

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”**

**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**DEPARTAMENTO**

**TOPOGRAFÍA Y VÍAS DE COMUNICACIÓN**



**“ANÁLISIS DEL MEJORAMIENTO EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS  
FINOS UTILIZANDO CAUCHO GRANULAR”**

**Por:**

**ADRIAN GONZALO VELASQUEZ ROJAS**

Proyecto presentado a consideración de la "UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO", como requisito para optar el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Civil.

**Semestre I - 2024**

**TARIJA – BOLIVIA**

### **DEDICATORIA:**

Dedico con toda mi alma y corazón mi tesis a mis padres y hermanos, pues sin ellos no lo habría logrado. Su bendición de cada día me protege y fortalece a lo largo de mi vida y me lleva por el camino del bien. Por eso les entrego mi trabajo en ofrenda a su paciencia, cariño y amor.

# ÍNDICE GENERAL

## CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

	<b>Página</b>
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Situación problemática.....	2
1.2.1 Formulación del problema .....	2
1.2.2 Delimitación temporal.....	2
1.2.3 Delimitación espacial del problema.....	3
1.3 Justificación de la investigación.....	3
1.4 Objetivos .....	3
1.4.1 Objetivo general .....	3
1.4.2 Objetivos específicos .....	4
1.5 Formulación de la hipótesis .....	4
1.6 Operacionalización de las variables .....	4
1.6.1 Conceptualización y operacionalización de las variables .....	4
1.7 Identificación del tipo de investigación .....	5
1.7.1 Selección de programa a utilizar .....	5
1.7.2 Estadística descriptiva.....	6
1.7.3 Estadística inferencial para comprobar la hipótesis formulada.....	6
1.7.4 Limitaciones de la investigación .....	6
1.7.5 Viabilidad de la investigación.....	6
1.7.6 Relevancia y factibilidad del problema.....	6
1.7.7 Identificación del tipo de diseño de investigación .....	7
1.8 Criterios metodológicos de la investigación .....	7
1.8.1 Unidad de estudio y decisión muestral por variable .....	7
1.8.2 Unidad de estudio o muestreo .....	7
1.8.3 Población y muestra .....	7
1.8.4 Tamaño de la muestra .....	7
1.8.5 Selección de las técnicas de muestreo.....	7
1.8.6 Población finita (muestreo estratificado) .....	8

1.9 Métodos y técnicas empleadas .....	9
1.9.1 Método .....	9
1.9.2 Experimentos y técnicas.....	9
1.9.3 Descripción de los instrumentos para la obtención de datos.....	10
1.10 Procedimiento de aplicación .....	10
1.11 Alcance de la investigación.....	10
1.10.1 Esquema de actividades en función a la perspectiva. ....	12
1.10.2 Análisis de resultados.....	12

## **CAPÍTULO II**

### **ANÁLISIS DEL MEJORAMIENTO EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS UTILIZANDO CAUCHO GRANULAR**

	<b>Página</b>
2.1 Principales tipos de suelos .....	14
2.2 Identificación de suelos.....	14
2.2.1 Textura del suelo .....	15
2.2.2 Porosidad.....	16
2.2.3 Capacidad de saturación de agua .....	16
2.3 Teoría de las arcillas.....	17
2.3.1 Características de las arcillas .....	17
2.3.2 Clasificación de las arcillas .....	18
2.3.3 Origen de las arcillas.....	18
2.3.3.1 Suelos arcillosos e ingeniería civil.....	19
2.3.4 Propiedades físico – químicas de las arcillas .....	20
2.3.5 Flujo de agua en los suelos arcillosos .....	21
2.4 Estabilización de suelos .....	24
2.4.1 Concepto de estabilización.....	24
2.4.2 Alternativas para contrarrestar el efecto de suelos arcillosos .....	24
2.4.3 Propiedades que se mejoran.....	25
2.4.4 Tipos de estabilización.....	26
2.4.5 Tipos de ensayos .....	26
2.4.5.1 Ensayo de laboratorio.....	26

