



**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**  
*La Universidad Católica de Loja*

**ÁREA TÉCNICA**

**TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**Estudios de asentamientos por consolidación instantánea, primaria y secundaria en suelos arcillosos de alta plasticidad del Cantón Catamayo de la provincia de Loja.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN.**

**AUTOR:** Guerrero Riofrío, Cosme David.

**DIRECTOR:** Tapia Chávez, Ángel Guillermo, M.Sc.

**CODIRECTOR:** Soto Luzuriaga, John Egverto, M.Sc.

**LOJA - ECUADOR**

**2017**



*Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>*

2017

## APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

M.Sc.  
Ángel Guillermo Tapia Chávez

### DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: **“Estudios de asentamientos por consolidación instantánea, primaria y secundaria en suelos arcillosos de alta plasticidad del Cantón Catamayo de la provincia de Loja.”** realizado por Guerrero Riofrío, Cosme David ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, septiembre de 2017

f) -----

## DECLARACIÓN DE AUTORIA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo Guerrero Riofrío Cosme David declaro ser autor del presente trabajo de titulación: **Estudios de asentamientos por consolidación instantánea, primaria y secundaria en suelos arcillosos de alta plasticidad del Cantón Catamayo de la provincia de Loja** de la Titulación de Ingeniería Civil, siendo el M.Sc. Ángel Guillermo Tapia Chávez director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad

f) -----

Autor: Guerrero Riofrío Cosme David

Cédula: 1104115959

## DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado primeramente a Dios, por guiarme durante este largo trayecto y haberme dado la sabiduría y fuerza para culminar con éxito esta etapa de estudios universitarios.

A mis queridos padres Blanca y Cosme, por brindarme su apoyo, confianza incondicional y ser el pilar fundamental de mi vida y por haber formado con su ejemplo a la persona que hoy en día soy.

A mis hermanos Patricia y Geovanny, por ser esos amigos incondicionales con los que he pasado gran parte de mi vida.

A mi novia Pamela, por acompañarme y ser parte de mi motivación por superarme y seguir adelante todos los días.

A toda mi familia, por formar parte de mi vida y haberme dado grandes alegrías.

A todas mis amigas y amigos, con los que he compartido grandes momentos durante esta etapa de mi vida.

## **AGRADECIMIENTO**

Estoy inmensamente agradecido con mis padres Blanca Riofrío y Cosme Guerrero, por su amor incondicional, por todas sus enseñanzas y por todos los sacrificios que han tenido que hacer por darme el estudio, por depositar su confianza en mí y ayudarme a cumplir esta meta y continuar alcanzando logros, también agradezco a mis hermanos por apoyarme durante mi vida estudiantil.

Agradezco a mi querida novia Pamela, que con su amor y paciencia ha colaborado para poder conseguir este logro y por apoyarme a seguir superándome.

Estoy agradecido con la Universidad Técnica particular de Loja, específicamente con los docentes del departamento de Geología y minas e Ingeniería Civil, en especial al director de este proyecto el M.Sc. Ángel Guillermo Tapia Chávez que como docente y amigo ha aportado en mi formación profesional, de igual manera agradezco al codirector de este proyecto el M.Sc. John Egverto Soto Luzuriaga, por su gran ayuda.

Gracias también a mis compañeros y amigos, por su apoyo tanto en aspectos académicos como en personales y espero seguir de igual manera durante esta nueva etapa de vida profesional.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARATULA .....	I
APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	II
DECLARACIÓN DE AUTORIA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	III
DEDICATORIA .....	IV
AGRADECIMIENTO .....	V
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>5</b>
<b>1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO .....</b>	<b>5</b>
1.1 Antecedentes.....	6
1.1.1 Investigaciones Previas.....	6
1.2 Problemática.....	6
1.3 Justificación.....	6
1.4 Objetivos.....	7
1.4.1 Objetivo General.....	7
1.4.2 Objetivos Específicos.....	7
1.5 Metodología.....	7
1.5.1 Recopilación de información.....	7
1.5.2 Trabajo de campo y ensayos de laboratorio.....	8
1.5.3 Interpretación y análisis de resultados obtenidos.....	8
1.6 Descripción y ubicación de la zona de estudio.....	9
1.6.1 Descripción de la zona de estudio.....	9
1.6.2 Ubicación de las zonas de estudio.....	9
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>11</b>
<b>2 MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>11</b>
2.1 Arcillas.....	12
2.1.1 Origen.....	12
2.1.2 Composición de las Arcillas.....	12
2.2 Consolidación de las Arcillas.....	12
2.2.1 Teorías sobre consolidación de las arcillas.....	13
2.2.1.1 Teoría de Terzaghi.....	13
2.2.1.2 Teoría de Davis y Raymond.....	13
2.2.1.3 Teoría de consolidación sujeta a pequeñas deformaciones.....	14
2.2.2 Índice de fluidez.....	14

2.2.3	Presión de preconsolidación.....	14
2.2.4	Presión de sobrecarga efectiva in situ. ....	15
2.2.5	Razón de sobreconsolidación OCR.....	16
2.2.6	Arcillas normalmente consolidadas.....	17
2.2.7	Arcillas sobreconsolidadas. ....	17
2.2.8	Resistencia cortante no drenada. ....	18
2.2.9	Módulo de Young. ....	19
2.2.10	Consolidación Primaria.....	21
2.2.11	Consolidación Secundaria.....	21
2.3	Tipos de cimentaciones.....	22
2.3.1	Cimentaciones superficiales. ....	22
2.3.2	Cimentaciones profundas. ....	22
2.4	Tipos de asentamientos. ....	22
2.4.1	Incremento de esfuerzos .....	23
2.4.2	Asentamientos Inmediato. ....	24
2.4.3	Asentamientos por consolidación primaria.....	26
2.4.4	Asentamientos por consolidación Secundaria.....	28
2.5	Análisis por fluorescencia de rayos X. ....	29
<b>CAPÍTULO III .....</b>		<b>30</b>
<b>3</b>	<b>TRABAJO DE CAMPO Y ENSAYOS DE LABORATORIO.....</b>	<b>30</b>
3.1	Trabajos de campo. ....	31
3.1.1	Reconocimiento de las zonas de muestreo. ....	31
3.1.2	Recolección de muestras.....	31
3.2	Ensayos de laboratorio.....	32
3.2.1	Granulometría.....	32
3.2.2	Límites de Atterberg. ....	33
3.2.3	Consolidación .....	33
3.2.4	Fluorescencia de rayos X .....	34
<b>CAPÍTULO IV.....</b>		<b>35</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CÁLCULOS DE ASENTAMIENTOS .....</b>	<b>35</b>
4.1	Análisis de resultados. ....	36
4.1.1	Límites de Atterberg. ....	36
4.1.2	Granulometría.....	37
4.1.3	Clasificación de suelos. ....	37
4.1.4	Ensayo de consolidación. ....	38
4.1.5	Ensayo de fluorescencia de rayos X.....	40
4.2	Cálculo de asentamientos.....	40
<b>CONCLUSIONES.....</b>		<b>59</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>		<b>61</b>

<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>62</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>64</b>
A.    Ensayos de clasificación de clasificación de suelos.....	65
B.    Ensayos de consolidación de suelos. ....	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de ubicación de las zonas de estudio (Datum WGS 84, Zona 17 S). ....	10
Figura 2: Suelo parcialmente saturado. ....	15
Figura 3: Suelo sumergido, con flujo de agua.....	16
Figura 4: Curva de consolidación de un estrato.....	17
Figura 5: Curva de consolidación de un estrato.....	18
Figura 6: Gráfica para estimación de $\beta$ .....	20
Figura 7: Comportamiento de Gráfica en consolidación primaria y secundaria. ....	21
Figura 8: Reconocimiento de zonas de muestreo – Banco de arcilla Sector Ingenio .....	31
Figura 9: Recolección de muestras alteradas – Sector La Vega. ....	31
Figura 10: Recolección de muestras inalteradas – Sector Colina de los Ceibos. ....	32
Figura 11: Muestras para ensayo de granulometría.....	32
Figura 12: Ensayo de límite líquido. ....	33
Figura 13: Ensayo de límite plástico. ....	33
Figura 14: Equipo de Consolidación .....	34
Figura 15: Ensayo de Fluorescencia de rayos X. ....	34
Figura 16: Clasificación de suelos SUCS.....	38
Figura 17: Geometría de la estructura vista en planta.....	41
Figura 18: Geometría de la estructura vista en elevación. ....	42
Figura 19: Áreas de aporte de carga de la estructura .....	43
Figura 20: Esquema de zapata – Caso 1.....	44
Figura 21: Esquema de zapata – Caso 2.....	52

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Coordenadas de ubicación de los puntos de muestreo.....	9
Tabla 2: Tipos de consolidación de suelos de acuerdo con el OCR.....	17
Tabla 3: Correlación aproximada entre IC, N60 y qu. ....	19
Tabla 4: Correlación aproximada entre IC, N60 y qu. ....	20
Tabla 5: Datos generales de las zonas de muestreo.....	36
Tabla 6: Resultados de límites de Atterberg muestras.....	37
Tabla 7: Resultados de granulometría .....	37
Tabla 8: Zonas de aplicación de ensayo de consolidación.....	38
Tabla 9: Parámetros obtenidos del ensayo de consolidación.....	39
Tabla 10: Resultados de fluorescencia de rayos X. ....	40
Tabla 11: Resultados de asentamientos zapata B2 – Caso 1. ....	50
Tabla 12: Resultados de asentamientos zapata C2 – Caso 1.....	50
Tabla 13: Asentamiento diferencial entre B2 – C2 Caso 1. ....	51
Tabla 14: Resultados de asentamientos zapata B2 – Caso 2. ....	57
Tabla 15: Resultados de asentamientos zapata C2 – Caso 2.....	58
Tabla 16: Asentamiento diferencial entre B2 – C2 Caso 2. ....	58

## RESUMEN

El estudio de asentamientos por consolidación en suelos de elevada plasticidad y compresibilidad del cantón Catamayo tuvo como fin determinar los parámetros que permitieron predecir el comportamiento de este tipo de suelos y prever las amenazas futuras por los cambios volumétricos que se presentan al estar sometidos a algún tipo de carga, dando como resultado mayor seguridad en las edificaciones.

