

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFÍA Y VÍAS DE COMUNICACIÓN



“ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DE LAS CENIZAS DE CARBÓN EN LA
EXPANSIÓN DE ARCILLAS DE ALTA COMPRESIBILIDAD”

Por:

MARÍA NELY CHAVARRIA BARROSO

SEMESTRE I- 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 LA INCIDENCIA DE LAS CENIZAS DE CARBÓN EN LA
EXPANSIÓN DE ARCILLAS DE ALTA COMPRESIBILIDAD"**

Por:

MARÍA NELY CHAVARRIA BARROSO

SEMESTRE I - 2023

TARIJA-BOLIVIA

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado principalmente a Dios por permitirme llegar hasta este punto por brindarme salud, sabiduría, por ser luz en mí caminar día a día, a mis padres Teodoro Chavarría Betancur e Irma Barroso porque han sido mis pilares fundamentales en mi vida, fueron quienes confiaron en mi inteligencia y capacidad para lograr una meta más en mi vida, gracias por su paciencia y sacrificio todos estos años ; y a mi hermana Yenny Chavarría Barroso por ser la voz de aliento que necesito para creer en mí. Gracias familia.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

	Página
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Referencias a trabajos realizados.....	2
1.3. Justificación.....	2
1.3.1. Aporte académico.....	3
1.4. Planteamiento del problema.....	4
1.4.1. Situación problemática.....	4
1.4.2. Delimitación temporal.....	4
1.4.3. Delimitación espacial.....	5
1.4.4. Formulación del problema.....	5
1.5. Objetivos.....	5
1.5.1. Objetivo general.....	5
1.5.2. Objetivos específicos.....	5
1.6. Hipótesis.....	5
1.6.1. Identificación de variables.....	5
1.6.2. Conceptualización y operacionabilidad de variables.....	6
1.7. Alcance de la investigación.....	7

CAPÍTULO II

SUELOS DE ALTA COMPRESIBILIDAD Y CENIZAS DE CARBÓN

	Página
2.1. Carbón vegetal.....	9
2.1.1. Forma de producción.....	10
2.1.2. Cenizas de carbón.....	10

2.2. Características de las cenizas de carbón.....	12
2.2.1. Color, finura, forma de la partícula y densidad.....	12
2.2.2. Clasificación de las cenizas.....	13
2.2.3. Composición química de las cenizas.....	14
2.2.4. Propiedades de las cenizas de carbón.....	15
2.3. Suelos arcillosos de alta compresibilidad.....	16
2.3.1. Origen.....	18
2.3.1.1. El montmorilonítico.....	18
2.3.2. Proceso de expansión.....	18
2.3.3. Compresibilidad.....	19
2.4. Caracterización de los suelos.....	21
2.4.1. Gravedad específica.....	21
2.4.2. Granulometría.....	22
2.4.2.1. Método del lavado.....	23
2.4.2.2. Método del hidrómetro.....	23
2.4.2.3. Peso específico.....	24
2.4.3. Plasticidad de los suelos.....	24
2.4.3.1. Límite líquido.....	25
2.4.3.2. Límite plástico.....	26
2.4.3.3. Índice de plasticidad.....	27
2.4.4. Clasificación de los suelos.....	28
2.4.4.1. Clasificación SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos).....	29
2.4.5. Compactación de los suelos.....	30
2.4.5.1. Prueba T-99 Proctor Estándar.....	31
2.5. Determinación de la expansión.....	33

2.5.1.	En base al índice de plasticidad y limite liquido.....	33
2.5.2.	Consolidación unidimensional de los suelos.....	35
2.5.3.	Duración de la consolidación de suelos.....	36
2.5.4.	Parámetros derivados de la prueba del edómetro.....	36
2.5.5.	Determinación del coeficiente de consolidación, CV.....	37
2.5.5.1.	Método de la raíz cuadrada de Taylor del tiempo (1948).....	37
2.5.6.	Suelos Normalmente Consolidados y Sobreconsolidados.....	37
2.5.7.	Expansividad de suelos.....	37
2.6.	Marco referencial.....	38
2.7.	Marco normativo.....	39
2.8.	Posición del autor.....	39

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN

	Página
3.1. Criterios del diseño metodológico.....	42
3.1.1. Unidad de muestra.....	42
3.1.2. Población.....	42
3.1.3. Muestra.....	42
3.1.4. Tamaño de la muestra.....	42
3.2. Ubicación de los materiales.....	44
3.3. Ensayos de laboratorio.....	45
3.4. Caracterización de los suelos.....	45
3.4.1. Resultados de ensayos de laboratorio.....	45
3.4.2. Resultado granulométrico método del lavado.....	46
3.4.3. Resultado granulométrico método del hidrómetro.....	49

3.4.4.	Resultados de peso específico.....	51
3.4.5.	Resultados de límites de consistencia e índice de expansión.....	52
3.4.6.	Resultados de ensayos de clasificación SUCS.....	57
3.4.7.	Resultados del ensayo de Proctor estándar.....	58

