

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”**  
**SECRETARÍA DE EDUCACIÓN CONTINUA**  
**DIRECCIÓN DE POSGRADO**  
**DOCTORADO EN CIENCIAS**



**TESIS DE DOCTORADO**

**INVESTIGACIÓN TEÓRICA EXPERIMENTAL DE LA  
CONSOLIDACIÓN DE LAS ARCILLAS,  
CON REFERENCIA PARTICULAR A LAS DEL VALLE  
CENTRAL DE TARIJA**

**Autor:** Laura Karina Soto Salgado

**Tutor:** Ph. D. Ing. Iván Fernando Otálvaro Calle

Tesis de doctorado, presentada a consideración de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, como requisito para optar el título de Doctor en Ciencias

**Tarija – Bolivia**  
**2024**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN CONTINUA  
DIRECCIÓN DE POSGRADO  
DOCTORADO EN CIENCIAS**

**TESIS DE DOCTORADO**

**INVESTIGACIÓN TEÓRICA EXPERIMENTAL DE LA  
CONSOLIDACIÓN DE LAS ARCILLAS,  
CON REFERENCIA PARTICULAR A LAS DEL VALLE  
CENTRAL DE TARIJA**

**Autor: Laura Karina Soto Salgado**

**Tutor: Ph. D. Ing. Iván Fernando Otálvaro Calle**

Tesis de doctorado, presentada a consideración de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, como requisito para optar el título de Doctor en Ciencias

**Tarija – Bolivia**

**2024**

**HOJA DE APROBACIÓN**  
**INVESTIGACIÓN TEÓRICA EXPERIMENTAL DE LA CONSOLIDACIÓN**  
**DE LAS ARCILLAS, CON REFERENCIA PARTICULAR A LAS DEL**  
**VALLE CENTRAL DE TARIJA**

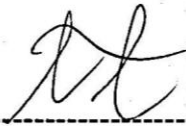
**Postulante:**

Laura Karina Soto Salgado

**Tutor:**

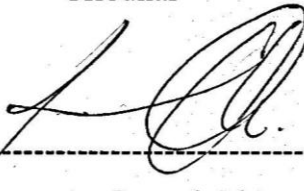
Ph.D. Ing. Iván Fernando Otálvaro Calle

**Tribunal Calificador:**



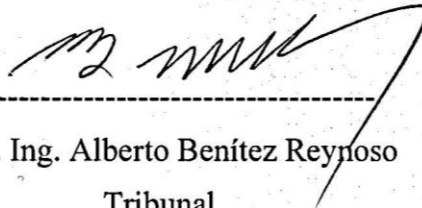
-----  
Ph.D. Ing. María Alejandra Leigue Fernández

Tribunal



-----  
D.Sc. Ing. Rosemary Janneth Llanque Ayala

Tribunal



-----  
Ph. D. Ing. Alberto Benítez Reynoso

Tribunal

Tarija, mayo de 2024

## **ADVERTENCIA**

El tribunal calificador del presente trabajo de tesis de doctorado, no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidas en el mismo, siendo éstas responsabilidad del autor.

## **DEDICATORIA**

A mi familia por darme la fortaleza para seguir adelante y ayudarme en mi formación, brindándome su apoyo en todos los momentos más difíciles de mi vida... Gracias!!!

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por bendecirme y guiar cada uno de mis pasos para lograr mis propósitos.

A mi adorada Danita y mi querido Armando...Gracias por confiar siempre en mí, por su amor incondicional, por su paciencia y por estar siempre a mi lado, a pesar de no haberles dedicado estos años el tiempo que se merecen.

A mi Tribunal, en especial al Ph. D. Alberto Benítez Reynoso. por aceptar encaminar esta investigación, por regalarme su tiempo, su conocimiento y alentarme en todo momento sin su apoyo no hubiese podido llegar a esta instancia tan anhelada.

A todas las personas que me colaboraron para realizar mi tesis, ¡muchas gracias!!!

## **PENSAMIENTO**

“Si lo puedes soñar, lo puedes lograr”.