Las muestras fueron obtenidas en los lugares previstos como zonas de expansión urbana según el registro catastral de la ciudad de Catamayo, tomando en cuenta sólo ocho zonas. Litológicamente estas muestras corresponden a arcilla, las cuales fueron sometidas a diferentes análisis de laboratorio con el objetivo de determinar sus principales características y parámetros necesarios para el cálculo de asentamientos instantáneos, asentamientos por consolidación primaria y asentamientos por consolidación secundaria.

Finalmente, con los parámetros obtenidos del ensayo de consolidación, se determinaron los asentamientos totales de una cimentación, mediante la propuesta y análisis de un modelo de cimentación teórico, desarrollado manualmente y mediante una hoja de cálculo.

**PALABRAS CLAVE:** asentamientos instantáneos, asentamientos por consolidación primaria, asentamientos por consolidación secundaria.

## **ABSTRACT**

The study of settlements by consolidation in soils of high plasticity and compressibility of the canton Catamayo had the purpose to determine the parameters that allowed to predict the behavior of this type of soils and to foresee the future threats by the volumetric changes that occur when being subjected to some type of load, resulting in greater safety in buildings.

The samples were obtained in the places provided as urban expansion zones according to the catastral registry of the city of Catamayo, considering only eight zones. Lithographically these samples correspond to clay, which were submitted to different laboratory analyzes to determine their main characteristics and parameters necessary for the calculation of instant settlements, settlements by primary consolidation and settlements by secondary consolidation.

Finally, with the parameters obtained from the consolidation test, the total settlements of a foundation were determined by proposing and analyzing a theoretical foundation model, developed manually and using a spreadsheet.

**KEYWORDS:** instant settlements, settlements by primary consolidation, settlements by secondary consolidation.

## INTRODUCCIÓN

Por lo general casi todas las estructuras civiles son implantadas en el suelo, siendo necesario conocer los comportamientos del mismo al estar sometido frente a una sollicitación de carga, uno de estos comportamientos es el asentamiento por consolidación de las arcillas el cual puede causar grandes daños en una estructura producto de las deformaciones ocasionadas por este fenómeno.

A pesar de existir un sin número de teorías que describen el fenómeno de consolidación, la más ajustada a la realidad es la propuesta por el Ingeniero Karl Terzagui mediante el ensayo de consolidación unidimensional del suelo, cuyo objetivo inicial es obtener las medidas de deformación del suelo bajo la aplicación de una carga, para posteriormente establecer la magnitud y tiempo en que se producirá un asentamiento.

En las normativas de construcción se encuentran especificados los valores máximos de asentamientos a los que una estructura puede llegar, de no ser tomados en cuenta la estructura podría llegar al colapsar, sin embargo, si se realizan los estudios pertinentes se puede prever las posibles deformaciones de los suelos arcillosos y ofrecer seguridad en las edificaciones y consecuentemente a la ciudadanía.

El problema principal del cual parte esta investigación es que los asentamientos por consolidación pueden causar desde pequeñas grietas hasta grandes deformaciones que ocasionan daños en una estructura. Por otra parte, en la zona de análisis no se han desarrollado investigaciones referentes al tema, por lo que no se poseen los datos suficientes para el cálculo de asentamientos por consolidación, que permitan establecer si la deformación de una estructura está dentro de los rangos permitidos por la normativa.

Es por esto que esta investigación está orientada a conocer el comportamiento de las arcillas de alta plasticidad del cantón Catamayo, durante las etapas de asentamientos instantáneos, por consolidación primaria y por consolidación secundaria, para obtener la magnitud del asentamiento total del suelo al estar bajo la acción de una carga de cimentación de peso considerable, como respuesta a factores adversos de cambios volumétricos, reducción de espacios vacíos y el grado de saturación del suelo en estudio.

Los lugares de análisis fueron seleccionados tomando en cuenta las posibles zonas de expansión urbana del cantón Catamayo, en las cuales se tomó muestras de suelo en estado alterado para caracterizar el suelo y obtener su composición y en estado inalterado para

realizar el ensayo de consolidación. Mediante los ensayos realizados, se han podido determinar los tipos de suelo existentes en la zona de estudio, su composición y sus principales propiedades, con las cuales se ha podido realizar el cálculo de la magnitud de asentamientos totales por consolidación del suelo.

Este estudio de los asentamientos por consolidación en suelos arcillosos permitirá determinar parámetros que servirán para el control de asentamientos en las edificaciones y tener mayor seguridad en las mismas, puesto que con estos parámetros se puede predecir el comportamiento de este tipo de suelos al estar sometidos a la acción de cargas de peso considerable y además servirán como referencia para la construcción de cualquier proyecto en la zona de estudio.

El desarrollo del presente proyecto se ha estructurado de la siguiente manera:

El Capítulo I contiene la descripción general del proyecto, en el cual se mencionan los principales elementos en los que se fundamenta este trabajo investigativo y el proceso metodológico a utilizar.

El capítulo II contiene la fundamentación teórica de los contenidos referentes al tema de estudio y respalda los procesos metodológicos utilizados para el desarrollo de esta investigación.

El capítulo III contiene los trabajos de campo realizados para la obtención de las muestras alteradas e inalteradas, destinadas a realizar los ensayos de laboratorio necesarios para la obtención de los resultados.

Y finalmente el capítulo IV contiene el análisis de los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio y el cálculo de asentamientos en una cimentación.

## **CAPÍTULO I**

### **1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO**

## **1.1 Antecedentes.**

Por lo general, en distintas edificaciones se pueden apreciar pequeñas grietas en las paredes, en algunos casos éstas son producto de los asentamientos por consolidación en terrenos arcillosos. Si bien es cierto la mayor parte de estas grietas son imperceptibles, pero cuando el problema de asentamientos es más grave, la estructura puede sufrir grandes daños que no sólo implican un gasto económico, sino que también ponen en juego la integridad de las personas.

### **1.1.1 Investigaciones Previas.**

A nivel local en el cantón Catamayo existe una investigación previa en la que se caracterizó las arcillas naturales del cantón (Loayza Arias, 2017), más no específicamente se obtuvieron los parámetros para el cálculo de asentamientos por consolidación. Esto se debe a que en la zona de estudio no ha existido un interés por estudiar este tema, puesto que en años anteriores no existían estatutos que exijan obtener estos parámetros antes de edificar cualquier tipo de estructura. De igual manera en la provincia de Loja se ha realizado un estudio para determinar las curvas de consolidación en las arcillas del sector sur de la ciudad (Guamán Armijos, 2006), en este estudio se han realizado ensayos por consolidación, pero sólo con el objetivo de obtener los coeficientes de consolidación como un parámetro más para caracterizar las arcillas, más no para el cálculo de asentamientos.

## **1.2 Problemática**

El problema radica en que los asentamientos por consolidación pueden producir desde pequeñas grietas hasta grandes deformaciones que ocasionan daños en una estructura. Conjuntamente a esto no ha existido un interés por estudiar los asentamientos por consolidación en el sector, puesto que gran parte de la población desconoce los daños que este fenómeno puede causar y además no se exige este tipo de estudio por parte de las entidades municipales, porque generalmente espera que se presente un incidente relevante para tomar conciencia sobre este tipo de fenómenos.

## **1.3 Justificación**

Los suelos arcillosos sometidos a carga tienden a deformarse, estas deformaciones pueden ser imperceptibles (sin riesgo de daño en la estructura), o pueden ser de gran consideración (provocando graves daños en la estructura), por lo que se debe cumplir con los límites de asentamientos permitidos por la normativa ecuatoriana de la construcción en el capítulo de seguridad estructural de edificaciones apartado de Geotecnia y Cimentaciones (NEC-SE-GC).

Las arcillas de alta plasticidad son más propensas a deformarse, es por esto que este estudio está orientado a obtener los parámetros de este tipo de suelos existentes en el cantón Catamayo, para predecir su comportamiento al estar sometido a cargas de distinta magnitud y verificar que los asentamientos de una estructura estén dentro del rango permitido luego de ser construida.

#### **1.4 Objetivos.**

##### **1.4.1 Objetivo General.**

Caracterizar los materiales arcillosos de la zona urbana de la ciudad de Catamayo para determinar los parámetros de asentamientos necesarios para el diseño de obras civiles.

##### **1.4.2 Objetivos Específicos.**

- Estudiar y analizar las propiedades de los suelos arcillosos de alta plasticidad que permitan determinar los asentamientos.
- Estudiar y analizar el comportamiento del suelo, cuando el terreno de fundación está sujeta a una carga de cimentación.

#### **1.5 Metodología.**

Para el presente trabajo de fin de titulación se utilizó una metodología cuantitativa fundamentada en un análisis experimental del tipo transeccional, con la finalidad de cumplir las necesidades y requerimientos de esta investigación. En este proyecto se proponen tres fases de trabajo, la fase inicial que corresponde a la recopilación de información sobre el tema de estudio, la fase secundaria relacionada al trabajo de campo y ensayos de laboratorio y la fase final referente a la interpretación y análisis de los resultados obtenidos. Todo esto permitió cumplir con el estudio de asentamientos instantáneos por consolidación primaria y secundaria en las arcillas de alta plasticidad del cantón Catamayo de la provincia de Loja.

##### **1.5.1 Recopilación de información**

Para dar cumplimiento a esta fase la meta principal fue obtener la mayor cantidad de textos y artículos científicos que contenían la información referente al tema, estos documentos permitieron recolectar la información necesaria para conocer el comportamiento de las arcillas de alta plasticidad al estar sometidas a una carga de cimentación y la consolidación que se produce durante el transcurso de este proceso de carga sobre una masa de suelo.