CAPÍTULO IV

PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

		Página
4.1.	Resultados obtenidos de consolidación.....	64
4.1.1.	Resultados muestra – 1.....	64
4.1.1.1.	Cálculo del tiempo T90.....	64
4.1.1.2.	Coeficiente de consolidación.....	65
4.1.1.3.	Altura final de la muestra.....	66
4.1.1.4.	Altura de sólidos.....	67
4.1.1.5.	Altura de vacíos.....	67
4.1.1.6.	Coeficiente de compresibilidad.....	69
4.1.1.7.	Coeficiente de compresibilidad volumétrica.....	70
4.1.1.8.	Esfuerzo de compresión.....	71
4.1.1.9.	Índice de compresión.....	72
4.1.1.10. Índice de recompresión	72
4.1.1.11. Índice de hinchamiento	73
4.1.1.12. Compresibilidad de la muestra	74
4.1.2.	Resultados muestra – 2.....	75
4.1.2.1.	Cálculo del tiempo T90.....	75

4.1,2.2. Coeficiente de consolidación.....	75
4.1,2.3. Altura final de la muestra.....	76
4.1,2.4. Altura de solidos.....	77
4.1,2.5. Altura de vacíos.....	78
4.1,2.6. Coeficiente de compresibilidad.....	79
4.1,2.7. Coeficiente de compresibilidad volumétrica.....	81
4.1,2.8. Índice de compresión.....	82
4.1,2.9. Índice de recompresión.....	82
4.1,2.10..... Índice de hinchamiento	83
4.1,2.11..... Compresibilidad de la muestra	84
4.2. Análisis de resultados.....	85
4.2.1. Índice de compresión muestra 1.....	85
4.2.2. Compresibilidad de la muestra M-1.....	86
4.2.3. Análisis de la expansión método consolidómetro.....	87
4.2.4. Índice de recompresión muestra 1.....	87
4.2.5. Índice de compresión muestra 2.....	88
4.2.6. Índice de recompresión muestra 2.....	89
4.2.7. Compresibilidad de la muestra.....	91
4.2.8. Análisis de expansión Método consolidómetro.....	91
4.3. Prueba de hipótesis.....	92
4.3.1. Prueba de “t student”.....	92
4.3.2. Conclusión de la prueba de hipótesis.....	97

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

	Página
5.1. Conclusiones.....	99
5.2. Recomendaciones.....	100

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ANEXO 1. CARACTERIZACIÓN DE MUESTRA DE SUELO N° 1

ANEXO 2. CARACTERIZACIÓN DE MUESTRA DE SUELO N° 2

ANEXO 3. CARACTERIZACIÓN DE CENIZA DE CARBÓN

ANEXO 4. ENSAYOS DE SUELO M - 1 + CENIZA DE CARBÓN

ANEXO 5. ENSAYOS DE SUELO M - 2 + CENIZA DE CARBÓN

**ANEXO 6. ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN MUESTRA M-1 Y M-2
INALTERADAS**

ANEXO 7. ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN M-1 + CENIZAS DE CARBÓN

ANEXO 8. ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN M-2 + CENIZAS DE CARBÓN

ANEXO 9. FOTOGRAFÍAS

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Conceptualización de variable independiente.....	6
Tabla 2. Conceptualización de variable dependiente.....	6
Tabla 3. Composición química de las cenizas.....	15
Tabla 4. Grupo de las esmécticas.....	17
Tabla 5. Gravedad específica de los minerales más importantes.....	22
Tabla 6. Clasificación de los suelos según el tamaño de partículas.....	22
Tabla 7. Clasificación de los suelos según el IP.....	28
Tabla 8. Símbolos (SUCS).....	30
Tabla 9. Letras (SUCS).....	30
Tabla 10. Predicción de la expansividad a partir de LL e IP.....	34
Tabla 11. Grado de expansividad en función de propiedades geotécnicas.....	34
Tabla 12. Clasificación de suelos expansivos basado en el ÍP.....	34
Tabla 13. Grado de expansión de acuerdo con el ensayo de consolidación.....	38
Tabla 14. Muestra.....	42
Tabla 15. Planilla de cálculo del tamaño de la muestra.....	43
Tabla 16. Tamaño de la muestra.....	43
Tabla 17. Tabla de abreviaciones.....	46
Tabla 18, Gradación granulométrica M-1.....	46
Tabla 19, Curva granulométrica M-2.....	47
Tabla 20. Resultado de ensayo de análisis granulométrico por hidrómetro.....	49
Tabla 21. Resultados de peso específico de sólidos.....	51
Tabla 22. Resultados de límites de consistencia M-1.....	52
Tabla 23. Resultados límites de consistencia M-2.....	52
Tabla 24. Resultados de la expansividad basados en el índice plástico M-1.....	54
Tabla 25. Resultados de la expansividad basados en el índice plástico M-2.....	55
Tabla 26. Resultados de la expansividad basados en el límite líquido M-1.....	55
Tabla 27. Resultados de la expansividad basados en el límite líquido M-2.....	56

