

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**“ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE LODOS RESIDUALES TRATADOS EN
LA CONFORMACIÓN DE CAPA SUBRASANTE PARA PAVIMENTOS
FLEXIBLES DE BAJO TRÁFICO”**

Por:

JORGE SADRAK CAYO CHAMBI

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 DE LA APLICACIÓN DE LODOS RESIDUALES TRATADOS EN
LA CONFORMACIÓN DE CAPA SUBRASANTE PARA PAVIMENTOS
FLEXIBLES DE BAJO TRÁFICO”**

Por:

JORGE SADRAK CAYO CHAMBI

Semestre II -2025

TARIJA - BOLIVIA

DEDICATORIA:

El presente trabajo está dedicado con profundo cariño a mi madre, Senia Chambi, y a mis abuelitos, Germán Chambi e Inocencia Cuenca, por su amor incondicional, sacrificio, comprensión y constante apoyo a lo largo de mi vida. Los quiero.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

	Página
1.1. Antecedentes	1
1.2. Situación problemática.....	2
1.2.1. Problema	2
1.2.2. Relevancia y factibilidad 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.....	4
1.6. Operacionalización de las variables	4
1.6.1. Variable independiente	4
1.6.2. Variable dependiente.....	4
1.6.3. Conceptualización de variables.....	5
1.7. Identificación del tipo de investigación	6
1.8. Métodos y técnicas empleadas	6
1.9. Alcance de la investigación.....	6

CAPÍTULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO SOBRE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

2.1. El suelo.....	7
2.1.1. Suelo en la ingeniería civil.....	7
2.2. Tipo de suelo.....	9
2.2.1. Gravas	9
2.2.2. Arenas	9
2.2.3. Limos	9
2.2.4. Arcilla.....	10

2.3. Diferencia entre los limos y las arcillas	11
2.4. Propiedades físicas y mecánicas de los suelos	11
2.4.1. Relaciones de volumen	11
2.4.1.1. Porosidad.....	12
2.4.1.2. Relación de vacíos.....	12
2.4.1.3. Grado de saturación	12
2.4.2. Relaciones de peso	12
2.4.2.1. Contenido de humedad.....	13
2.4.2.2. Peso unitario.....	13
2.4.3. Humedad natural	13
2.4.4. Granulometría del suelo	13
2.4.5. Hidrómetro	14
2.4.6. Peso específico.....	14
2.4.7. Plasticidad de los suelos.....	15
2.4.7.1. Límite líquido.....	16
2.4.7.2. Límite plástico.....	16
2.4.7.3. Límite de contracción.....	17
2.4.7.4. Índice de plasticidad.....	17
2.4.8. Clasificación de suelos.....	17
2.4.8.1. Sistema de clasificación AASHTO	18
2.4.8.2. Sistema unificado de clasificación de suelos SUCS	20
2.4.9. Compactación de suelos.....	22
2.4.9.1. Compactación Proctor estándar	22
2.4.9.2. Compactación Proctor modificado.....	23
2.4.10. Relación de soporte de California CBR	23
2.5. Capa subrasante.....	24
2.5.1. Propiedades de la subrasante.....	25
2.5.2. Caracterización de la subrasante	26
2.5.3. Categoría de la subrasante.....	26
2.6. Problemas en la conformación de subrasante con suelos limosos	26
2.7. Estabilización de suelos	27

2.7.1. Criterios para establecer la estabilización de suelos	27
2.7.2. Métodos de estabilización de suelos	29
2.7.3. Estabilización mecánica	29
2.7.4. Estabilización física	30
2.7.5. Estabilización química	30
2.8. Ventajas de los suelos estabilizados.....	31
2.8.1. Ventajas técnicas	31
2.8.2. Ventajas económicas y ambientales.....	32
2.9. Estabilización del suelo con cenizas	32
2.10. Planta de tratamiento de aguas residuales.....	32
2.11. Tratamiento de lodos residuales.....	33
2.11.1. Espesamiento.....	33
2.11.2. Estabilización	34
2.11.3. Deshidratación.....	34
2.11.4. Incineración.....	34
2.11.5. Disposición.....	34
2.12. Composición química de la ceniza de lodos residuales	35
2.13. Comparación de la ceniza de lodo residual con estabilizantes convencionales.....	36
2.14. Ventajas del uso de la ceniza de lodo residual frente a estabilizantes químicos tradicionales	37
2.15. Antecedentes internacionales del uso de ceniza de lodo residual	38

CAPÍTULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3. Inspección visual del sitio de levantamiento de muestras.....	40
3.1. Criterios metodológicos	40
3.1.1. Métodos.....	40
3.1.2. Técnicas.....	40
3.1.3. Unidad de estudio.....	41
3.1.4. Población.....	41

3.1.5. Muestra.....	41
3.1.6. Selección de la técnica de muestreo.....	41
3.2. Ubicación del proyecto	41
3.2.1. Características de la zona de seleccionada.....	42
3.2.2. Ubicación de la zona de muestreo.....	42
3.2.3. Ubicación de la planta generadora del lodo residual	44
3.2.4 Realización del muestreo	44
3.3. Descripción y preparación del material estabilizante	45
3.3.1. Lodo residual.....	45
3.3.2. Pretratamiento de los lodos residuales	46
3.3.3. Proceso de incineración de lodo residual	47
3.4. Caracterización de los materiales.....	49
3.5. Ensayo de caracterización de suelos naturales.....	49
3.5.1. Contenido de humedad de la muestra (ASTM D2216).....	50
3.5.2. Análisis granulométrico (ASTM D422- AASHTO T88)	51
3.5.3. Calibración de frasco volumétrico	52
3.5.4. Peso específico (ASTM D854-AASHTO T100)	54
3.5.5. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro (ASTM D422).....	56
3.5.6. Determinación del límite líquido (ASTM D4318 - AASHTO T89).....	59
3.5.7. Límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D4318 - AASHTO T90)	59
3.5.8. Clasificación del suelo	60
3.6. Selección de muestras a estabilizar.....	61
3.7. Caracterización mecánica	62
3.7.1. Ensayo de compactación (Proctor modificado) (AASHTO T180).....	62
3.7.2. Relación de soporte del suelo (CBR) (ASTM D1883 – AASHTO T193).....	64
3.8. Caracterización de la ceniza de lodo residual	65
3.8.1. Contenido de humedad (Ceniza).....	66
3.8.2. Peso específico (Ceniza)	66
3.8.3. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro (Ceniza)	67
3.9. Mejoramiento de suelo con ceniza de lodo residual	68
3.9.1. Dosificación	68

3.10. Evaluación del suelo con ceniza de lodo residual.....	69
3.11. Resultados del suelo estabilizado con el aditivo (ceniza de lodo residual)	69
3.11.1. Ensayo de límites de consistencia (suelo + ceniza de lodo residual).....	69
3.11.2. Ensayo de compactación (suelo + ceniza de lodo residual).....	70
3.11.3. Resultado del ensayo CBR (suelo + ceniza de lodo residual).....	70

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Análisis de los suelos en estado natural	71
4.2. Análisis de la estabilización suelo con ceniza de lodo residual	73
4.2.1. Influencia de la ceniza de lodo residual en la plasticidad de los suelos.....	73
4.2.2. Influencia de la ceniza de lodo residual en la curva de compactación.....	75
4.2.3. Influencia de la ceniza de lodo residual en la capacidad de soporte (CBR)	78
4.3. Análisis estadístico.....	83
4.3.1. Prueba de hipótesis t de Student para la variable dependiente “CBR”	83
4.3.2. Prueba de hipótesis t de Student para la variable dependiente “Compactación” ...	85
4.3.3. Prueba de hipótesis t de Student para la variable dependiente “IP”	90
4.4. Comparación de aditivo (ceniza de lodo residual) con otro producto estabilizante (cal)	92
4.4.1. Comparación de gráficas de los resultados suelo-cal y suelo-ceniza.....	93
4.5. Determinación del espesor estructural mediante el método CBR.....	97
4.6. Determinación de rendimientos para la subrasante estabilizada.....	99

