

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**“ANÁLISIS DE LA REDUCCIÓN DE LA PLASTICIDAD ELEVADA DE
SUELOS, MEDIANTE MEZCLAS DE CAL Y CENIZA DE CARBÓN”**

Por:

MIRANDA DONAIRE JAVIER JESUS

Trabajo de grado 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

**“ANÁLISIS DE LA REDUCCIÓN DE LA PLASTICIDAD ELEVADA DE
SUELOS, MEDIANTE MEZCLAS DE CAL Y CENIZA DE CARBÓN”**

Por:

MIRANDA DONAIRE JAVIER JESUS

**PROYECTO DE GRADO ELABORADO EN LA
ASIGNATURA CIV 502 PROYECTO DE INGENIERÍA
CIVIL II**

Semestre II-2025
TARIJA - BOLIVIA

DEDICATORIA.

A Dios que siempre estuvo en todo lo bueno y malo en mi vida apoyándome.

A mis padres, Jesús Matildo Miranda Castro y Marisol Donaire; a mis hermanos y hermana, que con mucho cariño me brindaron su apoyo.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

	Página
1.1. Antecedentes.	1
1.2. Antecedentes de trabajos relacionados.....	2
1.3. Justificación.....	2
1.3.1. Justificación académica.....	2
1.3.2. Justificación sobre la aplicación técnica-práctica.	2
1.3.3. Justificación e importancia social.	3
1.4. Planteamiento del problema.	3
1.4.1. Situación problemática.....	3
1.4.2. Delimitación del tiempo.....	4
1.4.3. Delimitación espacial.....	5
1.4.4. Formulación del problema.	5
1.5. Objetivos.	6
1.5.1 Objetivo general.	6
1.5.2. Objetivos específicos.	6
1.6. Hipótesis.....	6
1.7. Conceptualización y operacionalización de las variables.	6
1.7.1. Variable independiente:	6
1.7.2. Variable dependiente.....	7
1.8. Alcance de la investigación.....	8

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

	Página
2. Estabilización de suelos	9
2.1. Tipos de estabilización de suelos	10
2.1.1. Estabilización mecánica	10
2.1.2. Estabilización química	10
2.1.2.1. Cal	11
2.1.2.2. Ceniza de carbón	14
2.1.3. Estabilización física	16
2.1.4. Estabilización biológica (bioestabilización)	16
2.1.5. Comparación general	17
2.2. Condiciones del suelo que influyen en la estabilización.....	17
2.3. Tipo de suelo (clasificación textural y unificada)	17
2.4. Índice de plasticidad (IP)	20
2.5. Humedad natural y capacidad de retención de agua	21
2.6. Contenido de materia orgánica	21
2.7. Presencia de sulfatos o sales solubles	22
2.8. Parámetros geotécnicos adicionales	22
2.9. Naturaleza de los suelos arcillosos expansivos	22
2.9.1. Causas de la expansión	24
2.9.2. Impacto en las estructuras	24
2.10. Procesos y métodos de estabilización de suelos	25
2.11. Proceso general de estabilización.....	25
2.11.1. Métodos más utilizados en campo	29
2.12. Método de control de expansión en laboratorio	29
2.12.1. Edómetro	30
2.12.2. Objetivo del ensayo.....	30
2.12.3. Fundamento del método	30
2.12.4. Método Seed	31
2.13. Confiabilidad.....	31