Tabla 28. Resultados de clasificación SUCS M-1.....	57
Tabla 29. Resultados de clasificación SUCS M-2.....	57
Tabla 30. Contenido de humedad optima y densidad máxima M-1.....	58
Tabla 31. Contenido de humedad optima y densidad máxima M-2.....	59
Tabla 32. Resumen de resultados de muestras de suelos.....	61
Tabla 33. Resumen de resultados de ensayos de suelos con ceniza de carbón.	61
Tabla 34. Resultados del tiempo T90.....	64
Tabla 35. Resultados coeficiente de consolidación.....	65
Tabla 36. Resultados de altura final de la muestra.....	66
Tabla 37. Resultados altura de sólidos.....	67
Tabla 38. Resultados altura de vacíos.....	67
Tabla 39. Resultados de coeficiente de compresibilidad.....	69
Tabla 40. Resultados de compresibilidad volumétrica.....	70
Tabla 41. Resultados de esfuerzo de compresión.....	71
Tabla 42. Resultados de índice de compresión.....	72
Tabla 43. Resultados de índice de recompresión.....	72
Tabla 44. Resultados de índice de hinchamiento.....	73
Tabla 45. Resultados de compresibilidad de la muestra.....	74
Tabla 46. Resultados del tiempo T90.....	75
Tabla 47. Resultados coeficiente de consolidación.....	75
Tabla 48. Resultados de altura final de la muestra.....	76
Tabla 49. Resultados altura de sólidos.....	77
Tabla 50. Resultados altura de vacíos.....	78
Tabla 51. Resultados de coeficiente de compresibilidad.....	79
Tabla 52. Resultados de compresibilidad volumétrica.....	81
Tabla 53. Resultados de índice de compresión.....	82
Tabla 54. Resultados de índice de recompresión.....	82
Tabla 55. Resultados de índice de hinchamiento.....	83
Tabla 56. Resultados de compresibilidad de la muestra.....	84
Tabla 57. Índice de compresión + cenizas de carbón.....	85

Tabla 58. Compresibilidad de la muestra 1.....	86
Tabla 59. Análisis de expansión.....	87
Tabla 60. Índice de recompresión M-1.....	87
Tabla 61. Índice de compresión + ceniza de carbón.....	88
Tabla 62. Índice de recompresión + ceniza de carbón.....	89
Tabla 63. Compresibilidad de la muestra.....	91
Tabla 64. Análisis de expansión por consolidómetro.....	91
Tabla 65. Prueba de hipótesis Muestra N° 1.....	93
Tabla 66. Prueba de hipótesis Muestra N° 2.....	95

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Carbón vegetal.....	12
Figura 2. Cenizas de carbón.....	13
Figura 3. Ensayo de peso específico.....	24
Figura 4. Dispositivo de limite líquido y herramienta de ranurado.....	26
Figura 5. Prueba de limite plástico.....	28
Figura 6. Martillos utilizados en las pruebas Proctor estándar y modificada.....	32
Figura 7. Martillos utilizados en las pruebas Proctor estándar y modificada.....	33
Figura 8. Partes de un consolidómetro.....	35
Figura 9. Localización del área del material del barrio San Blas.....	44
Figura 10. Localización de extracción del material barrio Juan Nicolai.....	44
Figura 11. Lavado de suelo fino.....	48
Figura 12. Muestra de suelo final.....	49
Figura 13. Preparación de muestra para el ensayo.....	54
Figura 14. Curva de Gauss.....	94

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Página
Gráfico 1. Curva de compresibilidad de un espécimen de suelo.....	20
Gráfico 2. Carta de plasticidad (SUCS).....	30
Gráfico 3. Curva granulométrica de la muestra 1.....	47
Gráfico 4. Curva granulométrica de la muestra 2.....	48
Gráfico 5. Distribución granulométrica M-1 con $(\text{NaPO}_3)_6$	49
Gráfico 6. Distribución granulométrica M-1 con agua destilada.....	50
Gráfico 7. Distribución granulométrica M-2 con $(\text{NaPO}_3)_6$	50
Gráfico 8. Distribución granulométrica M-2 con agua destilada.....	51
Gráfico 9. Variación de los límites de consistencias con las cenizas de carbón.....	53
Gráfico 10. Variación del índice plástico con el contenido de cenizas de carbón.....	53
Gráfico 11. Densidad máxima vs. % de cenizas de carbón M-1.....	58
Gráfico 12. Contenido de humedad vs. % de cenizas de carbón M-1.....	59
Gráfico 13. Densidad máxima vs % de cenizas de carbón M-2.....	60
Gráfico 14. Contenido de humedad vs % de cenizas de carbón M-2.....	60
Gráfico 15. Curva de compresibilidad.....	74
Gráfico 16. Grado de consolidación.....	74
Gráfico 17. Curva de compresibilidad.....	84
Gráfico 18, Grado de consolidación.....	85
Gráfico 19, Índice de compresión M-1.....	85
Gráfico 20. Variación del índice de compresión M-1.....	86
Gráfico 21. Índice de recompresion M-1.....	88
Gráfico 22. Variación de índice de recompresion M-1.....	88
Gráfico 23. Variación de índice de compresión.....	89
Gráfico 24. Ecuación de índice de compresión + ceniza de carbón.....	89

Gráfico 25. Índice de recompresion.....90
Gráfico 26. Índice de recompresion.....90