

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFÍA Y VÍAS DE
COMUNICACIÓN**



**“ANÁLISIS DE SUELOS ARCILLOSOS DE LA COMUNIDAD DE
CAÑON OCULTO ESTABILIZADOS CON HIDRÓXIDO DE
CALCIO Y CEMENTO”**

Por:

DAVID DARIO FLORES CHAVEZ

Proyecto presentado a consideración de la "UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO", como requisito para optar el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Civil.

Semestre II - 2023

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 SUELOS ARCILLOSOS DE LA COMUNIDAD DE
CAÑON OCULTO ESTABILIZADOS CON HIDRÓXIDO DE
CALCIO Y CEMENTO”**

Por:

DAVID DARIO FLORES CHAVEZ

Semestre II - 2023

TARIJA – BOLIVIA

DEDICATORIA:

A Dios, quien como guía estuvo presente en el caminar de mi vida, bendiciéndome y dándome fuerzas para continuar con mis metas trazadas sin desfallecer.

A mis padres Juan Carlos y Sara por ser los principales promotores de mis sueños, por confiar y creer en mis expectativas, por los consejos, valores y principios que nos han inculcado.

A mis hermanos Alvaro y Dariana por su cariño y apoyo incondicional que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.

A mi abuela Domitila por el amor que me has dado. Gracias por llevarme en tus oraciones porque estoy seguro que siempre lo haces.

A mi abuelo Marciano, quien, aunque no está físicamente presente, sus enseñanzas siguen guiándome día a día, te extraño profundamente y esta dedicatoria es mi pequeña forma de decirte que nunca te olvidaré.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

	Página
1.1 Antecedentes	1
1.2 Situación problemática	2
1.2.1 Problema	3
1.2.2 Relevancia y factibilidad del problema.....	3
1.2.3 Delimitación temporal	3
1.2.4 Delimitación espacial.....	3
1.3 Justificación de la investigación	3
1.4 Objetivos	4
1.4.1 Objetivo general.....	4
1.4.2 Objetivos específicos	4
1.5 Hipótesis	5
1.6 Identificación de variables	5
1.6.1 Variable independiente	5
1.6.2 Variable dependiente	5
1.6.3 Conceptualización y operacionalización de variables	5
1.7 Procesamiento de la información.....	6
1.8 Alcance de la investigación	7

CAPÍTULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO SOBRE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS

	Página
2.1 Suelo	9
2.1.1 Suelo en la ingeniería civil.....	10
2.1.2 Etapas y procesos en la formación del suelo	10
2.1.3 Factores de formación y evolución del suelo.....	11
2.2 Tipos de suelos.....	12
2.2.1 Gravavas	12
2.2.2 Arenas	13
2.2.3 Limos	13
2.2.4 Arcillas.....	13
2.3 Características mineralógicas de la arcilla	14
2.4 Propiedades físico químicas de las arcillas	17
2.4.1 Superficie específica	17
2.4.2 Capacidad de intercambio catiónico	17
2.4.3 Capacidad de absorción	18
2.4.4 Hidratación e hinchamiento	19
2.4.5 Plasticidad de las arcillas	20
2.4.6 Permeabilidad	21
2.5 Arcillas expansivas	21
2.6 Diferencias entre las arcillas y las arenas	22
2.7 Diferencias entre las arcillas y los limos.....	23
2.8 Arcillas en la ingeniería civil	24