### **1.5.2 Trabajo de campo y ensayos de laboratorio**

Durante el desarrollo de esta fase, mediante el registro catastral y el mapa geológico del cantón Catamayo obtenidos del plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón, se determinaron las zonas de expansión urbana con presencia de bancos de arcilla y fueron seleccionados los lugares para la extracción de muestras, posteriormente mediante una visita de campo se realizó el reconocimiento de las zonas de muestreo para verificar las condiciones prestablecidas y finalmente proceder a la localización de los puntos de muestreo mediante un GPS Garmin Rino 110 y realizar la recolección de las muestras de arcillas en las zonas delimitadas.

Las zonas de muestreo corresponden a ocho puntos en los cuales durante el desarrollo de los trabajos de campo no existió ningún inconveniente, lo que permitió la exitosa recolección de las muestras de suelo en estado alterado, las cuales fueron trasladadas al laboratorio de suelos de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), con el fin de realizar la caracterización de suelos mediante los ensayos de: contenido de humedad (AASHTO T265-93), Límite líquido (AASHTO T89; ASTM D4318), Límite plástico (AASHTO T90; ASTM D4318) y Análisis granulométrico (AASHTO T88)

Con los resultados obtenidos luego de caracterizar las muestras de suelo, se seleccionan los lugares con presencia de arcillas de alta plasticidad que son los más propensos a deformarse tras aplicar una carga, y bajo este concepto extraer las muestras inalteradas que fueron destinadas a la aplicación del ensayo de consolidación unidimensional de suelos, para lo cual se utiliza un consolidómetro fijo con la aplicación de la Norma AASHTO T216; ASTM D2435.

Complementariamente a este análisis, de las mismas muestras recolectadas se realizó el ensayo de fluorescencia de rayos X, mediante el equipo BRUKER S1 y el método Mining Light Elements, a fin de conocer la composición mineralógica de las arcillas.

### **1.5.3 Interpretación y análisis de resultados obtenidos.**

Con los parámetros obtenidos en esta investigación se procede a determinar índices, coeficientes y módulos, los cuales son necesarios para obtener los asentamientos totales del suelo. Para los cálculos se desarrolló una hoja electrónica de Excel, con las fórmulas expuestas en el marco teórico y se resolvieron distintos casos de estudio tomado los datos de los 4 sectores analizados, sin embargo, si se requiere realizar un análisis con otras condiciones de carga y geometría de la cimentación la herramienta de cálculo queda a

disposición del departamento de Geología y Minas e Ingeniería Civil. Finalmente se redactaron las conclusiones y recomendaciones de este trabajo de fin de titulación.

## **1.6 Descripción y ubicación de la zona de estudio.**

### **1.6.1 Descripción de la zona de estudio.**

El Cantón Catamayo se encuentra a una altura media de 1300 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m), con una temperatura de entre 15 a 32 °C y un clima cálido seco, presenta un relieve con cotas que van desde 600 m.s.n.m en el interior del valle, hasta 2000 m.s.n.m en la periferia del valle y su principal fuente hidrográfica son los ríos Guayabal y Boquerón los cuales favorecen a la producción agrícola del sector (GAD Catamayo, 2012).

### **1.6.2 Ubicación de las zonas de estudio.**

Se han definido como áreas de estudio las zonas de expansión urbana que constan en el registro catastral del cantón Catamayo y que cuentan con la presencia de bancos de arcilla. Estos lugares han sido tomados en cuenta porque en ellos se fundarán nuevas edificaciones a futuro y se podrá prever los posibles daños por asentamientos y tomar las medidas pertinentes.

Las zonas de estudio se encuentran dentro de los límites territoriales del Cantón Catamayo, ubicado al noroeste de la provincia de Loja como se muestra en la figura 1, específicamente en los sectores de: Colina de los Ceibos, Los Tejares, El Ingenio, La Vega, Trapichillo, Petroecuador y La Unidad Judicial, las coordenadas de estos puntos se encuentran en la tabla 1.

Tabla 1: Coordenadas de ubicación de los puntos de muestreo.

Número	Lugar	Ubicación (UTM)	Código	Zona de expansión
1	Los Tejares	9558074, 0682077	c - 1	Tercera
2	Colina de los Ceibos	9557090, 0682743	c - 2	Tercera
3	Petro Ecuador	9558130, 0682517	c - 3	Tercera
4	Trapichillo (Café)	9560654, 0681315	c - 4	Primera
5	Trapichillo (Gris)	9560656, 0681357	c - 5	Primera
6	Ingenio	9561124, 0679666	c - 6	Segunda
7	La vega	9557148, 0679435	c - 7	Segunda
8	Unidad Judicial	9559670, 0681548	c - 8	Segunda

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

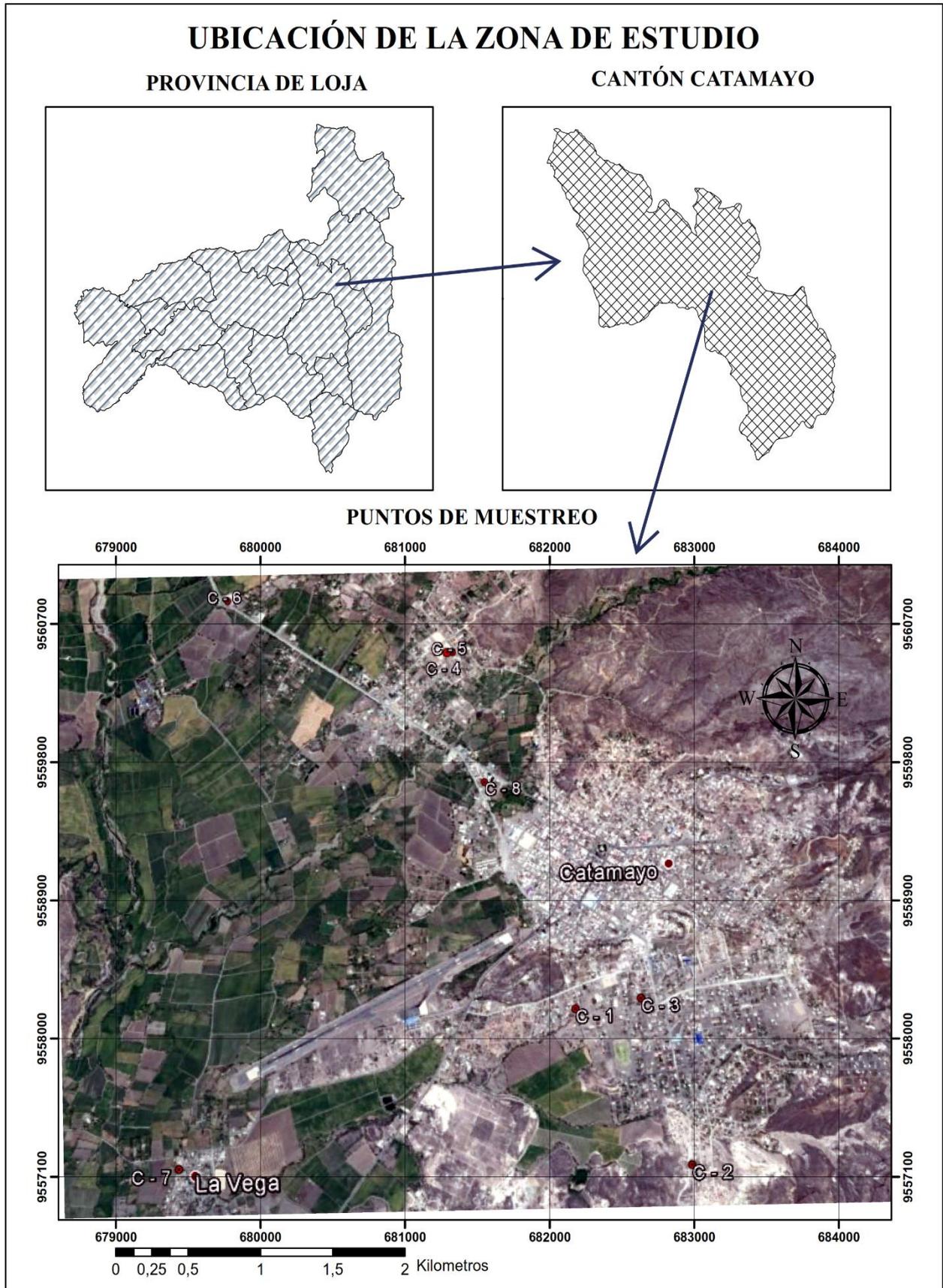


Figura 1: Mapa de ubicación de las zonas de estudio (Datum WGS 84, Zona 17 S).  
Fuente: Google Earth  
Elaboración: El Autor

## **CAPÍTULO II**

### **2 MARCO TEÓRICO**

## **2.1 Arcillas**

### **2.1.1 Origen.**

La descomposición de las rocas producida por agentes físicos y químicos da como resultado una variedad de minerales que en conjunto forman la arcilla, la cual posee un tamaño coloidal, estructura bien definida y propiedades fisicoquímicas que intervienen en el comportamiento del suelo, además se debe tener en cuenta que los minerales de los cuales resulta la arcilla son de origen secundario (López, 2005).

### **2.1.2 Composición de las Arcillas.**

Las arcillas están constituidas principalmente por silicatos hidratados con una forma estructural de tetraedro (con átomos de silicio y oxígeno) que pueden ser de aluminio, magnesio, hierro, entre otros metales. Estos minerales resultan de la descomposición de las rocas ígneas y metamórficas y según su estructura reticular se clasifican en: caolinitas formadas por una lámina silícica y otra alumínica, montmorillonitas formadas por una lámina alumínica entre dos silícicas y illitas que tienen igual composición a las montmorillonitas (Salamanca & Ahumada, 2013).

