

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



**“COMPARACIÓN DE PERMEABILIDAD EN SUELO ARCILLOSO
ANTES Y DESPUÉS DE SER ESTABILIZADO CON CAL”**

Por:

ARIEL PACO CÁCERES

SEMESTRE II, GESTIÓN 2019

TARIJA-BOLIVIA

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

**“COMPARACIÓN DE PERMEABILIDAD EN SUELO ARCILLOSO
ANTES Y DESPUÉS DE SER ESTABILIZADO CON CAL”**

Por:

ARIEL PACO CÁCERES

SEMESTRE II, GESTIÓN 2019

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. Luis Alberto Yurquina Flores

.....
Ing. Trinidad Baldiviezo Montalvo

.....
Ing. José Ricardo Arce Avendaño

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; Santiago Paco Córdoba y Leandra Cáceres Zegarra, por todo su apoyo y el sacrificio que hicieron para que pudiera concluir con mis estudios, además de ser ejemplos de superación y perseverancia en la vida.

A todos mis hermanos y hermanas; Emiliana, Benita, Elva, Iber, Roxana y Ediberto Paco Cáceres, que siempre estuvieron ahí para aconsejarme y apoyarme incondicionalmente en los momentos difíciles.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios por guiar mis pasos, cuidarme, protegerme y darme salud para poder concluir esta primera meta, a mis padres por todo el apoyo moral e incondicional para poder concluir mis estudios, a mis hermanos y hermanas por todos los consejos de vida.

A los ingenieros de la carrera de Ingeniería Civil por brindarme sus conocimientos, al Ing. Sergio Mendoza del laboratorio de Química por ayudarme con algunos ensayos para este proyecto.

A mis amigos de la U.A.J.M.S. por todo su apoyo y colaboración, gracias por su amistad y darme momentos inolvidables en la universidad.

PENSAMIENTO

“Si lo puedes soñar, lo puedes hacer”

Walt Disney

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN AL DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

	Pág.
1.1. Justificación.....	1
1.2. Situación problemática.....	2
1.2.1 Conceptualización puntual del objeto de estudio.....	2
1.2.2 Descripción del fenómeno ocurrido.....	2
1.2.3 Breve explicación de la perspectiva de solución.....	2
1.2.4 Problema.....	3
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.4 Hipótesis.....	3
1.4.1 Identificación de variables.....	3
1.4.1.1 Variable independiente.....	4
1.4.1.2 Variable dependiente.....	4
1.4.2 Conceptualización de variables.....	4
1.4.2.1 Cantidad cal.....	4
1.4.2.2 Permeabilidad.....	4
1.4.3 Operacionalización.....	4
1.5 Tipo de investigación.....	5
1.5.1 Unidad de muestro.....	5
1.5.2 Población y muestra.....	5
1.5.2.1 Población.....	6
1.5.2.2 Muestra.....	6

1.6	Alcance.....	6
-----	--------------	---

CAPÍTULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO SOBRE PERMEABILIDAD

		Pág.
2.1	Generalidades.....	8
2.2	Marco conceptual.....	8
2.2.1	Suelos.....	8
2.2.2	Tipos de suelo.....	9
2.2.3	Suelos residuales.....	9
2.2.4	Suelos transportados.....	9
2.2.5	Tamaño de las partículas.....	9
2.2.6	Arcillas.....	10
2.2.6.1	Estructura de los filosilicatos.....	10
2.2.6.2	Propiedades físico-químicos.....	11
2.2.6.2.1	Superficie específica.....	12
2.2.6.2.2	Capacidad de intercambio iónico.....	12
2.2.6.2.3	Capacidad de absorción.....	13
2.2.6.2.4	Hidratación e hinchamiento.....	13
2.2.6.2.5	Plasticidad.....	14
2.2.7	Composición de suelos.....	14
2.2.8	Clasificación de suelos.....	15
2.2.8.1	Clasificación en base a norma AASHTO.....	15
2.2.8.2	Clasificación de suelos SUCS ASTM D 2487-00.....	18
2.2.9	Caracterización de los suelos.....	22
2.2.9.1	Parámetros de naturaleza.....	22