2.9	Propiedades físicas y mecánicas de los suelos.....	25
2.9.1	Relaciones de volumen	25
2.9.1.1	Porosidad.....	25
2.9.1.2	Relación de vacíos	25
2.9.1.3	Grado de saturación	26
2.9.2	Relaciones de peso.....	26
2.9.2.1	Contenido de humedad	26
2.9.2.2	Peso unitario.....	26
2.9.3	Humedad natural.....	27
2.9.4	Granulometría del suelo.....	27
2.9.5	Plasticidad de los suelos.....	28
2.9.5.1	Límite líquido.....	28
2.9.5.2	Límite plástico	29
2.9.5.3	Límite de contracción	29
2.9.5.4	Índice de plasticidad	29
2.9.6	Clasificación de suelos.....	30
2.9.6.1	Sistema de clasificación AASHTO.....	30
2.9.6.2	Sistema unificado de clasificación de suelos SUCS	32
2.9.7	Compactación de suelos.....	34
2.9.7.1	Compactación Proctor estándar	34
2.9.7.2	Compactación Proctor modificado	34
2.9.8	Relación de soporte de California CBR.....	36
2.10	Subrasante.....	36
2.10.1	Caracterización de la subrasante.....	37
2.10.2	Propiedades de la subrasante	37

2.10.3	Requisitos para una Subrasante	38
2.11	Pavimento	38
2.11.1	Capa subrasante	38
2.11.2	Capa sub base.....	39
2.11.3	Capa base	39
2.11.4	Capa de rodadura	39
2.12	Estabilización de suelos	40
2.12.1	Criterio para establecer la estabilización de suelos.....	40
2.12.2	Métodos de estabilización de suelos	42
2.12.3	Estabilización mecánica.....	42
2.12.4	Estabilización física	42
2.12.4.1	Mezcla de suelos	42
2.12.4.2	Utilización de geotextiles.....	42
2.12.5	Estabilización química	43
2.12.6	Estabilización mixta.....	44
2.13	Ventajas de los suelos estabilizados	45
2.13.1	Ventajas técnicas.....	45
2.13.2	Ventajas económicas y ambientales.....	45
2.14	Estabilización del suelo con hidróxido de calcio y cemento	46
2.14.1	Cal.....	46
2.14.1.1	Cal viva (óxido de calcio).....	46
2.14.1.2	Cal hidratada (hidróxido de calcio).....	46
2.14.2	Ventajas e inconvenientes de las formas de presentación de la cal	47
2.14.3	Estabilización del suelo con cal	48
2.14.4	Aplicación de la cal hidratada (hidróxido de calcio)	50

2.14.5	Propiedades de los suelos estabilizados con cal	50
2.14.6	Cemento	51
2.14.7	Estabilización del suelo con cemento	52
2.14.8	Efectos de la incorporación del cemento	53
2.14.8.1	Mejora por modificación inmediata.....	53
2.14.8.2	Efectos a medio y largo plazo.....	54
2.14.9	Efectos de la adición conjunta de cal y cemento	55

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN

	Página	
3.1	Criterios metodológicos	56
3.1.1	Métodos.....	56
3.1.2	Técnicas	56
3.1.3	Unidad de estudio	56
3.1.4	Población.....	56
3.1.5	Muestra	56
3.1.6	Selección de la técnica de muestreo.....	56
3.2	Ubicación del proyecto	57
3.2.1	Características de la zona de estudio	57
3.2.2	Ubicación de la muestra.....	58
3.3	Justificación de la zona de estudio.....	59
3.4	Extracción de la muestra de suelo.....	60
3.5	Caracterización de los materiales estabilizantes	62
3.5.1	Hidróxido de calcio (cal hidratada).....	62
3.5.2	Cemento	63

3.6	Caracterización de suelos.....	64
3.6.1	Análisis granulométrico (ASTM D422; AASHTO T88).....	64
3.6.2	Límites de Atterberg	66
3.6.2.1	Límite líquido (ASTM D4318; AASHTO T89)	66
3.6.2.2	Límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D4318; AASHTO T90)	67
3.6.3	Contenido de humedad (ASTM D2216).....	68
3.6.4	Clasificación del suelo	69
3.6.5	Compactación (AASHTO T180; ASTM D1557).....	70
3.6.6	Relación de soporte de california CBR (ASTM D1883; AASHTO T193)	71
3.7	Estabilización suelo - hidróxido de calcio	73
3.7.1	Dosificación del hidróxido de calcio	73
3.7.2	Límites de Atterberg	73
3.7.3	Compactación	74
3.7.4	Relación de soporte de california CBR.....	76
3.8	Estabilización suelo - cemento.....	77
3.8.1	Dosificación del cemento.....	77
3.8.2	Límites de Atterberg	77
3.8.3	Compactación	78
3.8.4	Relación de soporte de california CBR.....	80
3.9	Estabilización suelo - hidróxido de calcio - cemento	81
3.9.1	Dosificación del hidróxido de calcio - cemento	81
3.9.2	Límites de Atterberg	82
3.9.3	Compactación	84
3.9.4	Relación de soporte de california CBR.....	88
3.10	Aplicación práctica	90