WALT DISNEY

## ÍNDICE DE CONTENIDO

|                          | <b>Página</b> |
|--------------------------|---------------|
| HOJA DE APROBACIÓN ..... | i             |
| ADVERTENCIA .....        | ii            |
| DEDICATORIA .....        | iii           |
| AGRADECIMIENTO.....      | iv            |
| PENSAMIENTO.....         | v             |
| RESUMEN.....             | xiv           |

### **CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN**

|   |   |
|---|---|
| 1.1 Antecedentes .....                  | 1 |
| 1.2 Descripción de la problemática..... | 4 |
| 1.3 Objetivos .....                     | 6 |
| 1.4 Hipótesis.....                      | 7 |

### **CAPÍTULO II FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

|   |    |
|---|----|
| 2.1 Fenómeno de cambio volumétrico .....                                  | 9  |
| 2.2 Consolidación.....  | 11 |
| 2.2.1 Principio de la consolidación .....                                 | 18 |
| 2.2.2 Comportamiento del cambio volumétrico.....                          | 23 |
| 2.2.3 Comportamiento general del cambio de volumen de los suelos .....    | 24 |
| 2.3 Prueba de consolidación de laboratorio unidimensional.....            | 26 |
| 2.4 Arcillas normalmente consolidadas y sobreconsolidadas .....           | 30 |
| 2.4.1 La razón o grado de sobreconsolidación (OCR) .....                  | 34 |
| 2.4.1.1 Método de Oikawa (1987) .....                                     | 35 |
| 2.4.1.2 Correlaciones empíricas para la presión de preconsolidación ..... | 37 |



|   | <b>Página</b> |
|---|---------------|
| 2.4.1.3 Correlaciones empíricas para la relación de sobreconsolidación.....                   | 38            |
| 2.5 Índice de compresión .....  | 39            |
| 2.6 Índice de recompresión $C_r$ .....  | 42            |
| 2.7 Índice de abultamiento $C_s$ .....  | 45            |
| 2.8 Efecto de la perturbación de las muestras en la curva e versus $\log \sigma'$ . ....      | 46            |
| 2.9 Coeficiente de consolidación .....  | 50            |
| 2.10 Cálculo de asentamiento a partir de una consolidación primaria en una<br>dimensión. .... | 51            |
| 2.10.1 Asentamiento a partir de la consolidación secundaria .....                             | 54            |
| 2.11 Tasa de consolidación. ....  | 56            |
| 2.12 Correlación y regresión simple .....   | 59            |

### **CAPÍTULO III**

#### **MATERIALES Y MÉTODOS**

|   |    |
|---|----|
| 3.1 El Valle central de Tarija .....                          | 72 |
| 3.1.1 Aspectos de ocupación del territorio.....               | 75 |
| 3.2 Programa experimental .....                               | 77 |
| 3.2.1 Ubicación de la zona .....                              | 78 |
| 3.2.2 Coordenadas de los puntos en estudio .....              | 79 |
| 3.3. Caracterización de la zona .....                         | 80 |
| 3.3.1. Muestreo de suelos.....                                | 80 |
| 3.3.2. Extracción de muestras de suelo .....                  | 80 |
| 3.3.3 Propiedades índice .....                                | 81 |
| 3.3.4 Propiedades mecánicas.....                              | 82 |
| 3.3.4.1 Consolidómetro digital (edómetro) marca ACE EmS ..... | 83 |
| 3.3.4.2 Ventajas de edómetro automático computarizado .....   | 89 |
| 3.3.4.3 Cálculo de los parámetros de compresibilidad.....     | 89 |

## **CAPÍTULO IV RESULTADOS**

|   | <b>Página</b> |
|---|---------------|
| 4.1 Caracterización básica de los suelos e indicadores estadísticos.....                                | 92            |
| 4.2 Las Arcillas y Limos del Valle Central de Tarija en la Carta de plasticidad .....                   | 100           |
| 4.3 Determinación experimental del módulo edometrico, <i>Em</i> .....                                   | 105           |
| 4.4 Clasificación de las arcillas del Valle Central de Tarija en función de la<br>compresibilidad ..... | 114           |
| 4.5 Variación de los asentamientos en función de la profundidad.....                                    | 117           |
| 4.6 Modelos Constitutivos .....   | 119           |
| 4.7 Correlaciones y modelos matemáticos.....  | 123           |

