

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE
ARCILLAS DE BAJA COMPRESIBILIDAD MEZCLADAS CON CENIZA DE
PAPEL”**

Por:

JIMENEZ FLORES JORGE NICOLAS

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

**“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE
ARCILLAS DE BAJA COMPRESIBILIDAD MEZCLADAS CON CENIZA DE
PAPEL”**

Por:

JIMENEZ FLORES JORGE NICOLAS

Semestre II - 2025

TARIJA – BOLIVIA

DEDICATORIA:

A Dios:

Por haberme dado fortaleza cuando a punto de caer he estado y permitirme realizar un logro más en mi vida.

A mi Familia:

Mis padres y hermanos por estar siempre conmigo y creer en mí.

A mis Docentes:

Por su apoyo, en especial a mi docente guía, Ing. Laura Soto, por su paciencia, dedicación y sabiduría que me transmitió en el desarrollo de mi tesis.

A mis amigos:

Por los momentos compartidos en mi estadía en la universidad, a mis queridos compañeros de laboratorio porque juntos llegamos hasta este punto.

ÍNDICE

ADVERTENCIA

DEDICATORIA.

AGRADECIMIENTO.

RESUMEN.

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 y espacial.....	4
1.3 Justificación	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo general	5
1.4.2 Objetivos específicos	5
1.5 Hipótesis.....	6
1.6 Conceptualización y operacionalización de las variables	6
1.7 Identificación del tipo de investigación	7
1.8 Unidad de estudio y decisión muestral	8
1.9 Métodos y técnicas empleadas	8
1.9.1 Métodos.....	8
1.9.2 Técnicas.....	8

1.10 Procesamiento de la información.....	9
1.11 Alcance.....	9

CAPÍTULO II

GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS, PLASTICIDAD Y CENIZA DE PAPEL

2.1 Definición de arcilla.....	11
2.1.1 Estructura de la arcilla.....	12
2.1.2 Características típicas de la arcilla	13
2.1.3 Diferencia entre limos y arcillas	14
2.2 Muestreo de suelos finos.....	14
2.3 Contenido de Humedad de suelos.....	14
2.3.1 Método de secado al horno	15
2.4 Peso específico de la partícula	16
2.5 Análisis granulométrico	18
2.5.1 Granulometría por tamizado	19
2.5.1.1 Lavado por el tamiz 200.....	19
2.5.2 Granulometría por sedimentación	20
2.6 Plasticidad de los suelos.....	20
2.6.1 Límites de Atterberg.....	21
2.6.1.1 Límite líquido (LL)	22
2.6.1.1.1 Límite líquido por Copa de Casagrande.....	22
2.6.1.2 Límite plástico (LP)	25
2.6.1.3 Índice de plasticidad.....	26
2.7 Clasificación de los suelos	27
2.7.1 Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (S.U.C.S.)	28

2.7.1.1 Carta de Plasticidad.....	28
2.8 Compresibilidad.....	30
2.9 Estabilización de suelos	31
2.9.1 Estabilización física	31
2.9.2 Estabilización mecaniza	32
2.9.3 Estabilización química	32
2.9.3.1 Estabilización de suelos con cal.....	33
2.9.3.2 Mezclas de Cal-Puzolanas para suelos con cantidades bajas de arcilla	34
2.9.3.3 Estabilización de suelos con ceniza de papel.....	35
2.9.3.3.1 Producción de papel	35
2.9.3.3.2 Utilización de la ceniza de papel.....	37
2.9.3.3.3 Ceniza de papel en estabilización de suelos.....	40

CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRÁCTICA

3.1 Ubicación de la zona de estudio.....	42
3.2 Muestreo de los materiales.....	44
3.2.1 Selección de las arcillas de baja compresibilidad	44
3.2.2 Selección del papel y obtención de la ceniza de papel (CP)	45
3.3 Caracterización de los materiales.....	46
3.3.1 Caracterización de las arcillas naturales de baja compresibilidad “CL”	46
3.3.1.1 Contenido de humedad (ASTM D2216).....	46
3.3.1.2 Peso específico (ASTM D854 - AASHTO T100).....	49
3.3.1.3 Granulometría (ASTM D854 - AASHTO T100)	52
3.3.1.3.1 Lavado por el tamiz #200 para suelos finos.....	52