3.10.1	Justificación de la zona de aplicación.....	90
3.10.2	Determinación de los espesores por capa del pavimento.....	90
3.11	Análisis de precios unitarios	91
3.11.1	Costos directos	92
3.11.2	Costos indirectos.....	92
3.11.3	Precios unitarios de la estructura del pavimento.....	92

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

	Página	
4.1	Análisis de resultados de los suelos en estado natural.....	95
4.2	Análisis de la estabilización suelo - hidróxido de calcio	96
4.3	Análisis de la estabilización suelo - cemento	100
4.4	Análisis de la estabilización suelo - hidróxido de calcio - cemento	104
4.5	Tratamiento estadístico	111
4.6	Dosificación óptima	115

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

	Página	
5.1	Conclusiones.....	117
5.2	Recomendaciones	119

Bibliografía

Anexos

Anexo I: Análisis químico

Anexo II: Caracterización de suelos

Anexo III: Estabilización de suelos

Anexo IV: Espesores del pavimento

Anexo V: Análisis de precios unitarios

Anexo VI: Tabla de distribución t de Student

Anexo VII: Plano topográfico

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1.1 Operacionalización de variable independiente	5
Tabla 1.2 Operacionalización de variable dependiente.....	6
Tabla 2.1 Diferencias entre las arcillas y las arenas.....	22
Tabla 2.2 Diferencias entre las arcillas y los limos.....	23
Tabla 2.3 Clasificación de suelos según cada tamaño de partículas	27
Tabla 2.4 Clasificación de suelos según índice de plasticidad.....	29
Tabla 2.5 Símbolos utilizados en la clasificación SUCS	33
Tabla 2.6 Clasificación y uso del suelo según el valor de CBR	36
Tabla 2.7 Especificaciones técnicas para una subrasante	38
Tabla 2.8 Ventajas e inconvenientes de las formas de presentación de la cal	47
Tabla 2.9 Rango de cemento requerido en la estabilización de suelos	53
Tabla 3.1 Coordenadas de los puntos de extracción de muestras	58
Tabla 3.2 Composición química del hidróxido de calcio (La Calera)	63
Tabla 3.3 Granulometría para el hidróxido de calcio (La Calera)	63
Tabla 3.4 Resumen de resultados del análisis granulométrico	65
Tabla 3.5 Resumen de resultados del ensayo límites de Atterberg.....	68
Tabla 3.6 Resumen de resultados del contenido de humedad.....	69
Tabla 3.7 Resumen de resultados de la clasificación del suelo.....	69
Tabla 3.8 Resumen de resultados de la compactación de suelos	71
Tabla 3.9 Resumen de resultados del ensayo CBR.....	72
Tabla 3.10 Resumen de resultados de límites de Atterberg con $\text{Ca}(\text{OH})_2$	74
Tabla 3.11 Resumen de resultados de compactación con $\text{Ca}(\text{OH})_2$	75
Tabla 3.12 Resumen de resultados de CBR con $\text{Ca}(\text{OH})_2$	76
Tabla 3.13 Resumen de resultados de límites de Atterberg con cemento.....	78
Tabla 3.14 Resumen de resultados de compactación con cemento	79
Tabla 3.15 Resumen de resultados de CBR con cemento.....	80
Tabla 3.16 Resumen de resultados de límites de Atterberg, aplicando la mezcla suelo - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - cemento para la muestra M-01	83

