

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**“ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA BENTONITA SÓDICA EN LA
PERMEABILIDAD DE ARCILLAS DE ALTA PLASTICIDAD”**

Por:

CARLA LORENA BALDIVIEZO CUELLAR

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 - 2025

TARIJA - BOLIVIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Título:

**“ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA BENTONITA SÓDICA EN LA
PERMEABILIDAD DE ARCILLAS DE ALTA PLASTICIDAD”**

Por:

CARLA LORENA BALDIVIEZO CUELLAR

Semestre II - 2025

TARIJA -BOLIVIA

Dedicatoria:

El presente proyecto está dedicado a Dios por ayudarme y guiarme durante todo este camino llamado vida.

A ti Daniel C.B., que eres parte fundamental de mi vida.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I

DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

Página

1.1.	Antecedentes	1
1.2.	Situación problemática.....	2
1.2.1.	Problema	2
1.2.2.	Relevancia y factibilidad del problema.....	2
1.2.3.	Delimitación temporal y espacial del problema.....	3
1.3.	Justificación.....	3
1.4.	Objetivos	4
1.4.1.	Objetivo general	4
1.4.2.	Objetivos específicos	4
1.5.	Hipótesis.....	5
1.6.	Operacionalización de las variables	5
1.6.1.	Variable independiente.....	5
1.6.2.	Variable dependiente.....	5
1.7.	Identificación del tipo de investigación	6
1.8.	Unidades de estudio y decisión muestral	6
1.8.1.	Unidad de estudio.....	6
1.8.2.	Población.....	7
1.8.3.	Muestra.....	9
1.8.4.	Selección de las técnicas de muestreo.....	10
1.9.	Métodos y técnicas empleadas	10
1.9.1.	Métodos.....	10

1.9.2.	Técnicas.....	10
1.10.	Procesamiento de la información	11
1.11.	Alcance de la investigación.....	12

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES DE LAS ARCILLAS Y PERMEABILIDAD

2.1.	Suelo.....	13
2.2.	Sistemas de clasificación de suelos.....	13
2.2.1.	Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).....	14
2.2.2.	Sistema de la Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte o por sus siglas en inglés (AASHTO)	16
2.3.	Arcillas	18
2.3.1.	Minerales constitutivos de las arcillas.....	19
2.3.2.	Físico químico de las arcillas	21
2.3.3.	Bentonita	22
2.3.3.1.	Bentonita en la ingeniería civil	23
2.3.3.2.	Usos y aplicación de la bentonita en la ingeniería civil.....	23
2.3.3.3.	Ventajas del uso de la bentonita.....	23
2.3.3.4.	Mezclas suelo - bentonita.....	24
2.3.4.	Bentonita sódica activada Super Gel.....	24
2.3.4.1.	Características de la bentónica sódica activada Super Gel	25
2.4.	Distribución granulometría	26
2.4.1.	Análisis granulométrico con mallas	26
2.4.1.1.	Análisis granulométrico por el método de lavado.....	27
2.4.2.	Análisis hidrométrico	27

2.4.3.	Límites de Atterberg	32
2.4.3.1.	Carta de plasticidad	34
2.4.4.	Compactación de suelos	35
2.5.	Permeabilidad.....	38
2.5.1.	Ley de Darcy	41
2.5.1.1.	Determinación en laboratorio de la permeabilidad	42
2.5.1.1.1.	Prueba de carga variable	42
2.6.	Análisis estadístico.....	44
2.6.1.	Estadística descriptiva.....	44
2.6.1.1.	Medidas de tendencia central	44
2.6.1.2.	Medidas de variabilidad	45
2.6.2.	Estadística Inferencial	46
2.6.2.1.	Hipótesis y prueba de hipótesis.....	46
2.6.2.2.	Nivel de significancia (α) o significación	47
2.6.2.3.	Análisis paramétricos	48
2.6.2.3.2.	Análisis de varianza (ANOVA)	49
2.6.2.3.3.	Prueba de Tukey.....	51

CAPÍTULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1.	Introducción	53
3.2.	Zona de estudio	53
3.2.1.	Criterios de selección de muestra.....	53
3.2.2.	Ubicación de las zonas de extracción preliminares.....	54

