

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



**“ANÁLISIS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELO – CAL CORRELACIONANDO
EL ENSAYO TRIAXIAL (U.U.) CON EL ENSAYO C.B.R.”**

Por:

DERY ARMANDO LAIME ROJAS

SEMESTRE - I - 2020

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 ESTABILIZACIÓN DE SUELO – CAL CORRELACIONANDO
EL ENSAYO TRIAXIAL (U.U.) CON EL ENSAYO C.B.R.”**

Por:

DERY ARMANDO LAIME ROJAS

SEMESTRE - I - 2020

TARIJA-BOLIVIA

.....
M.Sc. Ing. Ernesto R. Álvarez Gozávez

DECANO
FACULTAD DE CIENCIAS Y
TECNOLOGÍA

.....
M.Sc. Lic. Elizabeth Castro Figueroa

VICEDECANA
FACULTAD DE CIENCIAS Y
TECNOLOGÍA

TRIBUNAL:

.....
Ing. Marcelo Segovia Cortez

.....
Ing. Laura Karina Soto Salgado

.....
Ing. Marcelo Humberto Pacheco Nuñez

DEDICATORIAS

El presente proyecto de investigación lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darme la fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados de mi vida.

A mi madre; Máxima Rojas Rojas sé que siempre estás conmigo, aunque no continúes en este mundo, siento tu presencia desde el cielo.

A mi hna; Vanesa Laime por ser principalmente promotor de mi sueño, por todo el apoyo incondicional, por confiar y creer en mí, por la paciencia y siempre motivarme.

A mi padre; Gregorio Laime por su apoyo incondicional y sobre todo sus oraciones.

A mis hermanos:

Marta Laime por haber sido como una madre con nosotros, siempre tendré presente tu gran apoyo.

Saúl Laime por su apoyo, sus consejos y sobre todo sus oraciones.

Silvia Laime por su apoyo, paciencia y amor

Misael Laime por darme fuerzas en los momentos más difíciles y sobre todo sus oraciones.

Kevin, Soledad, Alex Laime por su apoyo incondicional.

A mis cuñados; Hugo, Raquel, Noemí, Humberto, Juan y Wilfredo.

A mi sobrinos; Fany, Enzo, Kenia, Cristian, Ticiano, Asbel, Cesia, Nayely, Caleb y Gael.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme salud y sobre todo el cariño incondicional de mis seres queridos.

Al Ing. Rene Alfredo García Valda

Por guiarme en todo el proceso de mi investigación su colaboración, enseñanzas en el mundo de la geotecnia y mostrarme los amplios conocimientos en la mecánica de suelos.

A mis amigos: Alex Puma, Oscar Cayani, Ariel Paco, Roger Marza, Ptor. Cleiver Calapiña, Iván Mamani, Sergio Huanca, Juan Mamani, Brayan Avendaño, Naty Morales, Madelen Rous, Adolfo Colodro, José Navarro, Anabel Bejarano, Linder Cardozo, Scarlet Barrientos, Delina Tintilay, Silvina Gallardo, Madelens Pereira y Cesia Mamani.

Josué 1:9

*Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente;
no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios estará
contigo en donde quiera que vayas.*

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

	Página
1.1. Introducción.....	20
1.2. Antecedentes.....	21
1.3. Justificación.....	22
1.4. Situación problemática.....	23
1.4.1. Problema.....	23
1.5. Objetivos	23
1.5.1. Objetivos generales.....	23
1.5.2. Objetivos específicos.....	24
1.6. Hipótesis.....	24
1.6.1. Identificación de variables.....	24
1.6.2. Conceptualización de variables.....	25
1.6.3. Operacionalización de variables.....	25
1.7. Tipo de investigación.....	26
1.7.1. Población y muestra.....	26
1.7.1.1. Población.....	26
1.7.1.2. Muestra.....	26
1.8. Alcance.....	26

CAPÍTULO II

PROPIEDADES DE LAS ARCILLAS, ESTABILIZACIÓN Y ENSAYO TRIAXIAL

	Página
2.1. Generalidades.....	29
2.2. Marco conceptual y referencial.....	29
2.2.1. Suelos.....	30