3.3.1.3.2 Granulometría por Sedimentación (ASTM D422).....	55
3.3.1.4 Límites de consistencia	59
3.3.1.4.1 Límite líquido (ASTM D4318 - AASHTO T89)	59
3.3.1.4.2 Límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D4318 - AASHTO T90).....	60
3.3.1.5 Clasificación de suelos finos	64
3.3.2 Caracterización de la ceniza.....	65
3.3.2.1 Reducción por calcinación (Rc)	66
3.2.2.2 Peso específico de la ceniza de papel (CP)	67
3.2.2.3 Granulometría	69
3.2.2.4 Color y olor	71
3.2.2.5 Análisis químico.....	72
3.2.3 Caracterización de las “CL” mezcladas con “CP”	72
3.2.3.1 Límites de consistencia y clasificación de las mezclas de CL con CP	75
3.2.3.1.1 Límites de consistencia y clasificación de “MF 5 + 5 % CP”	76
3.2.3.1.2 Límites de consistencia y clasificación de “MF 5 + 10 % CP”	78
3.2.3.1.3 Límites de consistencia y clasificación de “MF 5 + 15 % CP”	80
3.2.3.1.4 Límites de consistencia y clasificación de “MF 5 + 20 % CP”	82
3.2.3.2 Comportamiento de los límites de consistencia de “MF 5” con 5 % CP	84
3.2.3.3 Resumen de la caracterización de las “CL” mezcladas con “CP”	85

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Análisis del comportamiento del límite líquido y límite plástico	86
4.1.1 Comportamiento del límite líquido	86
4.1.2 Comportamiento del límite plástico	90

4.2 Análisis del comportamiento del índice de plasticidad.....	94
4.2.1 Análisis estadístico del índice de plasticidad	98
4.3 Análisis de resultados con investigaciones previas.....	101
4.3.1 Análisis de resultados de la composición química de las cenizas de papel	101
4.3.2 Análisis de resultados de los IP en las investigaciones previas.....	103
4.4 Discusión de la aplicabilidad en subrasantes	105
4.5 Análisis técnico-económico de la producción de ceniza de papel	107
4.6 Interpretación final de los resultados	109

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones	111
5.2 Recomendaciones.....	112

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

Anexo 1: Contenido de humedad de las arcillas naturales

Anexo 2: Peso específico de las arcillas naturales

Anexo 3: Granulometría de las arcillas naturales

Anexo 4: Hidrometría de las arcillas naturales

Anexo 5: Límites de Atterberg y clasificación de las arcillas naturales

Anexo 6: Peso específico de la ceniza de papel

Anexo 7: Hidrometría de la ceniza de papel

Anexo 8: Análisis químico de la ceniza de papel

Anexo 9: Límites de Atterberg y clasificación de las arcillas alteradas

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diseño experimental	7
Figura 2.1: Colores de arcillas	11
Figura 2.2: Estructura de la arcilla	12
Figura 2.3: Horno de secado	16
Figura 2.4: Curva granulométrica	19
Figura 2.5: Granulometría por sedimentación	20
Figura 2.6: Copa de Casagrande para determinar el límite líquido	23
Figura 2.7: Determinación del líquido	24
Figura 2.8: Curva de flujo para determinación de límite líquido.....	24
Figura 2.9: Límite plástico	26
Figura 2.10: Carta de Plasticidad	29
Figura 2.11: Elaboración del papel	36
Figura 2.12: Papel usado	37
Figura 2.13: Cenizas de papel usado.....	39
Figura 2.14: Carretera en España construida con cenizas de papel	41
Figura 3.1: Distrito 12 de la ciudad de Tarija.....	42
Figura 3.2: Extracción de muestras	44
Figura 3.3: Reciclajes Tarija	45
Figura 3.4: Obtención de la ceniza de papel	46
Figura 3.5 Muestra natural pesada y llevada al horno	47
Figura 3.6: Calibración del frasco volumétrico	49
Figura 3.7: Calibración del frasco volumétrico de “MF 5”	50
Figura 3.8: Peso específico de “MF 5”	50

Figura 3.9: Lavado por el tamiz #200 de arcillas de baja compresibilidad	52
Figura 3.10: Tamizado de las arcillas de baja compresibilidad	53
Figura 3.11: Curva granulométrica de “MF 5”	54
Figura 3.12: Método del hidrómetro	56
Figura 3.13: Hidrometría “MF 5”	58
Figura 3.14: Límite líquido	60
Figura 3.15: Límite plástico	61
Figura 3.16: Límite líquido	62
Figura 3.17 Clasificación con la carta de plasticidad de “MF 5”	64
Figura 3.18 Reducción por calcinación.....	66
Figura 3.19: Peso específico de la ceniza de papel	67
Figura 3.20: Calibración del frasco volumétrico	68
Figura 3.21: Hidrometría con 152 H para “CP”	69
Figura 3.22: Hidrometría “CP”	71
Figura 3.23: Color de la ceniza de papel.....	71
Figura 3.24: Preparación de la muestra y ensayos de límite líquido y plástico	76
Figura 3.25: Límite líquido de “MF 5 + 5 % CP”	77
Figura 3.26: Clasificación con la carta de plasticidad de “MF 5 + 5 % CP”	78
Figura 3.27: Límite líquido de “MF 5 + 10 % CP”	79
Figura 3.28: Clasificación con la carta de plasticidad de “MF 5 + 10 % CP”	80
Figura 3.29: Límite líquido de “MF 5 + 15 % CP”	81
Figura 3.30: Clasificación con la carta de plasticidad de “MF 5 + 15 % CP”	82
Figura 3.31: Límite líquido de “MF 5 + 20 % CP”	83
Figura 3.32: Clasificación con la carta de plasticidad de “MF 5 + 20 % CP”	84