3.2.3.	Mapa satelital y coordenadas de las zonas de extracción de muestras preliminares.....	55
3.2.4.	Caracterización de muestras preliminares.....	57
3.3.	Programa estratégico de trabajo	58
3.3.1.	Extracción de la muestra	59
3.3.2.	Ensayos de caracterización	59
3.3.2.1.	Análisis granulométrico por tamizado (método del lavado) ASTM D422; AASHTO T27	60
3.3.2.2.	Determinación del peso específico relativo del suelo ASTM D854; AASHTO T100	62
3.3.2.3.	Análisis granulométrico por medio del hidrómetro AASHTO T88; ASTM D422.....	65
3.3.2.4.	Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos ASTM D4318	68
3.3.2.5.	Clasificación del suelo	71
3.3.2.6.	Ensayo de compactación estándar ASTM D698; AASHTO T99	73
3.4.	Ensayo para la determinación del coeficiente de permeabilidad ASTM D2434; AASHTO T215	76
3.4.1.	Materiales y equipo	77
3.4.2.	Procedimiento	77
3.4.3.	Cálculos.....	79

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1.	Introducción	82
4.2.	Análisis preliminar	82
4.2.1.	Análisis de la Granulometría.....	82

4.2.2.	Análisis de la plasticidad.....	83
4.2.3.	Análisis de la Compactación.....	84
4.2.3.1.	Contenido de Humedad Óptimo (CHO %).....	84
4.2.3.2.	Densidad Seca Máxima (DSS gr/cm ³)	84
4.3.	Análisis de la permeabilidad	85
4.3.2.	Análisis estadístico de varianza (ANOVA)	88
4.3.3.	Prueba de Tukey.....	89
4.3.4.	Análisis de regresión lineal y exponencial.....	92
4.3.5.	Prueba de hipótesis.....	94
4.4.	Conclusión General del Capítulo (Síntesis)	95
4.4.1.	Aporte académico.....	96

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.....	97
5.2. Recomendaciones	99

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

- ANEXO A: Especificación técnica y ficha de seguridad
- ANEXO B: Ensayos para zonas de muestreo preliminar
- ANEXO C: Ensayos de granulometría método del lavado
- ANEXO D: Ensayos de peso específico
- ANEXO E: Ensayos de granulometría por medio del hidrómetro
- ANEXO F: Ensayos de límites de Atterberg
- ANEXO G: Ensayos de compactación
- ANEXO H: Ensayos de permeabilidad

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. 1. Operacionalización de la variable independiente.....	5
Tabla 1. 2. Operacionalización de la variable dependiente.....	6
Tabla 1. 3. Valores asumidos para el cálculo del tamaño de la muestra.....	8
Tabla 1. 4. Tamaño de la muestra	8
Tabla 1. 5. Número total de ensayos a realizar	9
Tabla 2. 1. Símbolos del sistema unificado	14
Tabla 2. 2. Clasificación de suelos gruesos por el sistema SUCS	15
Tabla 2. 3. Clasificación de suelos finos por el sistema SUCS.....	16
Tabla 2. 4. Clasificación de suelos por el sistema AASHTO	17
Tabla 2. 5. Relación de clasificación AASHTO-SUCS.....	18
Tabla 2. 6. Especificación bentonita sódica activada Super Gel.....	25
Tabla 2. 7. Propiedades físicas - químicas bentonita sódica activada Super Gel.....	25
Tabla 2. 8. Juego de tamices siguiendo la norma variante AASHTO T27	26
Tabla 2. 9. Valores de K para el cálculo del diámetro de la partícula en el hidrómetro ..	29
Tabla 2. 10. Profundidad efectiva 152H	30
Tabla 2. 11. Valores del coeficiente de corrección a para distintos valores de Gs	31
Tabla 2. 12. Valores de corrección por temperatura	31
Tabla 2. 13. Variación $\eta T^{\circ}C \eta 20^{\circ}C$	43
Tabla 2. 14. Fórmulas ANOVA	50
Tabla 2. 15. Cuantiles de la distribución de Tukey α , k, N-k	52
Tabla 3. 1. Coordenadas de las zonas de extracción de muestras preliminares.....	57
Tabla 3. 2. Caracterización de muestras preliminares.....	57
Tabla 3. 3. Resumen ensayo de granulometría	62
Tabla 3. 4. Resumen ensayos de peso específico relativo del suelo	65
Tabla 3. 5. Resumen ensayos de hidrómetro.....	67
Tabla 3. 6. Resumen ensayos de límites de Atterberg	71
Tabla 3. 7. Determinación del índice de grupo (IG)	72
Tabla 3. 8. Resumen de clasificación del suelo	73