2.2.1.1. Tipos de suelo.....	30
2.2.1.1.1.Suelos residuales.....	30
2.2.1.1.2.Suelos transportados.....	30
2.2.1.2. Tamaño de las partículas.....	31
2.2.1.3. Arcillas.....	32
2.2.1.4. Propiedades físico-químicos.....	32
2.2.1.5. Composición de suelos.....	32
2.2.2. Estabilización de suelos	33
2.2.2.1. La cal.....	34
2.2.2.2. Estabilización química.....	35
2.2.2.3. Proceso de aplicación.....	35
2.2.2.4. Ventajas de estabilizacion suelos con cal.....	36
2.2.2.5. Estabilización de suelos con cal en la ciudad de Tarija.....	36
2.2.2.6. Lineamientos para la estabilización de suelos con cal.....	37
2.2.3. Criterios de falla Mohr-Coulomb.....	38
2.2.4. Prueba triaxial.....	40
2.2.4.1. Objetivo de las pruebas triaxiales.....	41
2.2.4.2. Concepto del ensayo triaxial.....	42
2.2.4.3. Resistencia cortante de suelos.....	43
2.2.4.4. Esfuerzo efectivo.....	43
2.2.4.5. Parámetros de resistencia cortante	44
2.2.4.6. Ángulo de fricción.....	44
2.2.4.7. Prueba rápida - Prueba sin consolidación y sin drenaje (UU).....	45
2.2.4.8. Resultado de suelos cohesivos del ensayo triaxial UU Lima – Perú.....	48
2.2.4.9. Metodología del ensayo triaxial (UU).....	50
2.2.4.10. Ventajas y limitaciones del triaxial.....	52

2.2.4.11. Sensibilidad del equipo triaxial (UU).....	53
2.2.4.12. Mediciones que se puede realizar en el triaxial.....	54
2.2.4.13. Descripción del equipo triaxial.....	54
2.2.5. Capacidad soporte del CBR..	55
2.2.5.1. Objetivos del CBR.....	55
2.2.6. Principales tipos de suelos	55
2.2.7. Granulometría de suelos.....	55
2.2.7.1. Objetivo de granulometría.....	56
2.2.8. Límites de Atterberg – plasticidad	56
2.2.8.1. Material elástico.....	56
2.2.8.2. Material plástico.....	57
2.2.8.3. Suelos.....	57
2.2.8.4. Suelos cohesivos y no cohesivos.....	57
2.2.8.5. Límite líquido.....	57
2.2.8.6. Limite plástico.....	58
2.2.9. Compactación estándar y modificada.....	58
2.2.9.1. Objetivo de la compactación.....	59
2.3. Marco normativo.....	60

CAPÍTULO III

CARACTERIZACIÓN DE LAS ARCILLAS

	Página
3.1. Ubicación de las zonas de extracción.....	62
3.1.1. Coordenadas geográficas y UTM de las zonas de extracción de muestras.....	62
3.2. Criterios de muestreo	69
3.2.1. Selección de la técnica de muestreo.....	69
3.2.2. Tamaño de muestra.....	69

3.2.3. Datos para el cálculo del tamaño de muestra.....	69
3.2.4. Números de ensayos.....	69
3.3. Caracterización del suelo	70
3.3.1. Desarrollo o diseño.....	70
3.3.2. Exploración de suelo y técnicas de muestreo.....	70
3.3.3. Determinación de los límites de Atterberg.....	73
3.3.4. Granulometría de suelos por método lavado.....	79
3.3.5. Clasificación de suelos AASHTO M 145-91 y ASTM D 2487.....	83
3.3.6. Compactación Proctor modificado (ASTM D-1557 y AASHTO T-180).....	89

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA, ANÁLISIS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL Y ENSAYO TRIAXIAL

	Página
4.1. Capacidad soporte del C.B.R.	98
4.2. El ensayo triaxial (UU).	104
4.3. Selección de la agente estabilizante.....	116
4.4. Criterios para la dosificación de la mezcla suelo-cal.....	119
4.5. Ensayo compactación en mezcla de suelo-cal al 5%	121
4.6. Ensayo CBR en mezcla suelo-cal al 5%	121
4.7. Análisis de de resultados y comparación de la estabilización de suelos.....	121
4.8. Formas de aplicación de la estabilizacion de suelos con cal.....	122
4.9. Resumen de la cohesión del ensayo triaxial (U.U.) y el CBR	123
4.10. Gráficas de correlación ensayo cohesión vs CBR.....	124
4.10.1. Gráficas de correlación ensayo cohesión vs CBR de suelos estabilizados.....	125
4.11. Análisis del resultados.....	127
4.11.1. Análisis estadístico de la cohesión y CBR.....	127

4.11.2. Análisis comparativo del triaxial con bibliografía existente.....	128
4.12. Aporte académico.....	131
4.13. Validación de modelos propuestos	132

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

	Página
5.1. Conclusiones	135
5.2. Recomendaciones.....	136

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ANEXO I Contenido de humedad

ANEXO II Límites de Atterberg

ANEXO III Granulometría de suelos

ANEXO IV Compactación Proctor T-180

ANEXO V California Bearing Ratio (CBR)

ANEXO VI Triaxial (U.U.)