2.4.5.2 Ensayo In Situ .....	26
2.4.6 Normas para los ensayos .....	26
2.5 Límites de consistencia .....	27
2.5.1 Plasticidad de los suelos .....	28
2.5.2 Índice de plasticidad .....	28
2.5.3 Límite Líquido .....	29
2.5.4 Límite Plástico .....	29
2.6. Sistema de clasificación de suelos. ....	30
2.6.1. Sistema de clasificación AASHTO .....	30
2.6.2 Características de los suelos clasificados según el sistema AASHTO .....	33
2.6.3 Sistema de clasificación Unificada .....	35
2.7 Compactación de los suelos .....	38
2.7.1 Principios básicos de la Compactación .....	38
2.7.1.1 Curvas de compactación .....	39
2.7.2 Pruebas de compactación .....	39
2.7.2.1 Proctor Modificado .....	40
2.7.2.1.1 Métodos Dinámicos .....	40
2.7.2.1.2 Métodos Estáticos .....	40
2.7.3 Valor Soporte California (CBR) .....	40
2.8 Antecedentes Generales del caucho .....	41
2.8.1 Composición de neumáticos .....	42
2.8.2 Clasificación de cauchos .....	43
2.8.2.1 Caucho Natural .....	43
2.8.2.2 Caucho sintético .....	43
2.8.2.3 Neopreno .....	43
2.8.2.4 Caucho isobutileno - isopreno .....	43
2.8.2.5 Butadieno – Estireno .....	44
2.8.2.6 Polibutadieno .....	44
2.8.3 Métodos de reciclaje .....	44
2.8.3.1 Trituración mecánica .....	44
2.8.3.2 Trituración criogénica .....	45
2.8.3.3 Termólisis .....	45

2.8.3.4 Pirólisis.....	45
2.8.4 Propiedades del caucho.....	46
2.8.4.1 Propiedades físicas y químicas.....	47
2.8.5 Usos tras el reciclado .....	49
2.9 Pavimento.....	49
2.9.1 Pavimentos flexibles .....	49
2.9.2 Pavimentos rígidos .....	51
2.9.3 Componentes estructurales.....	52
2.9.3.1 Subrasante .....	52
2.9.3.2 Subbase .....	53
2.9.3.3 Base.....	53
2.9.3.4 Capa de rodadura.....	53
2.10 Definición de términos básicos .....	53

### **CAPÍTULO III**

#### **APLICACIÓN PRÁCTICA**

	<b>Página</b>
3.1 Ubicación del proyecto .....	55
3.1.1 Características de la zona de estudio.....	55
3.2 Muestreo zona de estudio: Tramo 2da circunvalación.....	56
3.3 Toma de muestras de suelo .....	57
3.3.1 Extracción de muestras mediante calicatas .....	57
3.3.1.1 Muestras alteradas en calicatas .....	57
3.4 Metodología del caucho granular.....	58
3.4.1 Análisis granulométrico (ASTM D 422 - AASHTO T-88) .....	59
3.4.1.1 Análisis granulométrico del caucho .....	64
3.4.1.2 Determinación del contenido de humedad natural.....	64
3.4.2 Límite líquido (ASTM D 4318 - AASHTO T-89).....	65
3.4.3 Límite plástico (Nomas ASTM D 4318 y AASHTO T-90).....	68
3.4.4 Índice de plasticidad.....	69
3.4.5 Clasificación S.U.C.S (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) .....	72
3.4.6 Clasificación de suelos según Aashto M-145 .....	73