2.2.9.1.1	Variación volumétrica	23
2.2.9.1.2	Permeabilidad.....	23
2.2.9.1.3	Granulometría.....	23
2.2.9.1.4	Plasticidad	23
2.2.9.1.5	Límites de Atterberg.....	23
2.2.9.1.6	Índice de plasticidad (IP).....	25
2.2.9.2	Parámetros de estado del suelo.....	25
2.2.9.2.1	Resistencia mecánica.....	25
2.2.9.2.2	Compactación.....	26
2.2.9.2.3	Capacidad portante (CBR)	26
2.2.10	Definición de la estabilidad de suelos	26
2.2.11	Estabilización suelo-cal.....	27
2.2.12	Tipo de suelos para estabilizar con cal.....	29
2.2.13	Definiciones de la cal	29
2.2.14	Propiedades de la cal	29
2.2.14.1	Propiedades físicas de la cal.....	30
2.2.14.2	Propiedades químicas de la cal.....	30
2.2.15	Cales utilizadas para la estabilización de suelos	30
2.2.15.1	Cales vivas.....	31
2.2.15.2	Cales hidratados	31
2.2.15.3	Cales en forma de lechada.....	31
2.2.16	Acción de la cal como estabilizante	31
2.2.17	Análisis de los materiales a utilizar en la estabilización	32
2.2.17.1	Cal	32
2.2.17.2	Agua	32

2.2.18	Mezcla suelo-cal.....	32
2.2.19	Propiedades de la mezcla suelo-cal.....	33
2.2.19.1	Resistencia.....	33
2.2.19.2	Plasticidad	33
2.2.20	Ventajas y desventajas de los diferentes métodos de aplicación de la cal	33
2.2.21	Permeabilidad en los suelos	34
2.2.21.1	Ley de Darcy y el coeficiente de permeabilidad	35
2.2.21.2	Factor que influye en la permeabilidad de los suelos.....	36
2.2.21.3	Permeabilidad en suelos estabilizados con cal.....	38
2.2.21.4	Métodos de medición de la permeabilidad.....	38
2.2.21.4.1	Ensayos de carga variable	39
2.3	Investigaciones relacionadas al tema de estudio	40
2.4	Marco normativo	41

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN

		Pág.
3.1	Introducción	43
3.2	Ubicación de las zonas de extracción.....	44
3.2.1	Coordenadas Geografías y UTM de las zonas de extracción de muestras para la caracterización del suelo.....	44
3.2.2	Mapa satelital de la zona de extracción de muestras de suelo	45
3.3	Criterios de muestreo	48
3.3.1	Selección de la técnica de muestreo.....	48
3.3.2	Tamaño de muestra	48
3.3.3	Datos para el cálculo del tamaño de muestra	48

3.3.4	Número de ensayos (suelo natural)	48
3.3.4.1	Número de ensayos (suelo-cal)	49
3.3.4.2	Tipo de suelo a ser sujeto a estudio (arcilla)	49
3.3.4.3	Porcentajes de cal	49
3.3.4.4	Total, de ensayos	50
3.3.5	Cálculo del tamaño de la muestra	50
3.4	Caracterización del suelo	51
3.4.1	Desarrollo o diseño.....	51
3.4.2	Procedimiento a seguir para el análisis del suelo, previo y posterior a su estabilización.....	51
3.4.3	Exploración de suelo y técnicas de muestreo (Normas ASTM D4220 y AASHTO T248).....	51
3.4.4	Determinación de los límites de Atterberg.....	53
3.4.4.1	Límite líquido.....	55
3.4.4.2	Límite plástico.....	56
3.4.4.3	Índice de plasticidad.....	57
3.4.5	Material más fino que pasa el tamiz N° 200 en agregado mineral por lavado ASTM D4222 y AASHTO T88.....	58
3.4.6	Clasificación de suelos AASHTO M 145-91 Y ASTM D 2487	60
3.4.6.1	Clasificación de suelos por método AASHTO M 145-91(2000).....	60
3.4.6.2	Clasificación de suelos por el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) ASTM D 2487	62
3.5	Selección de la muestra para realizar la estabilización	63
3.5.1	Determinación de la gravedad específica de los sólidos ASTM D 854-02...63	
3.5.2	Determinación del tamaño de las partículas por ensayo de hidrometría ASTM 422-63	68

3.5.3	Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de los suelos y rocas a través de su masa ASTM D 2216-03	72
3.5.4	Compactación AASHTO T 99-03	74
3.6	Caracterización de la cal	81
3.6.1	Pruebas para la caracterización física y química de la cal hidratada.....	81
3.6.2	Resultados de la caracterización física y química de la cal.....	82