Tabla 3. 9. Resumen ensayos de compactación	76
Tabla 3. 10. Igualación de energías de compactación.....	78
Tabla 3. 11. Resumen ensayos de permeabilidad	81
Tabla 4. 1. Resultados del coeficiente de permeabilidad $k_{20^{\circ}\text{C}}$	86
Tabla 4. 2. Estadística descriptiva de los coeficientes de permeabilidad.....	87
Tabla 4. 3. Análisis ANOVA	89
Tabla 4. 4. Comparaciones de pares de medias mediante la prueba de Tukey	91
Tabla 4. 5. Criterio de decisión para ANOVA.....	95

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 2. 1. Suelo	13
Figura 2. 2. Arcilla	19
Figura 2. 3. Esquema de la estructura de la lámina silícica	20
Figura 2. 4. Esquema de la estructura de la lámina alumínica	20
Figura 2. 5. Arcilla montmorillonítica	21
Figura 2. 6. Bentonita.....	22
Figura 2. 7. Bentonita sódica activada Super Gel	24
Figura 2. 8. Definición "L" en una prueba hidrométrica	28
Figura 2. 9. Definición de los límites de Atterberg.....	32
Figura 2. 10. Dispositivo de límite líquido y herramienta de ranurado	33
Figura 2. 11. Prueba de límite plástico.....	33
Figura 2. 12. Carta de plasticidad.....	35
Figura 2. 13. Principios de compactación	36
Figura 2. 14. Equipo para la prueba Proctor estándar	37
Figura 2. 15. Valores típicos del coeficiente de permeabilidad	39
Figura 2. 16. Ley de Darcy.....	41
Figura 2. 17. Esquema permeámetro carga variable	42
Figura 3. 1. Mapa de la provincia Cercado Tarija.....	54
Figura 3. 2. Mapa satelital barrio Fray Quebracho suelo A	55
Figura 3. 3. Mapa satelital barrio Moto Méndez suelo B.....	55
Figura 3. 4. Mapa satelital zona San Blas suelo C	56
Figura 3. 5. Mapa satelital zona San Blas suelo D.....	56

Figura 3. 6. Mapa satelital barrio Monte Cristo suelo E	56
Figura 3. 7. Programa estratégico de trabajo.....	58
Figura 3. 8. Extracción de la muestra.....	59
Figura 3. 9. Granulometría por tamizado (método del lavado).....	61
Figura 3. 10. Determinación del peso específico relativo de los sólidos	64
Figura 3. 11. Granulometría por medio del hidrómetro	67
Figura 3. 12. Determinación del Límite Líquido	69
Figura 3. 13. Determinación del Límite plástico	70
Figura 3. 14. Ensayo de compactación.....	75
Figura 3. 15. Ensayo de permeabilidad	80
Figura 4. 1. Gráfico de análisis para la granulometría.....	83
Figura 4. 2. Gráfico de análisis para el LL, LP e IP	83
Figura 4. 3. Relación entre porcentaje de Bentonita y Contenido de humedad óptimo...	84
Figura 4. 4. Relación entre porcentaje de bentonita y densidad de suelo seco	85
Figura 4. 5. Relación entre permeabilidad del suelo y porcentaje de bentonita sódica ...	86
Figura 4. 6. Regresión lineal de la permeabilidad.....	92
Figura 4. 7. Regresión exponencial y lineal permeabilidad vs % bentonita sódica	94