3.4.7 Compactación Proctor modificado (Norma ASTM D-1557) .....	75
3.4.8 Determinación del valor soporte (CBR) California bearing ratio (Normas ASTM D-1883 y AASHTO T-193) .....	78
3.5 Estabilización suelo – suelo .....	83
3.5.1 Lugar de extracción del suelo fino .....	83
3.5.2 Caracterización y clasificación del suelo aluvial .....	83
3.5.3 Compactación de la combinación del suelo con aluvial.....	84
3.5.4 CBR y expansión de la combinación del suelo con aluvial.....	85
3.5.5 Procedimiento para el mejoramiento del suelo fino combinado con suelo aluvial .	85
3.5.5.1 Procedimiento para la compactación del suelo natural combinado con suelo aluvial.....	85
3.5.5.2 Procedimiento de la relación de soporte California CBR del suelo natural combinado con suelo aluvial.....	86
3.5.5 Resumen de resultados de los ensayos de suelo - aluvial .....	87
3.5.5.1 Análisis de resultados de los ensayos de suelo A-6 (12) – aluvial .....	87
3.5.6 Porcentaje recomendable de suelo aluvial para el suelo A-6 (12).....	88
3.6 Presupuesto técnico económico suelo – suelo, suelo – caucho.....	89
3.6.1 Precio unitario suelo - suelo. ....	89
3.6.2 Precio unitario suelo – caucho. ....	89
3.7 Especificaciones técnicas del caucho.....	91

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

	<b>Página</b>
4.1 Presentación de resultados .....	95
4.2 Análisis de resultados.....	99
4.3 Análisis del suelo .....	100
4.4 Análisis de comparación de los ensayos de compactación realizados con el caucho granular reciclado en varios porcentajes.....	101
4.5 Análisis de comparación de los ensayos de CBR realizados con el caucho reciclado en varios porcentajes y sin adición de caucho.....	104
4.6 Análisis técnico económico suelo – suelo y suelo – caucho.....	109
4.7 Verificación de hipótesis.....	110

**CAPÍTULO V**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

	<b>Página</b>
5.1 Conclusiones .....	111
5.2 Recomendaciones.....	115

**BIBLIOGRAFÍA**

ANEXOS

ANEXO I	DATOS DE ENSAYOS REALIZADOS
ANEXO II	FOTOGRAFÍAS DE ENSAYOS
ANEXO III	FICHA TÉCNICA



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Página</b>
<b>Tabla 1.1</b> Variable independiente .....	5
<b>Tabla 1.2</b> Variable dependiente.....	5
<b>Tabla 1.3</b> Nivel de confianza.....	8
<b>Tabla 1.4</b> Confiabilidad.....	8
<b>Tabla 1.5</b> Muestreo estratificado.....	9
<b>Tabla 2.1</b> Índice de plasticidad de suelos .....	28
<b>Tabla 2.2</b> Clasificación de suelos granulares por el sistema AASHTO. ....	32
<b>Tabla 2.3</b> Clasificación de suelos finos por el sistema AASHTO.....	33
<b>Tabla 2.4</b> Símbolos de grupo según el sistema de clasificación Unificada. ....	35
<b>Tabla 2.5</b> Tipología de suelos según el sistema de clasificación Unificada.....	35
<b>Tabla 2.6</b> Clasificación de suelos gruesos por el sistema de clasificación Unificada. ....	37
<b>Tabla 2.7</b> Clasificación de suelos finos por el sistema de clasificación Unificada. ....	37
<b>Tabla 2.8</b> Proctor Modificado .....	40
<b>Tabla 2.9</b> Composición típica de la llanta .....	42
<b>Tabla 2.10</b> Propiedades mecánicas del Caucho Natural y del Polibutadieno .....	47
<b>Tabla 3.1</b> Coordenadas UTM.....	57
<b>Tabla 3.2</b> Clasificación de suelos arcillosos, sistema AASHTO .....	61
<b>Tabla 3.3</b> Granulometría del punto 1 .....	62
<b>Tabla 3.4</b> Resumen de resultados de la granulometría.....	63
<b>Tabla 3.5</b> Granulometría de caucho granular .....	64
<b>Tabla 3.6</b> Contenido de humedad.....	65
<b>Tabla 3.7</b> Límite líquido punto 1.....	71
<b>Tabla 3.8</b> Límite plástico punto 1 .....	71
<b>Tabla 3.9</b> Índice de plasticidad punto 1.....	72
<b>Tabla 3.10</b> Resultados de los ensayos de límites de Atterberg .....	72
<b>Tabla 3.11</b> Resultados de clasificación de los suelos por S.U.C.S. ....	73
<b>Tabla 3.12</b> Resultados de clasificación de los suelos por AASHTO .....	75
<b>Tabla 3.13</b> Compactación Punto 1 al 0% de caucho .....	77
<b>Tabla 3.14</b> Resultados de la compactación del punto 1 .....	78