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1 Operacionalización de la variable independiente.....	25
Tabla 2 Operacionalización de la variable dependiente.....	26
Tabla 3 Resumen estabilización de suelos con cal.....	37
Tabla 4 Resumen de los cálculos de esfuerzos desviador.....	49
Tabla 5 Especificaciones técnicas del ensayo triaxial (UU).....	53
Tabla 6 Marco normativo.....	60
Tabla 7 Coordenadas geográficas y UTM de los diez puntos de suelos de Tarija.....	63
Tabla 8 Datos para el cálculo del tamaño de muestra.....	69
Tabla 9 Número de ensayos realizados en el presente proyecto.....	69
Tabla 10 Límite líquido de la muestra Nueva Terminal.....	76
Tabla 11 Límite plástico de la muestra Nueva Terminal.....	78
Tabla 12 Resumen resultados de límites.....	78
Tabla 13 Análisis de tamices de la muestra Nueva Terminal.....	81
Tabla 14 Resumen resultados de granulometría de suelos.....	82
Tabla 15 AASHTO.....	84
Tabla 16 SUCS.....	86
Tabla 17 Clasificación resumen de la muestra Nueva Terminal.....	87
Tabla 18 Resumen de clasificación de suelos por método de SUCS.....	89
Tabla 19 Ensayo compactación de la muestra Nueva Terminal.....	93
Tabla 20 Resumen de compactación T-180.....	94
Tabla 21 Contenido de humedad de la muestra Nueva Terminal.....	95
Tabla 22 Resumen de contenido de humedad de suelos.....	96
Tabla 23 Contenido de humedad y peso unitario de la muestra Nueva Terminal.....	98
Tabla 24 Expansión de la muestra Nueva Terminal.....	100
Tabla 25 Resistencia a la penetración de la muestra Nueva Terminal.....	100
Tabla 26 Resumen resultado del ensayo CBR.....	102
Tabla 27 Resumen resultado de caracterización y ensayo CBR.....	103
Tabla 28 Peso específico húmedo y seco de la muestra Nueva Terminal.....	104
Tabla 29 Contenido de humedad de la muestra Nueva Terminal.....	77

Tabla 30 Deformación - esfuerzo axial de la muestra Nueva Terminal.....	109
Tabla 31 Circulo de Mohr de la muestra Nueva Terminal.....	104
Tabla 32 Triaxial U.U. (no drenado, no consolidado), con 12 golpes.....	117
Tabla 33 Triaxial U.U. (no drenado, no consolidado), con 25 golpes.....	117
Tabla 34 Triaxial U.U. (no drenado, no consolidado), con 56 golpes.....	117
Tabla 35 Triaxial U.U. (no drenado, no consolidado), estabilizado con 12 golpes.....	118
Tabla 36 Triaxial U.U. (no drenado, no consolidado), estabilizado con 25 golpes.....	118
Tabla 37 Triaxial U.U. (no drenado, no consolidado), estabilizado con 56 golpes.....	118
Tabla 38 Resumen índice plasticidad y tamiz pasa 40.....	120
Tabla 39 Resumen de compactación de suelos estabilizados.....	121
Tabla 40 Ensayo CBR de suelos estabilizados.....	121
Tabla 41 Resumen de comparación de suelos estabilizados.....	121
Tabla 42 Resumen de cohesión del ensayo triaxial (UU) y el CBR.....	123
Tabla 43 Resumen de cohesión del ensayo triaxial (U.U.) y el CBR de suelos estabilizados con 5% de cal.....	123
Tabla 44 Análisis t student de la cohesión y el CBR a 12 golpes.....	127
Tabla 45 Análisis t student de la cohesión y el CBR a 25 golpes.....	127
Tabla 46 Análisis t student de la cohesión y el CBR a 56 golpes.....	128
Tabla 47 Comparación de esfuerzo desviador del triaxial a 56 golpes.....	128
Tabla 48 Aporte académico.....	131
Tabla 49 Aporte académico de suelos estabilizados.....	131
Tabla 50 Resumen de ensayos en laboratorio de la ciudad de Tarija.....	132
Tabla 51 Validación de modelos propuestos.....	133

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1 Origen y formación de los suelos.....	30
Figura 2 Estratigrafía de suelos transportados.....	31
Figura 3 Rango de tamaño de las partículas de un suelo.....	31
Figura 4 Composición de un suelo.....	33