Tabla 3.17 Resumen de resultados de límites de Atterberg, aplicando la mezcla suelo - Ca(OH) ₂ - cemento para la muestra M-02.....	83
Tabla 3.18 Resumen de resultados de límites de Atterberg, aplicando la mezcla suelo - Ca(OH) ₂ - cemento para la muestra M-03.....	84
Tabla 3.19 Resumen de resultados de compactación, aplicando la mezcla suelo - Ca(OH) ₂ - cemento para la muestra M-01	85
Tabla 3.20 Resumen de resultados de compactación, aplicando la mezcla suelo - Ca(OH) ₂ - cemento para la muestra M-02	86
Tabla 3.21 Resumen de resultados de compactación, aplicando la mezcla suelo - Ca(OH) ₂ - cemento para la muestra M-03	87
Tabla 3.22 Resumen de resultados de CBR, aplicando la mezcla suelo - Ca(OH) ₂ - cemento para la muestra M-01.....	89
Tabla 3.23 Resumen de resultados de CBR, aplicando la mezcla suelo - Ca(OH) ₂ - cemento para la muestra M-02.....	89
Tabla 3.24 Resumen de resultados de CBR, aplicando la mezcla suelo - Ca(OH) ₂ - cemento para la muestra M-03.....	90
Tabla 3.25 Resumen de resultados de los espesores por capas del pavimento.....	91
Tabla 3.26 Presupuesto general de la estructura del pavimento	92
Tabla 4.1 Resultados de la caracterización de los suelos arcillosos a estabilizar	94
Tabla 4.2 Resumen de resultados de la estabilización mediante Ca(OH) ₂ y cemento.....	94
Tabla 4.3 Datos de índice de CBR para ser sometidos al tratamiento estadístico	111
Tabla 4.4 Datos de índice de plasticidad para ser sometidos al tratamiento estadístico	113
Tabla 4.5 Verificación de resultados con las especificaciones requeridas.....	115

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1 (a) Suelo en estado natural; (b) Modelo trifásico del suelo	9
Figura 2.2 Etapas y procesos en la formación del suelo	11
Figura 2.3 Lámina de tetraedros.....	14
Figura 2.4 Lámina de octaedros	14
Figura 2.5 Lámina de sílice gibsita elemental.....	15
Figura 2.6 Estructura laminar de los minerales arcillosos	16
Figura 2.7 Intercambio catiónico en la superficie de una arcilla	18
Figura 2.8 Distribución y concentración de iones entre partículas de arcilla	19
Figura 2.9 Hinchamiento en las arcillas.....	20
Figura 2.10 Permeabilidad de las arcillas	21
Figura 2.11 Presión de hinchamiento de una arcilla expansiva	22
Figura 2.12 Suelo arcilloso	24
Figura 2.13 (a) Elemento de suelo natural; (b) tres fases del elemento de suelo	25
Figura 2.14 Formas del agua presente en el suelo	26
Figura 2.15 Límites de consistencia de suelos de grano fino.....	28
Figura 2.16 Sistema de clasificación de suelos de la AASHTO	31
Figura 2.17 Rango del límite líquido y del índice de plasticidad para suelos.....	32
Figura 2.18 Carta de plasticidad.....	33
Figura 2.19 Principios de compactación	34
Figura 2.20 Curvas de compactación Proctor estándar y modificada.....	35
Figura 2.21 Estructura del pavimento	39
Figura 2.22 Criterios para estabilización de suelos.....	41
Figura 2.23 Cal viva (óxido de calcio).....	46
Figura 2.24 Cal hidratada (hidróxido de calcio)	47
Figura 2.25 Estabilización del suelo con cal.....	49
Figura 2.26 Muestra de cemento.....	51
Figura 3.1 Ubicación geográfica del proyecto	57
Figura 3.2 Ubicación de la comunidad Cañon Oculto.	58

