de corte directo UAJMS	21
6	Gráfica del esfuerzo cortante y el cambio en la altura de la muestra frente al desplazamiento cortante para arena seca suelta y densa (prueba de corte directo)	23
7	Determinación de los ángulos de fricción máximos y últimos a partir de ensayos de corte directo	25
8	Interfaz de un material de cimentación y el suelo	27
9	Naturaleza curvilínea de la envolvente de falla de Mohr en arena	28
10	Diagrama de un equipo de prueba triaxial	32
11	Prueba triaxial consolidad-drenada	34
12	Prueba triaxial consolidada-drenada	36
13	Falla de una muestra durante una prueba triaxial consolidada-drenada	37
14	Esfuerzo efectivo de la envolvente de falla a partir de pruebas de drenaje en arena y arcilla normalmente consolidada	38

15	Esfuerzo efectivo de la envolvente de falla para arcilla sobreconsolidada	39
16	Variación de $\text{sen } \phi'$ con el índice de plasticidad (IP) para algunas arcillas normalmente consolidadas	40
17	Variación Prueba consolidada-no drenada	42
18	Esfuerzos total y efectivo en la envolvente de falla para pruebas triaxiales con consolidación y no drenada	44
19	Esfuerzo total de la envolvente de falla obtenido a partir de pruebas con consolidación y no drenada en arcilla sobreconsolidada	46
20	Círculos de Mohr para el esfuerzo total y la envolvente de falla ($\phi=0$) obtenidos a partir de pruebas triaxiales sin consolidación y no drenada	48
21	El concepto $\phi=0$	50
22	Resultados de la prueba de corte directo CD y prueba triaxial CU en especímenes remoldeados de Colorado	55
23	Resultados de la prueba de corte directo CD y prueba triaxial CU en especímenes remoldeados de Nova	56
24	Resultados de la prueba de corte directo CD y prueba triaxial CU en especímenes remoldeados de VBC	56
25	Valle Central de Tarija	72
26	Mapa geológico de Tarija	75
27	Zona de estudio	76
28	Máquina de corte directo, MODELO 27-WF2060 Digishear	80
29	Equipo triaxial, CONTROLS	81
30	Especímenes ensayados por corte directo	88

31	Esfuerzo – deformación por corte	91
32	Determinación de cohesión y fricción de la muestra de suelo	92
33	Esfuerzo – deformación por triaxial	96
34	Círculos de Mohr y Envolvente de Falla	98
35	Ubicación de los suelos en la carta de plasticidad a 1m	115
36	Ubicación de las arcillas en la carta de plasticidad a 1m	116
37	Ubicación de los limos en la carta de plasticidad a 1m	117
38	Ubicación de los suelos en la carta de plasticidad a 2m	118
39	Ubicación de los suelos a 3m de profundidad en la carta de plasticidad	119
40	Esfuerzo vs deformación para la muestra P1	124
41	Modulo de elasticidad secante para la muestra P1	142