2.14. Marco referencial	32
2.15. Marco normativo.....	33

CAPÍTULO III

ETAPA EXPERIMENTAL Y PROCEDIMIENTOS

	Página
3. Localización	36
3.1. Zona de estudio	37
3.2. Selección del punto de estudio	37
3.3 Criterios metodológicos	38
3.3.1. Unidades de estudio y decisión muestral	38
3.3.1.1. Unidad de muestra	38
3.3.1.2. Población.....	38
3.3.1.3. Muestra.....	38
3.3.1.4. Tamaño de muestra.	39
3.3.1.5 Muestreo probabilístico (estratificado y experimental)	40
3.4. Desarrollo del trabajo	40
3.5. Procedimiento de extracción de la muestra.....	42
3.6 Preparación de la muestra	43
3.6.1 Secado de la muestra.....	43
3.6.2. Determinación de la muestra crítica según los límites de Atterberg.....	44
3.7. Caracterización de la cal hidratada	48
3.8. Caracterización de la ceniza de carbón	48
3.9. Criterios de dosificación	49
3.9.1. Mezclas con diferentes porcentajes de cal	49
3.9.2. Mezclas con diferentes porcentajes de ceniza de carbón	50
3.9.3. Esquema de los grupos de ensayo.....	51
3.10 Ensayos de laboratorio con aditivos.....	51
3.10.1 Límite líquido y límite plástico	51
3.10.3. Ensayo de expansión con edómetro	55
3.10.3.1 Preparación de la muestra para el edómetro	55

3.10.3.2 Procedimiento de medición de expansión con el edómetro (Método Seed, Woodward and Lundgren)	57
3.10.3.3 Registro y análisis de resultados	60
3.11. Resumen del procedimiento experimental	61

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LOS DATOS OBSERVADOS

	Página
4. Ensayos con aditivos	62
4.1. Límites de Atterberg	62
4.1.1. Límites de Atterberg(3%CAL+%CC+CH).....	62
4.1.2. Límites de Atterberg (4%CAL+%CC+CH).....	63
4.1.3. Límites de Atterberg (5%CAL+%CC+CH).....	65
4.2. Datos del ensayo de la medición con el edómetro	66
4.2.1. Resultados del Edómetro (CH+3CAL+CC)	66
4.2.2. Resultados del Edómetro (4CH+CAL+CC)	68
4.2.3. Resultados del Edómetro (5CH+CAL+CC)	69
4.3. Análisis estadístico general	70
4.3.1. Estadística descriptiva (Límite Líquido).....	70
4.3.1.1. Estadística inferencial	74
4.3.1.1.1. Intervalo de confianza	74
4.3.1.2. Prueba de hipótesis (T-Student).....	74
4.3.2. Estadística descriptiva (Índice de plasticidad)	76
4.3.2.1. Estadística inferencial	79
4.3.2.1.1. Intervalo de confianza	79
4.3.2.1.2. Prueba de hipótesis (T-Student).....	80
4.3.3. Estadística descriptiva del Edómetro	81
4.3.3.1.2. Prueba de hipótesis (T-Student).....	85
4.4. Especificaciones técnicas puntuales del proceso	87
4.4.1 Proceso técnico.....	87

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

	Página
5. Conclusiones	90
5.1. Recomendaciones.....	91

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía.

ANEXOS

Anexo I Memoria fotográfica

Anexo II Análisis químico de la ceniza de carbón y la cal

Anexo III Caracterización del suelo

Anexo IV Límites de Atterberg con mezclas de cal y ceniza de carbón

Anexo V Ensayos de compactación con cal y ceniza de carbón

Anexo VI Ensayos del edómetro con mezclas de cal y ceniza de carbón

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1 Cronograma de procedimiento de investigación	4
Tabla 2. Variables independientes	6
Tabla 3. Variables dependientes	7
Tabla 4. Comparación general	17
Tabla 5. Predicción de la expansividad del suelo por índice de plasticidad	20
Tabla 6: Método Seed, Woodward and Lundgren.	31
Tabla 7: Nivel de confianza	39
Tabla 8: Elaboración de técnica de muestreo.....	39
Tabla 9. Desarrollo del trabajo de investigación.	41
Tabla 10. Resultado de Límites de Atterberg	44
Tabla 11. Resultados de la caracterización de la muestra crítica	47
Tabla 12. Composición química de la cal hidratada	48
Tabla 13. Análisis químico de la ceniza de carbón.....	49
Tabla 14. Resultados de límites de Atterberg	52
Tabla 15. Resultado de los ensayos de compactación	54
Tabla 16. Expansión en la muestra 3%CAL+5%CC+CH	59
Tabla 17. Expansión en las muestras	60
Tabla 18. Límites de Atterberg (3%CAL+%CC+CH)	62
Tabla 19. Límites de Atterberg (4%CAL+%CC+CH)	64
Tabla 20. Límites de Atterberg (5%CAL+%CC+CH)	65
Tabla 21. Resultados de la expansión (CH+3CAL+CC)	66
Tabla 22. Resultados de la expansión (4CH+CAL+CC)	68
Tabla 23. Resultados de la expansión (5CH+CAL+CC)	70
Tabla 24. Datos del límite líquido de la muestra	71
Tabla 25. Distribución de frecuencias	72
Tabla 26: Medidas de tendencia y dispersión	73
Tabla 27. Media aritmética	75
Tabla 28. Datos del índice de plasticidad de la muestra	76
Tabla 29. Distribución de frecuencias	77