## **2.2 Consolidación de las Arcillas.**

Cuando el suelo está sometido a una carga, este experimenta una variación en la presión de poro o presión intersticial, lo cual genera que el agua fluya a través del suelo hasta que estas presiones sean disipadas, a continuación, el suelo es sometido a deformaciones por el cambio de volumen hasta el reajuste de las partículas que lo componen, este proceso se conoce como consolidación (Jiménez Salas & Justo Alpañes, 1975).

La consolidación se da en dos fases: la consolidación primaria en la cual se experimenta la disipación de presiones intersticiales conforme avanza el tiempo y la consolidación secundaria que se produce cuando el proceso de disipación de presiones es casi imperceptible y se producen cambios volumétricos por el reajuste de las partículas del suelo (Jiménez Salas & Justo Alpañes, 1975).

Las arcillas al estar sometidas a cargas no adquieren instantáneamente una deformación, puesto que este es un proceso que se da con el tiempo y que en algunos casos puede ser muy largo. (Jiménez Salas & Justo Alpañes, 1975).

Existen dos metodologías para la interpretación de los datos de la deformación con respecto al tiempo, la primera propuesta por Casagrande consiste en graficar la deformación versus el logaritmo del tiempo para determinar los tiempos para el 0%, 50% y 100% de consolidación,

y la segunda metodología propuesta por Taylor que consiste en graficar la deformación versus la raíz cuadrada del tiempo para determinar los tiempos para el 0%, 50%, 90% y 100% de consolidación (Jiménez Salas & Justo Alpañes, 1975).

### **2.2.1 Teorías sobre consolidación de las arcillas.**

Existen diversas teorías sobre consolidación entre las cuales tenemos: La teoría de Terzaghi, Teoría de Davis y Raymond (sólo aplicable a suelos normalmente consolidados), Teoría de consolidación sujeta a la hipótesis de pequeñas deformaciones, entre otras. De estas teorías la más clara y concisa es la de Terzaghi.

#### **2.2.1.1 Teoría de Terzaghi.**

La teoría de consolidación fue originalmente desarrollada por Terzaghi, su estudio representa el lapso en que se da una deformación del suelo causada por la expulsión lenta de agua a través de los poros en un material de baja permeabilidad como la arcilla, al estar sometida bajo una compresión (Verruijt, 2008).

Para Jiménez Salas y Justo Alpañes (1992), esta teoría se fundamenta en un modelo unidimensional en el cual la presión intersticial y el acomodamiento de las partículas del suelo se dan en la dirección vertical, bajo las hipótesis de:

- Las características del suelo son homogéneas.
- El suelo está saturado durante el proceso de consolidación.
- No se toma en cuenta el grado de compresibilidad las partículas de suelo y agua.
- La metodología de cálculo sólo es aplicable a suelos con partículas de tamaño fino.
- El proceso se produce únicamente en dirección vertical.
- Los principios de la ley de Darcy son válidos y aplicables.
- La presión efectiva es el determinante para la presión de poros.
- Existen variables que permanecen constantes durante la fase de consolidación, tal es el caso de la constante de permeabilidad.

#### **2.2.1.2 Teoría de Davis y Raymond.**

Para Jiménez Salas y Justo Alpañes (1992), esta teoría se aplica para consolidación unidimensional y sólo es aplicable a suelos normalmente consolidados, además el valor del módulo edométrico está definido por una ecuación, la cual implica que la reducción de la constante de permeabilidad es proporcional al incremento del módulo edométrico.

Con esta teoría se obtienen valores de consolidación similares a los obtenidos por la teoría de Terzaghi, con la diferencia que para este método la disipación de las presiones se ve influenciada por las presiones inicial y final (Jiménez Salas & Justo Alpañes, 1975).

### **2.2.1.3 Teoría de consolidación sujeta a pequeñas deformaciones.**

Esta teoría supone que el suelo se encuentra en capas delgadas en las cuales de cierta manera se puede despreñar el peso propio del sólido y del agua inmersa en la capa, además esta teoría no está sujeta a restricciones entre la relación del índice de poros y la presión efectiva y no depende de que la permeabilidad sea constante durante el proceso de consolidación (Jiménez Salas & Justo Alpañes, 1975).

### **2.2.2 Índice de fluidez.**

El contenido de humedad relacionado con el límite plástico y líquido pueden dar una medida aproximada a la consistencia del suelo, para esto se utiliza la ecuación de Terzagui correspondiente al índice de fluidez, IL (Terzaghi & Peck, 1973).

De acuerdo a la ecuación 2.1 índice de fluidez está definido como:

$$IL = \frac{w - LP}{IP} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde, w es el contenido de humedad del suelo en estado natural, LP es el límite plástico del suelo e IP es la diferencia entre el límite líquido y el plástico.

### **2.2.3 Presión de preconsolidación.**

Se lo puede expresar como la tensión máxima efectiva vertical que ha experimentado el suelo, de tal manera que las deformaciones sean mínimas y cómodamente toleradas por las estructuras fundadas sobre el suelo (Cabrera, 2011).

Para determinar la presión de preconsolidación,  $\sigma'_c$ , se pueden emplear diversas metodologías a partir de los resultados del ensayo edométrico como el de Casagrande 1936, Schmertmann 1955, Burmister 1942 entre otros. Si bien es cierto estos métodos resultan satisfactorios siempre y cuando las curvas de consolidación de las arcillas tengan la forma clásica de este tipo de suelo, caso contrario los resultados tras aplicar estas metodologías resultan como un valor probable (Becker, Crooks, Been, & Jefferies, 1987).

La metodología aplicada para la presente investigación corresponde al procedimiento gráfico propuesto por Casagrande (Casagrande, 1936).

### 2.2.4 Presión de sobrecarga efectiva in situ.

La presión de sobrecarga efectiva in situ,  $\sigma'_o$ , está definida como la componente vertical de las fuerzas en puntos de contacto de sólido con sólido sobre un área de sección transversal unitaria (Das, 2012).

La presión de sobrecarga efectiva se puede calcular mediante las ecuaciones 2.2a y 2.2b y dependiendo de las condiciones en las que se encuentre el suelo se procede de la siguiente manera:

- Condición 1: Suelo parcialmente saturado (Das, 2012).

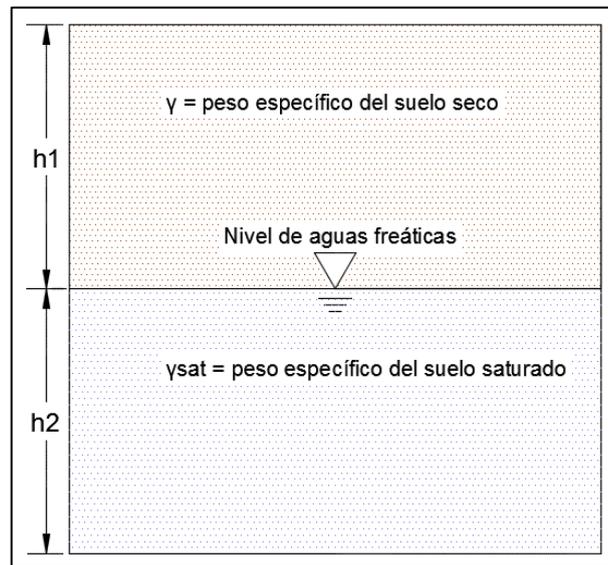


Figura 2: Suelo parcialmente saturado.  
Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

$$\sigma'_o = \gamma h_1 + \frac{h_2}{2} (\gamma_{sat} - \gamma_w) \quad \text{Ecuación 2.2a}$$

Donde,  $\sigma'_o$  es la presión de sobrecarga efectiva in situ,  $h_1$  es el espesor del estrato sobre el nivel freático,  $\gamma$  es el peso específico del suelo seco,  $h_2$  es el espesor del estrato bajo el nivel freático,  $\gamma_{sat}$  es el peso específico del suelo saturado y  $\gamma_w$  es el peso específico del agua.

- Condición 2: Suelo sumergido, con flujo ascendente (Das, 2012).

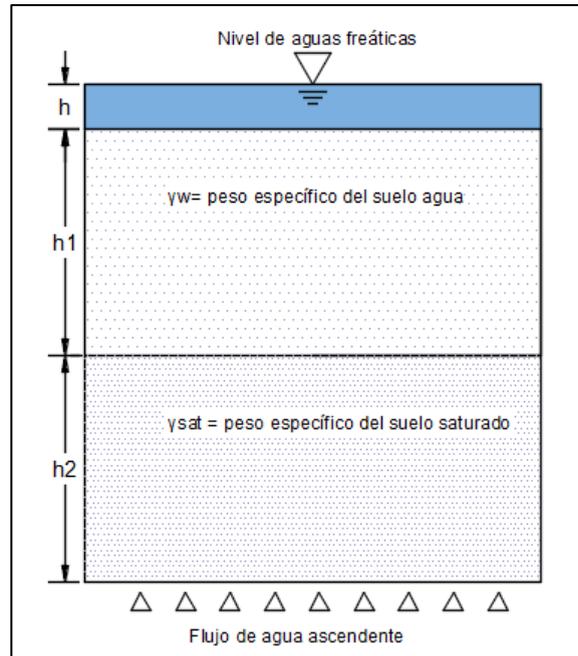


Figura 3: Suelo sumergido, con flujo de agua ascendente.

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

$$\sigma'_o = h_2(\gamma_{sat} - \gamma_w) - h\gamma_w \quad \text{Ecuación 2.2b}$$

Donde,  $h$  es el espesor de la lámina de agua.

### 2.2.5 Razón de sobreconsolidación OCR.

La razón de sobreconsolidación OCR, es uno de los criterios fundamentales para conocer el comportamiento y características de una masa de suelo orientado desde una perspectiva geotécnica. El OCR esta derivado de las curvas de consolidación obtenidas mediante el ensayo edométrico en una muestra de suelo no perturbada. Este coeficiente es obtenido mediante la ecuación 2.3, define la formación de los suelos y se expresa como la relación entre la presión de preconsolidación y la presión efectiva in situ (Urbaitis, Lekstutytė, & Gribulis, 2016). En la tabla 2 se muestra el tipo de consolidación de acuerdo con el valor de OCR.