Figura 3.3 Ubicación de los puntos de extracción de muestras	59
Figura 3.4 Letrero de acceso a la comunidad Cañon Oculto	60
Figura 3.5 Extracción de la Muestra N°1	61
Figura 3.6 Extracción de la Muestra N°2	61
Figura 3.7 Extracción de la Muestra N°3	62
Figura 3.8 Proceso del ensayo análisis granulométrico	64
Figura 3.9 Proceso del límite líquido	66
Figura 3.10 Proceso del límite plástico	67
Figura 3.11 Proceso del ensayo contenido de humedad	68
Figura 3.12 Proceso del ensayo compactación	70
Figura 3.13 Proceso del ensayo CBR.....	72
Figura 3.14 Proceso del ensayo límites de Atterberg aplicando Ca(OH)_2	73
Figura 3.15 Proceso del ensayo compactación aplicando Ca(OH)_2	74
Figura 3.16 Proceso del ensayo CBR aplicando Ca(OH)_2	76
Figura 3.17 Proceso del ensayo límites de Atterberg aplicando cemento.....	77
Figura 3.18 Proceso del ensayo compactación aplicando cemento	78
Figura 3.19 Proceso del ensayo CBR aplicando cemento.....	80
Figura 3.20 Proceso del ensayo límites de Atterberg con Ca(OH)_2 y cemento	82
Figura 3.21 Proceso del ensayo compactación con Ca(OH)_2 y cemento	84
Figura 3.22 Proceso del ensayo CBR con Ca(OH)_2 y cemento	88
Figura 3.23 Estructura del pavimento con subrasante no estabilizada y estabilizada.....	91
Figura 3.24 Sección del pavimento	93
Figura 4.1 Prueba de hipótesis – CBR	112
Figura 4.2 Prueba de hipótesis – índice de plasticidad	114

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Página
Gráfico 3.1 Curva granulométrica de la muestra M-01, M-02 y M-03.....	65
Gráfico 3.2 Curvas de compactación de la muestra M-01, M-02 y M-03	71
Gráfico 3.3 Curvas de compactación con 3%, 5% y 7% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$	75
Gráfico 3.4 Curvas de compactación con 10%, 13% y 16% de cemento	79
Gráfico 3.5 Curvas de compactación aplicando $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - cemento, muestra M-01	85
Gráfico 3.6 Curvas de compactación aplicando $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - cemento, muestra M-02	86
Gráfico 3.7 Curvas de compactación aplicando $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - cemento, muestra M-03	87
Gráfico 4.1 Influencia del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en los límites de Atterberg.....	96
Gráfico 4.2 Influencia del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en la humedad óptima.....	97
Gráfico 4.3 Influencia del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en la densidad máxima.....	98
Gráfico 4.4 Influencia del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en la expansión	98
Gráfico 4.5 Influencia del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en el CBR.....	99
Gráfico 4.6 Influencia del cemento en los límites de Atterberg	100
Gráfico 4.7 Influencia del cemento en la humedad óptima	101
Gráfico 4.8 Influencia del cemento en la densidad máxima	102
Gráfico 4.9 Influencia del cemento en la expansión.....	102
Gráfico 4.10 Influencia del cemento en el CBR	103
Gráfico 4.11 Influencia de la mezcla suelo - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - cemento en los límites de Atterberg para la muestra M-01	104
Gráfico 4.12 Influencia de la mezcla suelo - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - cemento en los límites de Atterberg para la muestra M-02.....	105
Gráfico 4.13 Influencia de la mezcla suelo - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - cemento en los límites de Atterberg para la muestra M-03.....	106
Gráfico 4.14 Influencia del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - cemento en la humedad óptima.....	107
Gráfico 4.15 Influencia del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - cemento en la densidad máxima.....	108
Gráfico 4.16 Influencia de la mezcla suelo - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - cemento en la expansión.....	109
Gráfico 4.17 Influencia de la mezcla suelo - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - cemento en el CBR.....	110