CAPÍTULO IV

APLICACIÓN CÁLCULO Y DISEÑO

	Pág.	
4.1	Coeficiente de permeabilidad – método de cabeza variable	84
4.2	Selección del agente estabilizante	91
4.3	Criterios para la dosificación de la mezcla suelo-cal	94
4.4	Métodos para la estimación del % óptimo de cal para la estabilización	94
4.4.1	Método usando el pH, para estimar la proporción suelo-cal requerida, para la estabilización de suelos ASTM D 6276-03	94
4.4.2	Proceso alternativo utilizando los límites de Atterberg para seleccionar el porcentaje óptimo de cal	99
4.5	Elaboración de especímenes y pruebas para la muestra suelo-cal	100
4.5.1	Límites de Atterberg.....	100
4.5.2	Granulometría de la muestra suelo-cal método de lavado	102
4.5.3	Determinación de la gravedad específica de los sólidos	103
4.5.4	Determinación del tamaño de las partículas por hidrometría.....	104
4.5.5	Clasificación de la mezcla suelo-cal	105
4.5.5.1	Clasificación AASHTO M-145.....	105
4.5.5.2	Clasificación ASTM D2487-00 (SUCS).....	105
4.5.6	Determinación de la relación humedad-densidad de la mezcla suelo-cal ...	106

4.5.7	Ensayo de permeabilidad en mezcla suelo-cal.....	107
4.6	Análisis de resultados.....	109
4.6.1	Análisis estadístico.....	110
4.6.1.1	Tratamiento estadístico descriptivo.....	110
4.6.1.2	Tratamiento estadístico inferencial	110
4.7	Formas de aplicación.....	112
5.1	Conclusiones	114
5.2	Recomendaciones.....	115

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 Estimación de la cantidad óptima de cal

ANEXO IX Permeabilidad

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. 1 Operacionalización de la variable independiente.....	4
Tabla 1. 2 Operacionalización de la variable dependiente.....	4
Tabla 1. 3 Unidad de muestreo	5
Tabla 1. 4 Tamaño de Población.....	6
Tabla 1. 5 Tamaño de muestra	6
Tabla 2. 1 Clasificación de suelos según AASTHO M-145	18
Tabla 2. 2 Carta de plasticidad.....	20
Tabla 2. 3 Clasificación de suelos ASTM D-2487	21
Tabla 2. 4 Simbología de suelos ASTM-2487	22
Tabla 2. 5 Relación de clasificación AASTHO-SUCS.....	22
Tabla 2. 6 Coeficiente de permeabilidad para diferentes tipos de suelo.....	35
Tabla 2. 7 Intervalos de valores de “k” Permeabilidad.....	35
Tabla 2. 8 Investigaciones relacionadas al tema de estudio.....	41
Tabla 2. 9 Marco normativo.....	42
Tabla 3. 1 Coordenadas Geográficas y UTM.....	45
Tabla 3. 2 Datos para el cálculo del tamaño de muestra.....	48
Tabla 3. 3 Número de ensayos suelo natural.....	48
Tabla 3. 4 Número de ensayos suelo-cal.....	49
Tabla 3. 5 Tipo de suelo a usar	49
Tabla 3. 6 Porcentaje de cal	49
Tabla 3. 7 Total de ensayos.....	50
Tabla 3. 8 Tamaño de muestra	50
Tabla 3. 9 Tabla resumen de límites de Atterberg	58
Tabla 3. 10 Tabla resumen de granulometría método de lavado (suelo natural)	60
Tabla 3. 11 Ejemplo de clasificación de suelos método AASHTO	61
Tabla 3. 12 Ejemplo de clasificación de suelos método SUCS	62
Tabla 3. 13 Tabla resumen de clasificación de suelos	63
Tabla 3. 14 Calibración de frasco volumétrico	65
Tabla 3. 15 Tabla de peso específico para diferentes suelos.....	66

Tabla 3. 16	Tabla resumen de gravedad específica de los sólidos.....	68
Tabla 3. 17	Tabla resumen de ensayo de hidrómetro.....	72
Tabla 3. 18	Tabla resumen de contenido de humedad.....	74
Tabla 3. 19	Tabla resumen de compactación T-99	80
Tabla 3. 20	Norma para la caracterización física y química de la cal.....	81
Tabla 3. 21	Característica física y química de la cal.....	82
Tabla 3. 22	Análisis granulométrico de la cal.....	83
Tabla 4. 1	Tabla resumen de permeabilidad (suelo natural)	89
Tabla 4. 2	Tabla resumen de tabla permeabilidad (saturación convencional)	90
Tabla 4. 3	Selección del estabilizante	92
Tabla 4. 4	Selección de estabilizante según el tipo de suelo.....	93
Tabla 4. 5	Estimación del % óptimo de cal para la mezcla suelo-cal	98
Tabla 4. 6	Tabla resumen de estimación de % óptimo de cal mediante límites Atterberg.....	99
Tabla 4. 7	Tabla resumen de límites de Atterberg (suelo-natural).....	101
Tabla 4. 8	Granulometría de suelo método de lavado (suelo-cal).....	103
Tabla 4. 9	Tabla resumen de gravedad específica de sólidos (suelo natural)	104
Tabla 4. 10	Cuadro resumen de hidrometría.....	104
Tabla 4. 11	Tabla resumen de clasificación de suelos (suelo-cal)	105
Tabla 4. 12	Ensayo de compactación (suelo-cal).....	106
Tabla 4. 13	Tabla resumen de permeabilidad (suelo-cal)	107
Tabla 4. 14	Tabla resumen de ensayos realizados	108
Tabla 4. 15	Tabla resumen de resultados	109
Tabla 4. 16	Tendencias centrales del análisis estadístico	110
Tabla 4. 17	Dispersión de datos dela análisis estadístico.....	110