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_o} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Tabla 2: Tipos de consolidación de suelos de acuerdo con el OCR.

OCR	Tipo consolidación del suelo
<1	No consolidado
1.0 – 1.5	Normalmente consolidado
1.5 -10	Sobreconsolidado
>10	Altamente consolidado

Fuente: Overconsolidation Ratio Determination of Cohesive Soil, 2016.  
Elaboración: El autor

### 2.2.6 Arcillas normalmente consolidadas.

Un estrato de arcilla es normalmente consolidado si nunca ha experimentado durante su existencia geológica presiones efectivas verticales mayores a las que actualmente experimenta. Por lo general para obtener la curva virgen de compresibilidad, se mezcla una porción de suelo cohesivo con agua, agitándose hasta que las partículas del suelo en su totalidad queden suspendidas y se deja decantar, como resultado de este proceso se obtiene un suelo relativamente virgen que luego de ser sometido a una prueba edométrica presenta una curva parecida a la que se muestra en la figura 4, con un único tramo rectilíneo (Cabrera, 2011).

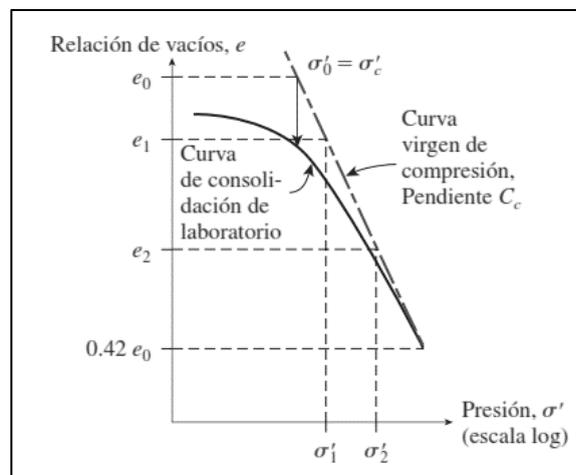


Figura 4: Curva de consolidación de un estrato normalmente consolidado.

Fuente: Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, Braja Das 2012, pág. 35.  
Elaboración: El autor

### 2.2.7 Arcillas sobreconsolidadas.

Un estrato de arcilla es sobreconsolidado si durante su historia geológica, estuvo expuesto a presiones efectivas verticales mayores a las que actualmente experimenta. Generalmente la curva está representada por dos tramos de recta ab y bc ubicados como se muestra en la figura 5, el punto a está representado por las coordenadas de la presión de sobrecarga efectiva in situ y la relación de vacíos inicial, el punto b corresponde a la intersección entre la tangente

al primer tramo de la curva que pase por el punto a y la presión de preconsolidación y el punto c que corresponde al tramo final de la curva (Cabrera, 2011).

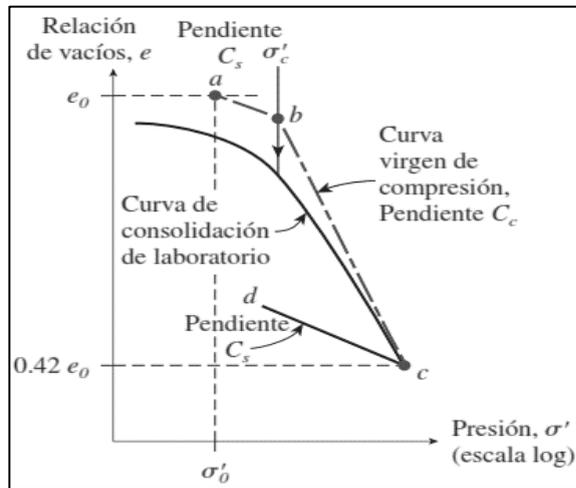


Figura 5: Curva de consolidación de un estrato sobreconsolidado.  
 Fuente: Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, Braja Das 2012, pág. 37.  
 Elaboración: El autor

### 2.2.8 Resistencia cortante no drenada.

La resistencia al corte no drenado,  $C_u$ , se produce por la oposición de movimiento entre las partículas de suelo. Existen diversas teorías para el cálculo de la resistencia al corte, así mismo diversos autores han presentado relaciones para la obtención del  $C_u$  y algunas de estas se muestran a continuación en las ecuaciones 2.4 a 2.6:

- Mediante el ensayo de compresión simple

Para la aplicación de esta fórmula se utiliza la tabla 3, se determina primeramente el índice de consistencia y luego se determina  $q_u$  y se aplica la siguiente ecuación (Das, 2012).

$$C_u = \frac{q_u}{2} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde,  $q_u$  es la resistencia a la compresión simple.

- Mediante la correlación entre la presión de sobrecarga efectiva in situ y la razón de sobreconsolidación en arcillas sobreconsolidadas y normalmente consolidadas (Ladd, 1977) y colaboradores.

$$\left(\frac{C_u}{\sigma'_{o'}}\right)_{\text{Sobre consolidada}} = OCR^{0.8} \quad \text{Ecuación 2.5a}$$

$$\left(\frac{C_u}{\sigma'_{o'}}\right)_{\text{normamente consolidada}} = OCR^{0.8} \quad \text{Ecuación 2.5b}$$

- Hara y colaboradores (1971)

Se puede utilizar una correlación entre el índice de consistencia IC, el N60 y la resistencia a la compresión simple  $q_u$ , para obtener el  $C_u$ , como se muestra en la tabla 3 (Hara, Ohata, & Niwa, 1971).

$$\frac{C_u}{P_a} = 0.29(N_{60})^{0.72} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Donde,  $P_a$  es la presión atmosférica y  $N_{60}$  es el número de penetración estándar corregido.

Tabla 3: Correlación aproximada entre IC, N60 y  $q_u$ .

Número de penetración estándar, N60	Consistencia	Índice de consistencia, IC	Resistencia a la compresión simple, $q_u$ (kN/m <sup>2</sup> )
< 2	Muy Blanda	< 0.5	< 25
2 – 8	Blanda	0.5 – 0.75	25 – 80
8 – 15	Media	0.75 – 1.0	80 – 150
15 – 30	Firme	1.0 – 1.5	150 – 400
>30	Muy Firme	>1.5	> 400

Fuente: Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, Braja Das 2012, pág. 84.  
Elaboración: El autor

Para el uso de la tabla 3, el IC se calcula con la ecuación 2.7 y el N60 con la ecuación 2.8:

$$IC = \frac{LL - w}{LL - LP} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

$$OCR = 0.193 \left(\frac{N_{60}}{\sigma'_{o'}}\right)^{0.689} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

### 2.2.9 Módulo de Young.

El módulo de elasticidad es usado para evaluar los asentamientos inmediatos en las cimentaciones elásticas, este depende principalmente de la densidad, de los esfuerzos que ha experimentado el suelo y del tipo de estratificación del mismo (El-Sayed & El-Kasaby,

1990). El módulo de elasticidad,  $E_s$ , para arcillas, puede ser obtenido mediante la ecuación 2.9 (Das, 2012).

$$E_s = \beta C_u \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Donde,  $\beta$  es un parámetro que es obtenido de acuerdo con la figura 6, en función del índice de plasticidad y la razón de sobreconsolidación (Duncan & Buchignani, 1976).

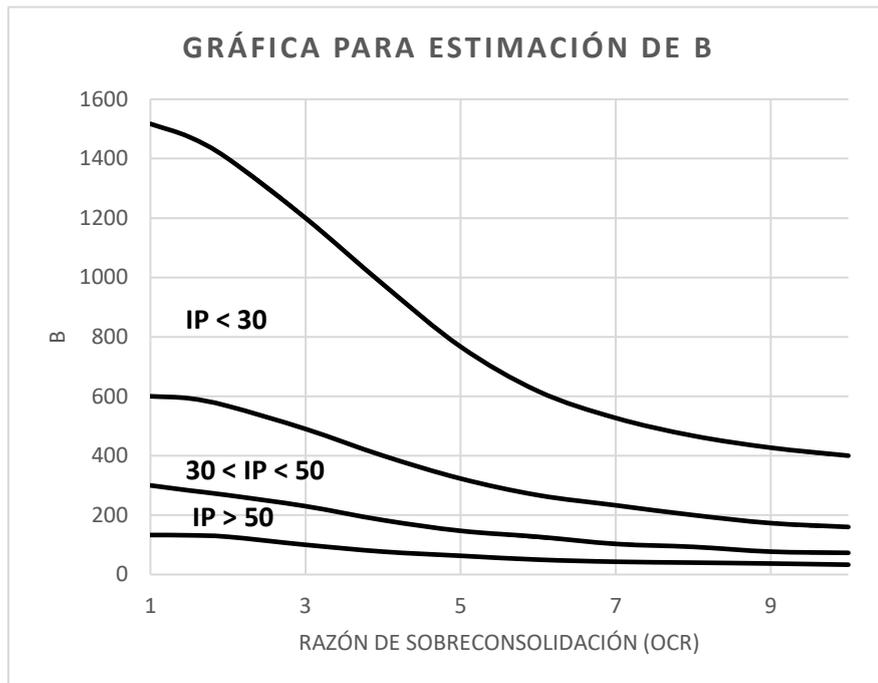


Figura 6: Gráfica para estimación de  $\beta$ .

Fuente: An Engineering Manual for Settlement Studies, Duncan & Buchignani, 1976

Elaboración: El autor

La consistencia del suelo también se puede estimar con el módulo de Young de acuerdo con la tabla 4 (González, 2012).

Tabla 4: Correlación aproximada entre IC, N60 y  $q_u$ .

Módulo de Young (Mpa)	Consistencia
< 2.5	Muy Blanda
2.5 – 5	Blanda
5 – 10	Media
10 – 20	Rígida
20 – 40	Muy Rígida
>40	Dura

Fuente: Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, Braja Das 2012, pág. 84.