## **CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

|   |     |
|---|-----|
| 5.1 Conclusiones .....                        | 126 |
| 5.2 Recomendaciones.....                      | 129 |
| 5.3 Futuras líneas de investigación .....     | 129 |
| 5.4 Aporte original de la investigación ..... | 129 |
| BIBLIOGRAFÍA.....                             | 131 |

## ÍNDICE DE CUADROS

|   | <b>Página</b> |
|---|---------------|
| Cuadro 1.1 Parámetros y variables obtenidas de la prueba de compresión confinada.                           | 3             |
| Cuadro 2.1 Mecanismos de preconsolidación de depósitos horizontales sometidos a tensiones geoestáticas..... | 32            |
| Cuadro 2.2 Relaciones empíricas para $C_c$ .....  | 41            |
| Cuadro 2.3 Valores típicos de $C_c$ y $C_r$ de algunas arcillas naturales.....                              | 44            |
| Cuadro 2.4 Correlaciones para $C_r$ .....   | 44            |
| Cuadro 2.5 Compresión y abultamiento de suelos naturales. ....  | 45            |
| Cuadro 2.6 Variación del factor tiempo con el grado de consolidación. ....                                  | 58            |
| Cuadro 3.1 Coordenadas de la ubicación de los puntos.....   | 79            |
| Cuadro 3.2 Datos de deformación y presión. ....   | 87            |
| Cuadro 3.3 Datos para graficar la curva de compresibilidad. ....  | 89            |
| Cuadro 3.4 Resumen de factores de compresibilidad. ....   | 90            |
| Cuadro 4.1 Resumen total estadístico 1m.....  | 94            |
| Cuadro 4.2 Resumen total estadístico 2m.....  | 95            |
| Cuadro 4.3 Resumen total estadístico 3m.....  | 96            |
| Cuadro 4.4 Resumen total estadístico 1m arcillas .....  | 97            |
| Cuadro 4.5 Resumen total estadístico 1m limos .....   | 98            |
| Cuadro 4.6 Resumen total estadístico 2m arcillas .....  | 99            |
| Cuadro 4.7 Módulo Edométrico, Arcillas 1m de profundidad.....   | 107           |
| Cuadro 4.8 Módulo Edométrico, Limos 1m de profundidad.....  | 109           |
| Cuadro 4.9 Módulo Edométrico, Arcillas 2m de profundidad.....   | 111           |
| Cuadro 4.10 Módulo Edométrico, Limos 2m de profundidad.....   | 112           |
| Cuadro 4.11 Módulo Edométrico, Arcillas a 3m de profundidad.....  | 112           |
| Cuadro 4.12 Resumen Total; Módulo Edométrico, arcillas.....   | 113           |
| Cuadro 4.13 Resumen Total; Módulo Edométrico, limos .....   | 114           |
| Cuadro 4.14 Clasificación de la compresibilidad .....   | 115           |

**Página**

Cuadro 4.15 Clasificación de las muestras en función de la compresibilidad para una profundidad de 1 metro ..... 115

Cuadro 4.16 Clasificación de las muestras en función de la compresibilidad para una profundidad de 2 metros..... 116

Cuadro 4.17 Clasificación de las muestras en función de la compresibilidad para una profundidad de 3 metros..... 116

Cuadro 4.18 Resumen profundidad – asentamiento ..... 118

Cuadro 4.19 Determinación de coeficientes del modelo constitutivo, Arcillas a 1m de profundidad ..... 120

Cuadro 4.20 Determinación de coeficientes del modelo constitutivo, Limo 1m de profundidad ..... 121