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2. 1 Origen y formación de los suelos	8
Figura 2. 2 Estratigrafía de suelos transportados	9
Figura 2. 3 Rango de tamaños de partículas de un suelo	10
Figura 2. 4 Composición de un suelo.....	15
Figura 2. 5 Estabilización suelo-cal	29
Figura 2. 6 Permeámetro de carga variable.....	40
Figura 3. 1 Mapa de la provincia Cercado Tarija.....	44
Figura 3. 2 Mapa satelital zona de Los Chapacos.....	45
Figura 3. 3 Mapa satelital zona Carretera a Sella.....	46
Figura 3. 4 Mapa satelital del Mercado Mayorista del sur.....	46
Figura 3. 5 Mapa satelital zona INCERTAR	47
Figura 3. 6 Mapa satelital zona Moto Méndez.....	47

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 3. 1 Extracción de muestra zona Moto Méndez	52
Fotografía 3. 2 Extracción de muestra zona Los Chapacos y carretera a Sella	53
Fotografía 3. 3 Preparación de muestra para el ensayo de limite liquido	54
Fotografía 3. 4 Equipo casa Grande y muestra de suelo para ensayo	55
Fotografía 3. 5 Equipo Casagrande más muestra.....	56
Fotografía 3. 6 Ensayo de limite plástico.....	57
Fotografía 3. 7 Muestra para ensayo de granulometría método de lavado	59
Fotografía 3. 8 Lavado de muestra.....	59
Fotografía 3. 9 Secado, pesado de muestra	60
Fotografía 3. 10 Calibración de frasco volumétrico.....	64
Fotografía 3. 11 Gravedad específica de los sólidos.....	66
Fotografía 3. 12 Preparación de muestra para ensayo de hidrómetro	69
Fotografía 3. 13 Probeta más muestra de suelo.....	70
Fotografía 3. 14 Preparación de muestra para ensayo de contenido de humedad.....	73
Fotografía 3. 15 Preparación de muestra para compactación T-99.....	77
Fotografía 3. 16 Muestra con 5 % de humedad para compactación	78
Fotografía 3. 17 Compactación de suelo T-99	79
Fotografía 3. 18 Pesado de muestra más molde T-99	79
Fotografía 4. 1 Saturación de muestras	84
Fotografía 4. 2 Expansión de suelo y suelo con cal	85
Fotografía 4. 3 Permeámetro más muestra de suelo	85
Fotografía 4. 4 Cambio de molde de la muestra para ensayo de permeabilidad.....	86
Fotografía 4. 5 Extracción de muestra con prensa hidráulica	86
Fotografía 4. 6 Muestra para el permeámetro	87
Fotografía 4. 7 Presentación de muestra y permeámetro	87
Fotografía 4. 8 Muestra de suelo dentro del permeámetro.....	88
Fotografía 4. 9 Sellado y saturado de muestra	88
Fotografía 4. 10 Pesado de muestra de suelo para ensayo de pH	96
Fotografía 4. 11 Pesado de cal para diferentes porcentajes	96

Fotografía 4. 12	Mesclado de suelo y cal a diferentes porcentajes	97
Fotografía 4. 13	Lectura del pH para mezcla suelo-cal	97
Fotografía 4. 14	Muestra de suelo más 4% de cal para ensayo de límites	100
Fotografía 4. 15	Ensayo de límite líquido y límite plástico para muestra suelo-cal	101
Fotografía 4. 16	Muestra más 4% de cal par ensayo de granulometría método de lavado.....	102
Fotografía 4. 17	Tamizado de cal para ensayo de Peso específico	103