Elaboración: El autor

### 2.2.10 Consolidación Primaria.

Generalmente la consolidación primaria tiene lugar cuando empieza el aumento de la tensión efectiva, en esta fase el agua existente en el suelo es expulsada y el volumen total de la masa de suelo disminuye inmediatamente después de que el proceso de disipación de la presión intersticial es completado, consecuentemente el suelo adquiere una mayor rigidez y resistencia, el comportamiento de la deformación con respecto al tiempo durante la consolidación primaria se muestra en la figura 7 (Mesri & Feng, 2014).

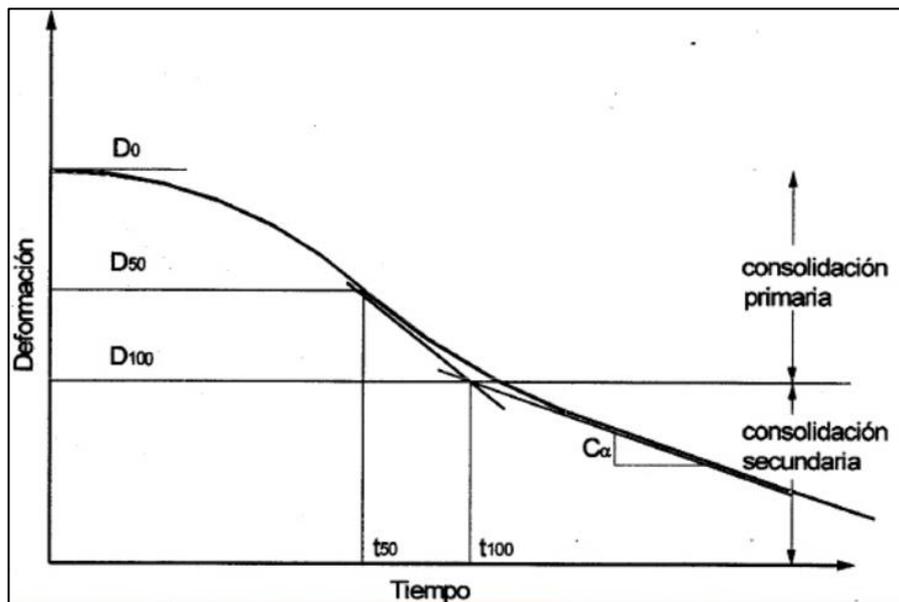


Figura 7: Comportamiento de Gráfica en consolidación primaria y secundaria.

Fuente: Mecánica de suelos. (Juárez & Rico, 2005)

Elaboración: El autor

### 2.2.11 Consolidación Secundaria.

Inmediatamente después de que el proceso de disipación de la presión intersticial es completado, se inicia la consolidación secundaria como resultado de un reacomodamiento plástico de las partículas del suelo, para esta fase de consolidación el comportamiento es casi lineal en la gráfica de deformación vs tiempo como se puede apreciar en la anterior figura 7 (Fang, 1991).

Los científicos como Ladd (1971), Raymond y Wahls (1976) propusieron suposiciones acerca de la conducta de los suelos de composición fina, en proceso de consolidación secundaria. (Fang, 1991). Estas hipótesis fueron:

- El índice de consolidación secundaria no depende del grosor de la capa de suelo.

- El índice de consolidación secundaria no depende del proceso de consolidación primaria que haya experimentado la capa de suelo.
- Para arcillas normalmente consolidadas, la relación entre el índice de consolidación y el coeficiente de consolidación tiende a ser constante.

### **2.3 Tipos de cimentaciones.**

Una cimentación tiene por objeto transmitir las cargas de una estructura hacia el suelo. Por lo general, el suelo sobre el que se va a cimentar no siempre es bueno, dependiendo de la ubicación geográfica, condición climática, etc., el suelo presentará características que lo harán apto o no para la construcción. De acuerdo con estas condiciones las cimentaciones se clasifican en dos tipos: cimentaciones superficiales y cimentaciones profundas. (López García & López Perales, 1999)

Según la Normativa Ecuatoriana de la Construcción en su sección Geotecnia y Cimentaciones, las cimentaciones se consideran superficiales cuando la relación entre la profundidad de desplante y el ancho de la cimentación es menor o igual a 4, por el contrario, cuando esta relación es mayor que 4 se considera como una cimentación profunda. (Ministerio de desarrollo urbano y vivienda, 2014)

#### **2.3.1 Cimentaciones superficiales.**

Las cimentaciones superficiales, se construyen en las capas superficiales del suelo puesto que este presenta la capacidad portante necesaria para soportar las solicitaciones a las que esté sometido, se pueden clasificar en: zapatas aisladas, zapatas combinadas, zapatas de diapasón, zapata esquinera, zapata de medianería, muro corrido, viga de cimentación, losa de cimentación, losa de cimentación nervada, etc. (López García & López Perales, 1999)

#### **2.3.2 Cimentaciones profundas.**

Las cimentaciones profundas, se construyen en las capas profundas del suelo puesto que se busca en una profundidad mayor una capa de suelo que tenga la capacidad portante necesaria para soportar las solicitaciones de carga, generalmente se utilizan pilotes. (López García & López Perales, 1999)

### **2.4 Tipos de asentamientos.**

Al estar sometida la masa de suelo a una carga de cimentación se generan los procesos de consolidación anteriormente mencionados y la masa de suelo disminuye su volumen. El asentamiento total al que estará sometida la cimentación es el resultado de la adición de los

asentamientos inmediatos, asentamientos por consolidación primaria y asentamientos por consolidación secundaria; es importante conocer estos asentamientos puesto que en el peor de los casos podrían causar el colapso de una estructura. (Das, 2012)

Por lo tanto, el asentamiento total  $S$ , que tendrá una estructura puede ser expresado como se muestra en la ecuación 2.10:

$$S = S_e + S_p + S_s \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Donde:  $S_e$  es el asentamiento inmediato,  $S_p$  es el asentamiento por consolidación primaria y  $S_s$  es el asentamiento por consolidación secundaria.

#### 2.4.1 Incremento de esfuerzos

Boussinesq propuso las relaciones matemáticas para el cálculo de los esfuerzos verticales cuando una masa de suelo (homogénea, elástica e isotrópica), está sometida a una carga de cimentación. (Das, 2012)

Este tema de investigación está orientado a los esfuerzos producidos en la esquina y en el centro de una zapata y fue calculado mediante las ecuaciones 2.11 a 2.14:

- **Esfuerzo en el centro de la zapata**

$$\Delta\sigma = q_o I_c \quad \text{Ecuación 2.11}$$

$$I_c = \frac{2}{\pi} \left( \frac{m_1 n_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + 1}} \times \frac{m_1^2 + 2n_1^2 + 1}{(1 + n_1^2)(m_1^2 + n_1^2)} + \text{sen}^{-1} \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2} \sqrt{1 + n_1^2}} \right) \quad \text{Ecuación 2.12}$$

$$m_1 = \frac{L}{B} \quad \text{Ecuación 2.13}$$

$$n_1 = \frac{z}{\left(\frac{B}{2}\right)} \quad \text{Ecuación 2.14}$$

Donde,  $\Delta\sigma$  es el incremento de esfuerzo en la zapata en  $\text{kN/m}^2$ ,  $q_o$  es el esfuerzo por unidad de área en  $\text{kN/m}^2$ ,  $I_c$  es un factor de influencia y  $m_1, n_1$  son relaciones para cálculo del factor de influencia.

El esfuerzo por unidad de área  $q_o$ , es obtenido mediante la siguiente ecuación 2.15:

$$q_o = \frac{Q}{A} \quad \text{Ecuación 2.15}$$

Donde, Q es la carga que transmite la columna a la zapata y A corresponde al área de la zapata.

- **Esfuerzo en cualquier punto de la zapata**

Para este cálculo se aplica la metodología para la obtención del esfuerzo en la esquina de una zapata, de manera que se divide la zapata en 4 partes cuyo punto de confluencia sea el lugar donde se requiera calcular el esfuerzo. Por lo tanto, para este punto el esfuerzo resulta de la suma de los esfuerzos de cada área de aporte obtenidos con las ecuaciones 2.16 a 2.19, así:

$$\Delta\sigma = q_o(I_1 + I_2 + I_3 + I_4) \quad \text{Ecuación 2.16}$$

$$I_n = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{2mn\sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 + m^2n^2 + 1} x \frac{m^2 + n^2 + 2}{m^2 + n^2 + 1} + \tan^{-1} \frac{2mn\sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 - m^2n^2 + 1} \right) \quad \text{Ecuación 2.17}$$

$$m = \frac{B}{z} = \frac{x}{z} \quad \text{Ecuación 2.18}$$

$$n = \frac{L}{z} = \frac{y}{z} \quad \text{Ecuación 2.19}$$

Donde,  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_n$  son los factores de influencia correspondientes a cada área de aporte y  $m, n$  son relaciones para cálculo del factor de influencia.

- **Esfuerzo promedio en el estrato**

Por lo general en el cálculo de asentamiento se necesita el esfuerzo promedio del estrato de arcilla, para lo cual se calcula los esfuerzos en  $H = H$ ,  $H = H/2$  y  $H = 0$ , posteriormente se aplica la siguiente ecuación 2.20:

$$\Delta\sigma_{prom} = \frac{1}{6} (\Delta\sigma_s + 4\Delta\sigma_m + \Delta\sigma_i) \quad \text{Ecuación 2.20}$$

Donde, H es el espesor del estrato y  $\Delta\sigma_s, \Delta\sigma_m, \Delta\sigma_i$ , son los esfuerzos en la parte superior media e inferior del estrato respectivamente.

### 2.4.2 Asentamientos Inmediato.

Un concepto breve de lo que es el asentamiento inmediato lo define como la respuesta súbita de deformación de la masa de suelo al ser cargada. Este asentamiento está relacionado con el módulo de elasticidad y el módulo de Poisson y usualmente es propio de los suelos no cohesivos.