Figura 5 Cal en diferentes tamaños.....	35
Figura 6 Porcentaje de cal recomendados para la estabilización de suelos.....	38
Figura 7 Envoltentes de la falla de Mohr.....	39
Figura 8 Ubicación de los esfuerzos en el círculo de esfuerzos de Mohr.....	
(a) Esfuerzos que actúan en el elemento. (b) Esfuerzos ubicados en el círculo.	40
Figura 9 Fuerzas surgidas por el contacto interparticular.....	43
Figura 10 Ilustración esquemática de un diagrama de Mohr con resultados de pruebas UU en suelos saturados.....	46
Figura 11 Ilustración esquemática de las resistencias del suelo parcialmente saturado obtenido de las pruebas UU	48
Figura 12 Gráfica deformación unitaria vs esfuerzo desviador (kgf/cm ²).....	50
Figura 13 a) Espécimen cilíndrico para la prueba triaxial y b) Esfuerzos aplicados al espécimen triaxial.....	50
Figura 14 Diagrama esquemático de un aparato triaxial.....	52
Figura 15 Descripción del equipo triaxial.....	54
Figura 16 Aparato Casagrande para determinar limite liquido	58
Figura 17 Ejemplo de límite plástico en laboratorio	58
Figura 18 Mapa de la provincia Cercado - Tarija	62
Figura 19 Curva de flujo de la muestra Nueva Terminal.....	76
Figura 20 Curva granulométrica de la muestra Nueva Terminal.....	82
Figura 21 Carta plasticidad AASHTO..	83
Figura 22 Clasificación por carta de plasticidad AASHTO muestra Nueva Terminal....	85
Figura 23 Clasificación por carta de plasticidad SUCS muestra Nueva Terminal.....	87
Figura 24 Carta de plasticidad SUCS	88
Figura 25 Curva de compactación de la muestra Nueva Terminal.....	93
Figura 26 Curva: Carga - penetración de la muestra Nueva Terminal.....	101
Figura 27 Curva: CBR - peso unitario de la muestra Nueva Terminal.....	101
Figura 28 Grafica esfuerzo vs deformación de la muestra Nueva Terminal.....	111
Figura 29 Círculo de Mohr	116
Figura 30 Porcentajes de cal recomendados para estabilización de suelos.....	119
Figura 31 Porcentajes de cal para estabilizar.....	120

Figura 32 Gráfica correlación cohesión vs CBR.....	124
Figura 33 Gráficas de correlación cohesión vs CBR de suelos estabilizados.....	125
Figura 34 Esfuerzo vs deformación.....	129
Figura 35 Análisis comparativo de círculo de Mohr.....	130

ÍNDICE DE FOTOGRAFIAS

	Página
Fotografía 1 Estabilización de suelos en laboratorio.....	34
Fotografía 2 Incertar 1.....	64
Fotografía 3 Incertar 2.....	64
Fotografía 4 Los Chapacos.....	65
Fotografía 5 Nueva Terminal 2.....	65
Fotografía 6 Nueva Terminal.....	66
Fotografía 7 Pampa Galana 2.....	66
Fotografía 8 Pampa Galana.....	67
Fotografía 9 San Blas 1.....	67
Fotografía 10 San Blas 2.....	68
Fotografía 11 San Salvador.....	68
Fotografía 12 Extracción de muestra zona Los Chapacos.....	71
Fotografía 17 Ensayo de limite plástico.....	77
Fotografía 18 Muestra para ensayo de granulometría método de lavado	80
Fotografía 19 Lavado de muestra.....	80
Fotografía 20 Secado, tamizado y pesado de muestra	81
Fotografía 21 Preparación de muestra para compactación T-180.....	90
Fotografía 22 Compactación de suelo T-180.....	91
Fotografía 23 Pesado de muestra más molde T-180	92
Fotografía 24 Prensa de CBR y moldes luego de ser sumergidos los cuatro días	102
Fotografía 25 Extracción de las muestras para el ensayo	104
Fotografía 26 preparación de la muestra para el ensayo	106
Fotografía 27 Muestra ya preparado para colocar la celda	107
Fotografía 28 Colocando presión de cámara en la celda.....	107

Fotografía 29 Colocando presión de cámara.....	108
Fotografía 30 Haciendo correr el ensayo triaxial (UU).	108
Fotografía 31 Resultados del ensayo triaxial (UU).....	109
Fotografía 32 Muestra aplicada esfuerzo cortante donde se puede observar la falla.....	113
Fotografía 33 Muestras observando la falla	113