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   | <b>Página</b> |
|---|---------------|
| Figura 2.1 Capa de arcilla en proceso de consolidación. ....  | 12            |
| Figura 2.2 Modelo cilindro-resorte Analogía de resorte y pistón aplicada a la consolidación.....                                  | 20            |
| Figura 2.3 Variación del esfuerzo total, la presión de agua intersticial y el esfuerzo efectivo en una capa de arcilla. ....      | 21            |
| Figura 2.4 Variación del esfuerzo total, la presión de agua intersticial y el esfuerzo efectivo.....                              | 22            |
| Figura 2.5. Relaciones idealizadas de tensión efectiva y la relación de vacíos para un suelo compresible.....                     | 23            |
| Figura 2.6. Curvas de compresión de varios suelos. ....   | 24            |
| Figura 2.7 Relaciones idealizadas de tensión efectiva y la relación de vacíos para un suelo compresible.....                      | 25            |
| Figura 2.8 Diagrama esquemático de un consolidómetro.....   | 26            |
| Figura 2.9 Grafica deformación en función del tiempo. ....  | 28            |
| Figura 2.10 Curva edométrica.....   | 29            |
| Figura 2.11 Presión de preconsolidación .....   | 31            |
| Figura 2.12 Curvas de compresión correspondientes a distintos momentos en la etapa final de la consolidación primaria. ....       | 34            |
| Figura 2.13 Procedimiento gráfico para determinar la presión de preconsolidación..  | 35            |
| Figura 2.14 Procedimiento mediante Oikawas para estimar $\sigma_c'$ .....   | 36            |
| Figura 2.15 Presión de preconsolidación. ....   | 40            |
| Figura 2.16 Efecto de la alteración de la muestra en la curva e frente a $\log \sigma'$ : (a) suelo normalmente consolidado. .... | 43            |
| Figura 2.17 Efecto de la alteración de la muestra en la curva e frente a $\log \sigma$ : (b) suelo sobreconsolidado.....          | 46            |
| Figura 2.18 Cambio en la sensibilidad con la consolidación para varias arcillas. ....   | 48            |

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.19 Método de logaritmo de tiempo para determinar el coeficiente de consolidación.....                                      | 50 |
| Figura 2.20 Método de logaritmo de tiempo para determinar el coeficiente de consolidación.....                                      | 52 |
| Figura 2.21 Variación de $e$ con $\log t$ bajo un incremento de carga dado y la definición del índice de compresión secundaria..... | 54 |
| Figura 2.22 Variación de $U_z$ con $T_v$ y $z/H_{dr}$ .....   | 58 |
| Figura 3.1 Ubicación del VCT en el Departamento de Tarija. ....   | 73 |
| Figura 3.2 Ubicación del VCT en el Departamento de Tarija. ....   | 76 |
| Figura 3.3 Programa experimental de esta investigación.....   | 77 |
| Figura 3.4 Ubicación Distrito 12.....   | 78 |
| Figura 3.5 Extracción de muestras. ....   | 81 |
| Figura 3.6 Caracterización de las muestras.....   | 82 |
| Figura 3.7 Preparación de muestras. ....  | 83 |
| Figura 3.8 Saturación de muestras. ....   | 83 |
| Figura 3.9 Edómetro ACE EmS.....  | 84 |
| Figura 3.10 Partes de la celda de confinamiento.....  | 84 |
| Figura 3.11 Panel principal. ....   | 85 |
| Figura 3.12 Panel para los datos de la muestra. ....  | 86 |
| Figura 3.13 Panel de programación de presiones y tiempo para la prueba.....   | 86 |
| Figura 3.14 Panel de Inicio de la Prueba.....   | 87 |
| Figura 3.15 Consolidación – deformación vs tiempo. ....   | 88 |
| Figura 3.16 Índice de compresión $C_c$ , índice de recompresión $C_s$ y esfuerzo de preconsolidación. ....                          | 90 |

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

|   | <b>Página</b> |
|---|---------------|
| Gráfica 4.1 Carta de Plasticidad, totalidad de las muestras ..... | 102           |
| Gráfica 4.2 Carta de Plasticidad Arcillas .....                   | 102           |
| Gráfica 4.3 Carta de Plasticidad Limos.....                       | 103           |
| Gráfica 4.4 Carta de Plasticidad muestras a 1m.....               | 103           |
| Gráfica 4.5 Carta de Plasticidad muestras a 2m.....               | 104           |
| Gráfica 4.6 Carta de Plasticidad a 3m.....                        | 104           |
| Gráfica 4.7 Determinación de <b><i>Em</i></b> .....               | 105           |
| Gráfica 4.8 Modelo de ajuste asentamiento - profundidad .....     | 117           |
| Gráfica 4.9 Modelo de ajuste asentamiento - profundidad .....     | 118           |
| Gráfica 4.10 Modelo de ajuste esfuerzo – deformación .....        | 120           |
| Gráfica 4.11 Modelo de ajuste Asentamiento – OCR.....             | 123           |