<b>Tabla 3.15</b> Resumen Densidad y humedad óptima.....	78
<b>Tabla 3.16</b> CBR Punto 1 al 0% de caucho .....	81
<b>Tabla 3.17</b> Valor de CBR del punto 1 .....	82
<b>Tabla 3.18</b> CBR en condiciones normales y con diferentes porcentajes .....	83
<b>Tabla 3.19</b> Resultados del análisis granulométrico del suelo aluvial.....	84
<b>Tabla 3.20</b> Clasificación del suelo aluvial .....	84
<b>Tabla 3.21</b> Resultados del ensayo de compactación del suelo combinado con distintos porcentajes de suelo aluvial. ....	84
<b>Tabla 3.22</b> Resultados del ensayo de CBR y expansión del suelo combinado con distintos porcentajes de suelo aluvial.....	85
<b>Tabla 3.23</b> Resumen de las características mecánicas del suelo combinado con distintos porcentajes de suelo aluvial.....	87
<b>Tabla 3.24</b> Cantidad recomendable de suelo aluvial para el suelo A-6 (12).....	88
<b>Tabla 3.25</b> Clasificación de la subrasante, según el valor de CBR. ....	88
<b>Tabla 3.26</b> Presupuesto de una estabilización suelo - suelo.....	89
<b>Tabla 3.27</b> Presupuesto de una estabilización suelo - caucho.....	90
<b>Tabla 4.1</b> Clasificación de suelos.....	95
<b>Tabla 4.2</b> Densidad max y contenido de humedad óptimo a diferentes porcentajes .....	95
<b>Tabla 4.3</b> CBR en diferentes porcentajes .....	95
<b>Tabla 4.4</b> Porcentaje de material que pasa según el diámetro del tamiz de calicata P1..	96
<b>Tabla 4.5</b> Porcentaje de material que pasa según el diámetro del tamiz de calicata P5..	96
<b>Tabla 4.6</b> Porcentaje de material que pasa según el diámetro del tamiz de calicata P10	97
<b>Tabla 4.7</b> Resumen del contenido de humedad de los P1, P5 y P10.....	97
<b>Tabla 4.8</b> Límites de Atterberg de calicatas P1, P5, P10. ....	97
<b>Tabla 4.9</b> Datos de ensayo Proctor Modificado (0% caucho).....	98
<b>Tabla 4.10</b> Datos de ensayo Proctor modificado (5% caucho) .....	98
<b>Tabla 4.11</b> Datos de ensayo Proctor modificado (10% caucho) .....	98
<b>Tabla 4.12</b> Datos de ensayo Proctor modificado (15% caucho) .....	98
<b>Tabla 4.13</b> Capacidad de soporte a condiciones normales.....	99
<b>Tabla 4.14</b> Capacidad de soporte con adición 5% de caucho granular .....	99
<b>Tabla 4.15</b> Capacidad de soporte con adición 10% de caucho granular .....	99
<b>Tabla 4.16</b> Capacidad de soporte con adición 15% de caucho granular .....	99