Figura 4.1: Comportamiento del límite líquido	87
Figura 4.2: Comportamiento del LL puro vs el LL con ceniza	89
Figura 4.3: Comportamiento del límite plástico	91
Figura 4.4: Comportamiento del LP puro vs el LP con ceniza	93
Figura 4.5: Comportamiento del índice de plasticidad	95
Figura 4.6: Comportamiento del IP puro vs el IP con ceniza.....	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Conceptualización y operacionalización de las variables	6
Tabla 2.1 Diferencia entre limos y arcillas.....	14
Tabla 2.2 Peso específico de las partículas	17
Tabla 2.3: Factor de corrección “K”	18
Tabla 2.4: Límites de Atterberg.....	21
Tabla 2.5: Requisitos químicos para puzolanas	34
Tabla 2.6: Composición química de cenizas volantes de papel usado a 600 °C.....	38
Tabla 2.7: Composición química de cenizas volantes de papel usado a 850 °C.....	38
Tabla 3.1: Coordenadas geográficas de los puntos de muestreo.....	43
Tabla 3.2: Contenido de humedad de “MF 5”	47
Tabla 3.3 Resumen de contenido de humedad de las muestras	48
Tabla 3.4: Calibración del frasco volumétrico de “MF 5”	49
Tabla 3.5: Peso específico de “MF 5”.....	51
Tabla 3.6: Resumen de peso específico de las muestras	51
Tabla 3.7: Granulometría de “MF 5”	53
Tabla 3.8: Resumen granulometría de las muestras	54
Tabla 3.9: Hidrometría con 152 H para “MF 5”	57
Tabla 3.10: Resumen de hidrometría de las muestras	58
Tabla 3.11 Límite líquido y el límite plástico de “MF 5”	61
Tabla 3.12 Resumen de límites de consistencia de las muestras	63
Tabla 3.13 Resumen de clasificación de las muestras	64
Tabla 3.14: Reducción por calcinación	67
Tabla 3.15: Calibración del frasco volumétrico	68

Tabla 3.16: Peso específico de la ceniza de papel.....	69
Tabla 3.17: Hidrometría con 152 H para “CP”	70
Tabla 3.18: Análisis químico de la ceniza de papel	72
Tabla 3.19: Agrupación por afinidad según el límite líquido.....	73
Tabla 3.20: Arcillas de baja compresibilidad escogidas.....	74
Tabla 3.21: Porcentajes de ceniza de papel escogidos	75
Tabla 3.22: Límite líquido y límite plástico de “MF 5 + 5 % CP”	76
Tabla 3.23: Límite líquido y límite plástico de “MF 5 + 10 % CP”	78
Tabla 3.24: Límite líquido y límite plástico de “MF 5 + 15 % CP”	80
Tabla 3.25: Límite líquido y límite plástico de “MF 5 + 20 % CP”	82
Tabla 3.26: Resumen del LL, LP, IP y clasificación de “MF 5” con 5 % CP	84
Tabla 3.27: Resumen de la caracterización de las “CL” mezcladas con “CP”	85
Tabla 4.1: Diferencia del LL puro con el LL con ceniza	88
Tabla 4.2: Diferencia del LP puro con el LP con ceniza	92
Tabla 4.3: Diferencia del IP puro con el IP con ceniza	96
Tabla 4.4: Datos para prueba de hipótesis.....	99
Tabla 4.5: Diferencias del IP con mezcla con el IP natural.....	99
Tabla 4.6: Composición química de la Cenizas volantes de papel usado	101
Tabla 4.7: Reducción de la plasticidad de un suelo (CH)	104
Tabla 4.8: Reducción de la plasticidad de un suelo (ML), (CH) y (CL).....	104
Tabla 4.9: Comparación del IP puro con el IP con ceniza	106