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones	100
5.2. Recomendaciones.....	101

BIBLIOGRAFÍA

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I CARACTERIZACIÓN DE SUELOS

ANEXO II ENSAYOS DE SUELO BARRIO LAS FLORES

ANEXO III ENSAYOS DE SUELO BARRIO CAÑADAS II

ANEXO IV ENSAYOS DE SUELO LAS FLORES CON CENIZA DE LODO
RESIDUAL

ANEXO V ENSAYOS DE SUELO CAÑADAS II CON CENIZA DE LODO
RESIDUAL

ANEXO VI ENSAYOS DE CENIZA DE LODO RESIDUAL

ANEXO VII ESPESOR CARPETA ESTRUCTURAL MÉTODO CBR

ANEXO VIII INFORME DE ENSAYO DEL CEANID

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1 (a) Suelo en estado natural; (b) Modelo trifásico del suelo	7
Figura 2.2 Suelo en la ingeniería	8
Figura 2.3 Tipos de suelos	10
Figura 2.4 (a) Elemento de suelo natural; (b) tres fases del elemento de suelo	12
Figura 2.5 Capa subrasante	25
Figura 2.6 Planta de tratamiento de aguas residuales (Tarija)	33
Figura 2.7 Lodo residual	35
Figura 3.1 Departamento de Tarija-Geografía	42
Figura 3.2 Ubicación de los puntos de extracción de muestras	43
Figura 3.3 Ubicación de los puntos de extracción de muestras	43
Figura 3.4 Ubicación de PTAR.....	44
Figura 3.5 Lodo residual	46
Figura 3.6 Deshidratación de lodos	47
Figura 3.7 Incineración en la mufla	48
Figura 3.8 Determinación del contenido de humedad	50
Figura 3.9 Proceso del ensayo granulométrico	51
Figura 3.10 Calibración del frasco	53
Figura 3.11 Determinación del peso específico	55
Figura 3.12 Granulometría – hidrómetro	56
Figura 3.13 Proceso para determinar el límite líquido del suelo	59
Figura 3.14 Proceso para determinar el límite plástico del suelo	60
Figura 3.15 Proceso del ensayo de compactación	63
Figura 3.16 Proceso para realizar el ensayo de CBR.....	65
Figura 3.17 Peso específico de la ceniza	66

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1.1 Variable independiente	5
Tabla 1.2 Variable dependiente.....	5
Tabla 2.1 Diferencias entre los limos y las arcillas.....	11
Tabla 2.2 Clasificación de los suelos según cada tamaño de partículas	14
Tabla 2.3 Rangos de gravedad específica propuestos por Bowles.....	15
Tabla 2.4 Clasificación de suelos según índice de plasticidad.....	17
Tabla 2.5 Sistema de clasificación AASHTO.....	18
Tabla 2.6 Símbolos utilizados en la clasificación SUCS	21
Tabla 2.7 Clasificación y uso del suelo según el valor de CBR	24
Tabla 2.8 Categoría de subrasante	26
Tabla 3.1 Coordenadas de los puntos de extracción de muestras	42
Tabla 3.2 Coordenadas de la planta de tratamiento	44
Tabla 3.3 Composición química de la ceniza de lodo residual	48
Tabla 3.4 Ensayos para caracterizar el suelo	49
Tabla 3.5 Resumen de resultados del contenido de humedad.....	50
Tabla 3.6 Resumen de resultados del análisis granulométrico	52
Tabla 3.7. Resultado de la calibración del frasco volumétrico	53
Tabla 3.8 Resultados del ensayo de peso específico.....	55
Tabla 3.9 Resultado granulométrico M-01 y M-02	57
Tabla 3.10 Resumen de resultados para los límites de consistencia	60
Tabla 3.11 Resultados de la clasificación de las muestras analizadas	61
Tabla 3.12 Resultados de la caracterización de las muestras de suelo.....	61
Tabla 3.13 Muestras de suelo seleccionadas.....	62
Tabla 3.14 Resultados de la compactación para los suelos en análisis.....	63
Tabla 3.15 Resultados del ensayo de CBR para el suelo en análisis	65
Tabla 3.16 Contenido de humedad de la ceniza.....	66
Tabla 3.17 Resultados del ensayo de peso específico.....	67
Tabla 3.18 Porcentajes de ceniza	68