<b>Tabla 4.17</b> Características del suelo de la avenida 2da circunvalación, y su clasificación según AASHTO y SUCS. ....	100
<b>Tabla 4.18</b> Valores óptimos de Densidad seca y Contenido de humedad .....	101
<b>Tabla 4.19</b> Valores de CBR a diferentes porcentajes.....	105
<b>Tabla 4.20</b> CBR máximo y % de caucho óptimo.....	109
<b>Tabla 4.21</b> Comparación de precios.....	109

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Página</b>
<b>Figura 2.1</b> Arcillas: Partículas menores a $2 \mu$ .....	18
<b>Figura 2.2</b> Tipos de suelos arcillosos .....	19
<b>Figura 2.3</b> Coeficiente de permeabilidad .....	21
<b>Figura 2.4</b> Grado de permeabilidad.....	23
<b>Figura 2.5</b> Estados de consistencia del suelo y límites de Atterberg .....	27
<b>Figura 2.6</b> Aparato de casa grande.....	29
<b>Figura 2.7</b> Prueba de limite plástico.....	30
<b>Figura 2.8</b> Carta de plasticidad.....	36
<b>Figura 2.9</b> Representación gráfica de la densidad máxima seca vs humedad óptima .....	39
<b>Figura 2.10</b> Estructura del Polibutadieno.....	44
<b>Figura 2.11</b> Trituración de Neumáticos .....	45
<b>Figura 2.12</b> Reciclaje con residuos de neumáticos máquina de pirolisis.....	46
<b>Figura 2.13</b> Pavimento flexible.....	50
<b>Figura 2.14</b> Pavimento flexible de concreto asfaltico.....	50
<b>Figura 2.15</b> Pavimento Rígido .....	51
<b>Figura 3.1</b> Departamento de Tarija-Geografía.....	55
<b>Figura 3.2.</b> Ubicación de las zonas de estudio .....	56
<b>Figura 3.3</b> Puntos de extracción de muestras .....	58
<b>Figura 3.4</b> Curva granulométrica de la muestra P1 .....	62
<b>Figura 3.5</b> Curva granulométrica de la muestra de caucho.....	64
<b>Figura 3.6</b> Carta de Plasticidad .....	70
<b>Figura 3.7</b> Clasificación de Suelos según Índice de Plasticidad .....	70
<b>Figura 3.8</b> Limite liquido de la muestra P1 .....	71
<b>Figura 3.9</b> Carta de plasticidad de Casagrande (S.U.C.S.) .....	73
<b>Figura 3.10</b> Clasificación de suelos arcillosos, sistema AASHTO.....	74
<b>Figura 3.11</b> Compactación 0% de Caucho Punto 1 .....	77
<b>Figura 3.12</b> Curva carga – penetración .....	82
<b>Figura 3.13</b> CBR – Peso unitario .....	82
<b>Figura 4.1</b> Contenido de humedad óptimo con varios % de caucho Punto 1 .....	101
<b>Figura 4.2</b> Contenido de humedad con varios % de caucho Punto 5.....	102

<b>Figura 4.3</b> Contenido de humedad con varios % de caucho Punto 10.....	102
<b>Figura 4.4</b> Densidad máxima seca con varios % de caucho Punto 1 .....	103
<b>Figura 4.5</b> Densidad máxima seca con varios % de caucho Punto 5 .....	103
<b>Figura 4.6</b> Densidad máxima seca con varios % de caucho Punto 10 .....	104
<b>Figura 4.7</b> CBR vs % Caucho Punto 1 .....	105
<b>Figura 4.8</b> CBR vs % Caucho Punto 5.....	106
<b>Figura 4.9</b> CBR vs % Caucho Punto 10.....	107
<b>Figura 4.10</b> Curva CBR – Caucho granular Punto 1.....	107
<b>Figura 4.11</b> Curva CBR – Caucho granular Punto 5.....	108
<b>Figura 4.12</b> Curva CBR – Caucho granular Punto 10.....	108