Para realizar el cálculo se utilizan las ecuaciones 2.21 a 2.33 que se muestran a continuación según sea el caso:

- **MÉTODO DE JANBÚ Y COLABORADORES (1956)**

$$S_e = A_1 A_2 \frac{q_o B}{E_s} \quad \text{Ecuación 2.21}$$

$$A_1 = \ln \frac{(m' + \sqrt{m'^2 + 1})\sqrt{1 + n'^2}}{m' + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}} \quad \text{Ecuación 2.22}$$

$$A_2 = \frac{m'}{n' \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}} \quad \text{Ecuación 2.23}$$

Donde,  $S_e$  es el asentamiento inmediato,  $A_1$  es función de  $\frac{H}{B}$  y  $\frac{L}{B}$ ,  $A_2$  es función de  $\frac{D_f}{B}$ ,  $B$  es el ancho de la zapata y  $E_s$  corresponde al módulo de Young (Janbú, Bjerrum, & Kjaernsli, 1956).

Para facilidad de obtención de los valores de  $A_1$  y  $A_2$ , se pueden utilizar las gráficas del libro de Fundamentos de Ingeniería de cimentaciones (Das, 2012), pág. 244.

- **MÉTODO BASADO EN LA TEORÍA DE LA ELASTICIDAD**

**Caso 1:** Cimentación perfectamente flexible. (Bowles, 1987)

$$S_e = q_o (\alpha B') \frac{1 - u_s^2}{E_s} I_s I_f \quad \text{Ecuación 2.24}$$

**Caso 2:** Cimentación rígida

$$S_{e(\text{rígida})} \approx 0.93 S_{e(\text{flexible, centro})} \quad \text{Ecuación 2.25}$$

Para obtener los valores de los términos de la ecuación 2.24 se aplican las siguientes ecuaciones:

$$I_s = F_1 + \frac{1 - 2u_s}{1 - u_s} F_2 \quad \text{Ecuación 2.26}$$

$$F_1 = \frac{A_0 + A_1}{\pi} \quad \text{Ecuación 2.27}$$

$$F_2 = \frac{n' \cdot \text{Arctan}(A_2)}{2\pi} \rightarrow (\text{trabajar en radianes}) \quad \text{Ecuación 2.28}$$

$$A_0 = m' \ln \frac{(1 + \sqrt{m'^2 + 1})\sqrt{m'^2 + n'^2}}{m'(1 + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1})} \quad \text{Ecuación 2.29}$$

Dependiendo del lugar en donde se requiere calcular el asentamiento los valores de  $\alpha$ ,  $m'$ ,  $n'$  varían como se muestra a continuación:

Para el centro de la zapata:

$$\alpha = 4$$

$$m' = \frac{L}{B} \quad \text{Ecuación 2.30}$$

$$n' = \frac{2H}{B} \quad \text{Ecuación 2.31}$$

Para la esquina de la zapata:

$$\alpha = 1$$

$$m' = \frac{L}{B} \quad \text{Ecuación 2.32}$$

$$n' = \frac{H}{B} \quad \text{Ecuación 2.33}$$

Donde,  $u_s$  es la relación de Poisson del suelo,  $I_s$  es un factor de forma,  $I_f$  es un factor de profundidad que está en función de  $D_f$ ,  $B$ ,  $L$  y  $u_s$  y finalmente  $\alpha$  es un factor que depende de la ubicación sobre la cimentación donde se calcula el asentamiento (Das, 2012).

El Factor de forma  $I_f$  para distintos valores de  $D_f$ ,  $B$ ,  $L$  y  $u_s$  se puede encontrar en las tablas propuestas por Fox. (Fox, 1948)

### 2.4.3 Asentamientos por consolidación primaria.

El asentamiento por consolidación primaria es la variación en el volumen de la masa de suelo al expulsar el agua que tiene inmersa en los espacios vacíos de su estructura, comúnmente se produce en limos y arcillas saturadas y se aplica la ecuación 2.34. (Das, 2012)

$$S_p = H \frac{\Delta e}{1 + e_o} \quad \text{Ecuación 2.34}$$

Donde,  $S_p$  es el asentamiento por consolidación primaria,  $\Delta e$  es el índice de variación de vacíos,  $e_o$  es el índice de vacíos inicial y  $H$  es el espesor del estrato de arcilla.

Dependiendo del tipo de arcilla que se tenga la metodología de cálculo varía de la siguiente manera, utilizando las ecuaciones 2.35 a 2.39:

- **Arcillas normalmente consolidadas**

Condición:  $\sigma'_o = \sigma'_c$

$$S_p = \frac{C_c H}{1 + e_o} \log\left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma_{prom}}{\sigma'_o}\right) \quad \text{Ecuación 2.35}$$

Donde,  $C_c$  es el índice de compresión,  $\sigma'_o$  es la presión de sobrecarga efectiva in situ y  $\Delta\sigma_{prom}$  es el incremento promedio en la presión efectiva sobre el estrato de arcilla (Das, 2012).

- **Arcillas sobreconsolidadas.**

Primer caso: Condición:  $\sigma'_o + \Delta\sigma_{prom} \leq \sigma'_c$

$$S_p = \frac{C_s H}{1 + e_o} \log\left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma_{prom}}{\sigma'_o}\right) \quad \text{Ecuación 2.36}$$

Donde,  $C_s$  es el índice de expansión

Segundo caso: Condición:  $\sigma'_o < \sigma'_c < (\sigma'_o + \Delta\sigma_{prom})$

$$S_p = \frac{C_s H}{1 + e_o} \log\left(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_o}\right) + \frac{C_c H}{1 + e_o} \log\left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma_{prom}}{\sigma'_c}\right) \quad \text{Ecuación 2.37}$$

Donde,  $\sigma'_c$  es la presión de preconsolidación

Para el cálculo de asentamientos generalmente es necesario determinar el peso específico seco y saturado de los materiales que conforman el estrato de suelo, para lo cual se aplican las siguientes ecuaciones (Das, 2012).

$$\gamma = \frac{G_s \gamma_w}{1 + w G_s} \quad \text{Ecuación 2.38}$$

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + wG_s}{1 + wG_s} \gamma_w \quad \text{Ecuación 2.39}$$

Donde,  $\gamma$  es el peso específico seco en  $\text{kN/m}^3$ ,  $\gamma_{sat}$  es el peso específico saturado en  $\text{kN/m}^3$ ,  $G_s$  es el peso específico relativo,  $w$  es el contenido de humedad y  $\gamma_w$  es el peso específico del agua en  $\text{kN/m}^3$ .

#### 2.4.4 Asentamientos por consolidación Secundaria.

El asentamiento por consolidación secundaria es el resultado del esfuerzo efectivo constante al que es sometida la masa de suelo después del asentamiento por consolidación primaria, por lo que se produce un ajuste plástico de la estructura del suelo (López, 2005).

El asentamiento por consolidación secundaria es obtenido mediante las ecuaciones 2.40 a 2.46:

- **Arcillas normalmente consolidadas**

Condición:  $\sigma'_o = \sigma'_c$

$$\Delta e = C_c \log \left( \frac{\sigma'_o + \Delta \sigma_{prom}}{\sigma'_o} \right) \quad \text{Ecuación 2.40}$$

- **Arcillas sobreconsolidadas.**

Primer caso: Condición:  $\sigma'_o + \Delta \sigma_{prom} \leq \sigma'_c$

$$\Delta e = C_s \log \left( \frac{\sigma'_o + \Delta \sigma_{prom}}{\sigma'_o} \right) \quad \text{Ecuación 2.41}$$

Segundo caso: Condición:  $\sigma'_o < \sigma'_c < (\sigma'_o + \Delta \sigma_{prom})$

$$\Delta e = C_s \log \left( \frac{\sigma'_c}{\sigma'_o} \right) + C_c \log \left( \frac{\sigma'_o + \Delta \sigma_{prom}}{\sigma'_c} \right) \quad \text{Ecuación 2.42}$$

$$e_p = e_o - \Delta e \quad \text{Ecuación 2.43}$$

Donde,  $e_p$  es el índice de vacíos en el extremo de la consolidación primaria.

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\log(t_2/t_1)} \quad \text{Ecuación 2.44}$$

Donde,  $C_\alpha$  es el índice de compresión secundaria,  $t_2$  es el tiempo para finalizar el asentamiento total y  $t_1$  es el tiempo para finalizar el asentamiento primario.

$$S_s = C'_\alpha H \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad \text{Ecuación 2.45}$$

$$C'_\alpha = \frac{C_\alpha}{1 + e_p} \quad \text{Ecuación 2.46}$$

Donde,  $S_s$  es el asentamiento por consolidación secundaria,  $C'_\alpha$  es el coeficiente de consolidación secundaria,  $e_p$  es la relación de vacíos al final de la consolidación primaria.

## 2.5 Análisis por fluorescencia de rayos X.

La fluorescencia de rayos X es un análisis elemental, frecuentemente utilizado porque permite determinar rápidamente los elementos que componen una muestra. Este análisis consiste en someter a la muestra a la absorción de rayos X, lo que produce un comportamiento característico que permite determinar el elemento químico del que se compone la muestra, todo esto como un resultado del intercambio de energía mediante transiciones de electrones con mayor energía que producen iones excitados que retornan a su estado natural. (Preeti & Singh, 2007)

## **CAPÍTULO III**

### **3 TRABAJO DE CAMPO Y ENSAYOS DE LABORATORIO**

### 3.1 Trabajos de campo.

Con el fin de obtener las muestras de los suelos de estudio necesarias para llevar a cabo este proyecto, se realizaron trabajos de campo como: Reconocimiento de las zonas de muestreo y recolección de muestras en estado alterado e inalterado, las actividades realizadas durante este proceso se detallan a continuación:

#### 3.1.1 Reconocimiento de las zonas de muestreo.

Para el reconocimiento de las zonas de muestreo, en la ciudad de Catamayo y con la ayuda del director y Codirector, nos trasladamos por cada uno de los lugares previamente establecidos y se verificó la existencia de bancos de arcilla como se muestra en la figura 8.