Tabla 30: Medidas de tendencia y dispersión	79
Tabla 31. Media aritmética	80
Tabla 32. Datos de expansión de la muestra	82
Tabla 33. Distribución de frecuencias	83
Tabla 34: Medidas de tendencia y dispersión	84
Tabla 35. Media aritmética	86

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Cal.....	11
Figura 2. Cal procesada.....	12
Figura 3. Cenizas de Carbón	15
Figura 4. Carbón para comercialización	15
Figura 5. Clasificación de materiales en función de los límites de Atterberg	18
Figura 6. Suelo grueso (Grava)	18
Figura 7. Plasticidad en suelos	19
Figura 8. Muestra de suelos	19
Figura 9. Carta de plasticidad	20
Figura 10. Suelo húmedo	21
Figura 11. Parámetros de humedad del suelo.....	21
Figura 12. Suelo con materia orgánica	22
Figura 13. Camino con presencia de arcillas	23
Figura 14. Arcillas expansivas	23
Figura 15. Causas de suelos expansivos	24
Figura 16. Ruptura de suelos.....	25
Figura 17. Estabilización de suelos	26
Figura 18. Ensayos de caracterización	27
Figura 19. Fases en un suelo natural	28
Figura 20. Edómetro.....	30
Figura 21. Mapa de localización de la ciudad de Tarija	36
Figura 22. Mapa de la provincia de Cercado-Tarija	37
Figura 23. Ubicación del punto en el barrio.....	38
Figura 24. Bolsas de yute con suelo.....	43
Figura 25. Preparación de la muestra	43
Figura 26. Capsula en balanza	45
Figura 27. Ensayo con el equipo de casa grande	45
Figura 28. Ensayo de límite plástico	46
Figura 29. Método del lavado para una arcilla.....	46

Figura 30. Suelo saturando.....	47
Figura 31. Porcentajes de cal hidratada.....	50
Figura 33. Eliminando pequeños terrones.....	53
Figura 34. Compactación	53
Figura 35. Registro de molde compactado	54
Figura 36. Arcilla con cal y ceniza de carbón.....	56
Figura 37. Anillo del edómetro con mezcla preparada	56
Figura 38. Anillo de edómetro con piedras porosas.....	57
Figura 39. Edómetro.....	58
Figura 40. Edómetro azul	58
Figura 41. Equipo de corte.....	59

ÍNDICE DE GRÁFICAS

	Página
Gráfica 1. Límites de Atterberg(3%CAL+%CC+CH).....	62
Gráfica 2. Límites de Atterberg(4%CAL+%CC+CH).....	63
Gráfica 3. Límites de Atterberg(5%CAL+%CC+CH).....	65
Gráfica 4. Expansión (CH+CAL+CC).....	67
Gráfica 5. Expansión (CH+CAL+CC).....	68
Gráfica 6. Expansión (CH+CAL+CC).....	69
Gráfica 7: Histograma y polígono de frecuencias (Límite líquido).....	72
Gráfica 8: Polígono de frecuencias acumuladas (Límite líquido).....	73
Gráfica 9: Histograma y polígono de frecuencias (Índice de plasticidad).....	78
Gráfica 10: Polígono de frecuencias acumuladas (Índice de plasticidad).....	78
Gráfica 11: Histograma y polígono de frecuencias (Edómetro).	83
Gráfica 12: Polígono de frecuencias acumuladas (Edómetro).	84