Tabla 3.19 Ensayos para evaluar el suelo con adición del aditivo en análisis	69
Tabla 3.20 Resultados para los límites de consistencia	69
Tabla 3.21 Resultados de compactación	70
Tabla 3.22 Resultados de CBR para distintos porcentajes de aditivo.....	70
Tabla 4.1 Resultados de la caracterización de los suelos a estabilizar.....	71
Tabla 4.2 Resultados de la estabilización mediante ceniza de lodo residual	71
Tabla 4.3 Resumen de CBR con diferentes porcentajes de ceniza de lodo residual.....	78
Tabla 4.4 Resumen comparativo de resultados con 8 % de ceniza de lodo residual	82
Tabla 4.5 Datos de CBR para ser sometidos a la prueba	83
Tabla 4.6 Datos de humedad óptima.....	85
Tabla 4.7 Datos de densidad seca máxima.....	88
Tabla 4.8 Datos de Índice de plasticidad	90
Tabla 4.9 Comparativa de estabilización suelo-cal y suelo ceniza de lodo residual.....	92
Tabla 4.10 Comparación técnica suelo-cal y suelo ceniza.....	96
Tabla 4.11 Ventajas y desventajas suelo-cal y suelo ceniza	97
Tabla 4.12 Comparativa de espesores.....	98
Tabla 4.13 Rendimientos de la subrasante estabilizada con 8% de ceniza	99

ÍNDICE DE GRÁFICAS

	Página
Gráfica 2.1 Límites de consistencia de suelos de grano fino	16
Gráfica 2.3 Rango del límite líquido y del índice de plasticidad para suelos	20
Gráfica 2.3 Carta de plasticidad.....	21
Gráfica 2.4 Principios de compactación	22
Gráfica 2.6 Criterios para estabilización de suelos	29
Gráfica 3.1 Curva de calibración del frasco volumétrico	54
Gráfica 3.2 Distribución granulométrica M-01	58
Gráfica 3.3 Distribución granulométrica M-02	58
Gráfica 3.4 Distribución granulométrica de ceniza	67
Gráfica 4.1 Influencia de la ceniza en los límites de Atterberg M-01	73
Gráfica 4.2 Influencia de la ceniza en los límites de Atterberg M-02	74
Gráfica 4.3 Influencia de la Ceniza en la compactación (M-01)	75
Gráfica 4.4 Influencia de la Ceniza en la compactación (M-02)	76
Gráfica 4.5 Influencia de la Ceniza en la Humedad óptima	76
Gráfica 4.6 Influencia de la Ceniza en la densidad máxima.....	77
Gráfica 4.7 Influencia de la ceniza de lodo residual en el CBR 95%.....	79
Gráfica 4.8 Influencia de la ceniza de lodo residual en el CBR 100%.....	79
Gráfica 4.9 Influencia de la ceniza de lodo residual en la expansión	81
Gráfica 4.10 Prueba de hipótesis C.B.R.	85
Gráfica 4.11 Prueba de hipótesis humedad óptima.....	87
Gráfica 4.12 Prueba de hipótesis densidad seca máxima	89
Gráfica 4.13 Prueba de hipótesis índice plástico	91
Gráfica 4.14 Influencia de los aditivos en la densidad seca máxima del suelo	93
Gráfica 4.15 Influencia de los aditivos en la humedad óptima del suelo	94
Gráfica 4.16 Influencia de los aditivos en el CBR de un suelo	95
Gráfica 4.17 Influencia de los aditivos en la expansión del suelo	96
Gráfica 4.18 Estructura del pavimento con subrasante no estabilizada y estabilizada ...	98