Figura 8: Reconocimiento de zonas de muestreo – Banco de arcilla Sector Ingenio  
Fuente: El Autor  
Elaboración: El autor

#### 3.1.2 Recolección de muestras

Para la recolección de muestras en estado alterado se realizaron calicatas a una profundidad mayor a 1 metro como se muestra en la figura 9, las cuales fueron utilizadas para realizar los ensayos de clasificación. Se recolectaron ocho muestras.



Figura 9: Recolección de muestras alteradas – Sector La Vega.  
Fuente: El Autor  
Elaboración: El autor

Para la recolección de las muestras en estado inalterado se realizaron calicatas a una profundidad mayor a 1 metro y como se muestra en la figura 10, mediante un anillo de acero se obtuvieron las muestras para realizar el ensayo de consolidación. Se recolectaron cuatro muestras.



Figura 10: Recolección de muestras inalteradas – Sector Colina de los Ceibos.  
Fuente: El Autor  
Elaboración: El autor

### 3.2 Ensayos de laboratorio.

Con el fin de determinar los parámetros y características de los suelos de estudio, necesarios para el cálculo de asentamientos, se realizaron los ensayos de laboratorio de clasificación de suelos, consolidación y fluorescencia de rayos X.

#### 3.2.1 Granulometría

La granulometría se realizó con los procedimientos de la norma AASTHO T88, la metodología utilizada fue de granulometría por lavado, pues los suelos de análisis estaban conformados por partículas finas. En la figura 11 se muestran las muestras utilizadas para el ensayo.



Figura 11: Muestras para ensayo de granulometría  
Fuente: El Autor  
Elaboración: El autor

### 3.2.2 Límites de Atterberg.

Los ensayos de límites de Atterberg se realizaron mediante la norma ASTM D4318. Para estos ensayos se utilizaron las muestras en estado alterado, y en la figura 12 se muestra la realización del límite líquido, mientras que en la figura 13 el límite plástico.



Figura 12: Ensayo de límite líquido.

Fuente: El Autor

Elaboración: El autor



Figura 13: Ensayo de límite plástico.

Fuente: El Auto

Elaboración: El autor

### 3.2.3 Consolidación

El ensayo de consolidación se realizó con el procedimiento de la norma ASTM D2435 y se utilizó un consolidómetro de tipo fijo que permitió ensayar dos muestras de suelo simultáneamente. En la figura 14 se muestra el equipo con el que se realizó el ensayo.



Figura 14: Equipo de Consolidación  
Fuente: El Autor  
Elaboración: El autor

### 3.2.4 Fluorescencia de rayos X

Para conocer la composición mineralógica de las muestras de suelo que fueron sometidas al ensayo de consolidación se realizó el ensayo de fluorescencia de rayos X como se muestra en la figura 15, mediante el equipo BRUKER S1 y el método Mining Light Elements.



Figura 15: Ensayo de Fluorescencia de rayos X.  
Fuente: El Autor  
Elaboración: El autor

## **CAPÍTULO IV**

### **4 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CÁLCULOS DE ASENTAMIENTOS**

Los resultados expuestos en esta investigación son el producto de la realización adecuada del trabajo de fin de titulación en base a una metodología bien definida y estructurada, lo que ha permitido obtener las características de los suelos arcillosos de alta plasticidad del cantón Catamayo, necesarias para realizar el cálculo de los parámetros que permitieron obtener los asentamientos por consolidación de este tipo de suelos cuando están sometidos a distintas cargas de cimentación.

La tabla 5, hace referencia al sector y localización de las zonas de muestreo en base a las cuales se ha desarrollado este estudio. Además, en esta tabla se indica las profundidades de extracción y códigos respectivos para cada muestra.

Tabla 5: Datos generales de las zonas de muestreo.

Número	Lugar	Ubicación (UTM)	Profundidad (m)	Código
1	Los Tejares	9558074, 0682077	1,50	c - 1
2	Colina de los Ceibos	9557090, 0682743	3,00	c - 2
3	Petro Ecuador	9558130, 0682517	2,50	c - 3
4	Trapichillo (Café)	9560654, 0681315	3,00	c - 4
5	Trapichillo (Gris)	9560656, 0681357	3,00	c - 5
6	Ingenio	9561124, 0679666	3,00	c - 6
7	La vega	9557148, 0679435	1,50	c - 7
8	Unidad Judicial	9559670, 0681548	2,00	c - 8

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

## 4.1 Análisis de resultados.

### 4.1.1 Límites de Atterberg.

Los índices de plasticidad se obtuvieron con los resultados de los límites plástico y líquido que se muestran en la tabla 6, se puede apreciar que las muestras: c-1, c-2, c-4, c-5, c-6, c-7, poseen un IP superior a 35, la normativa SUCS define a estos suelos como de alta plasticidad es decir que mientras mayor sea su IP serán más compresibles, por el contrario las muestras: c-3 y c-8, son menos compresibles por lo que han sido descartadas de esta investigación.

Tabla 6: Resultados de límites de Atterberg muestras analizadas.

Código	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad	Índice de Grupo
c - 1	78	30	48	56
c - 2	63	28	35	37
c - 3	53	31	22	19
c - 4	72	32	40	40
c - 5	67	30	37	45
c - 6	71	33	38	39
c - 7	58	21	37	29
c - 8	40	24	16	6

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

#### 4.1.2 Granulometría

Los suelos en estudio se clasifican como finos, puesto que de acuerdo con los resultados obtenidos y mostrados en la tabla 7, los porcentajes de material que pasan el tamiz #200 superan el límite 35% y 50% que separa la fracción gruesa de la fina de acuerdo con la clasificación AASHTO y SUCS respectivamente.

Tabla 7: Resultados de granulometría de las muestras analizadas.

Código	contenido de humedad (%)	% pasa Tamiz 200
c - 1	19,42	98,49
c - 2	15,07	91,18
c - 3	14,71	77,74
c - 4	20,73	86,08
c - 5	16,32	99,6
c - 6	15,91	87,97
c - 7	18,73	75,53
c - 8	11,61	54,39

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

#### 4.1.3 Clasificación de suelos.

Como se muestra en la figura 16, según el Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) el tipo de suelo predominante corresponde a arcillas de alta plasticidad (CH) y corresponde a las muestras de suelo c-1, c-2, c-4, c-5, c-6 y c-7. Además, se encontraron otros tipos de suelos como arcilla de baja plasticidad (CL) en el sector de la Unidad Judicial

(c-8) y el limo de elevada compresibilidad en el sector de Petroecuador (c-3), estos fueron descartados puesto que esta investigación estuvo direccionada a las arcillas de alta plasticidad existentes en el sector.

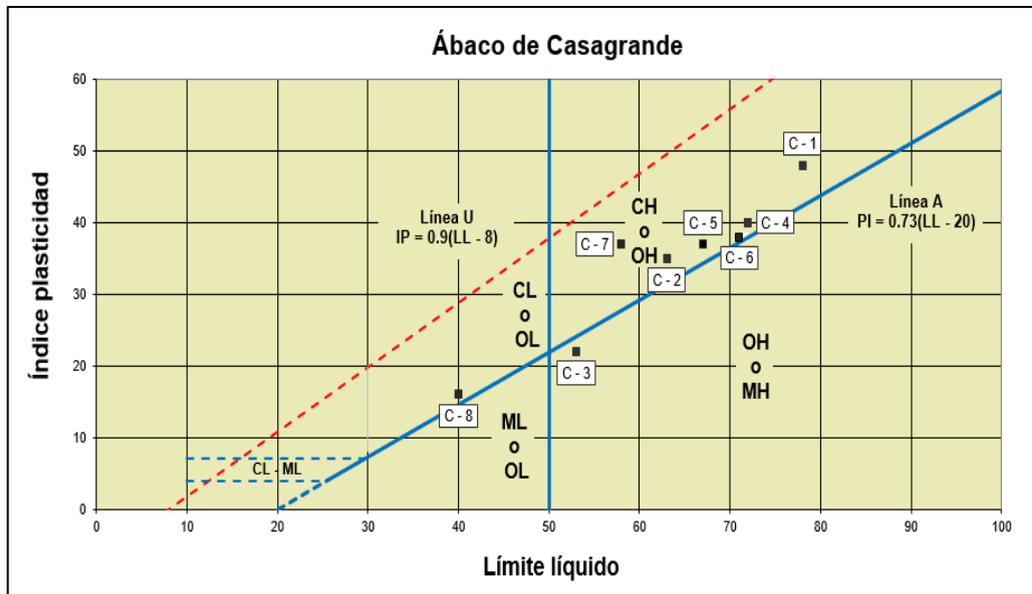


Figura 16: Clasificación de suelos SUCS.

Fuente: El Autor

Elaboración: El autor

#### 4.1.4 Ensayo de consolidación.

Para efectuar el ensayo de consolidación se seleccionaron las 4 zonas con mayor índice de plasticidad por ser las más compresibles y se muestran en la tabla 8, estas corresponden a arcillas existentes en las zonas de expansión urbana del cantón Catamayo que cumplieron con los criterios descritos en la fase metodológica, es decir que, además de las muestras c-3 y c-8 descartadas por no ser arcillas de elevada plasticidad se descartó la muestra c-1, puesto que de las muestras pertenecientes a la zona de expansión 3 (ver tabla 1), es una zona ya poblada en su mayor parte a pesar de tener un índice de plasticidad superior al de las muestras c-2 y c-3 que corresponden a la misma zona de expansión. Así mismo en el sector de Trapichillo se encontraron dos tipos de arcilla la c-4 y c-5, y se tomó la muestra c-4 por tener mayor índice de plasticidad, descartando del análisis la muestra c-5.

Tabla 8: Zonas de aplicación de ensayo de consolidación.

Número	Lugar	Código	Zona de Expansión	Clasificación SUCS
1	Colina de los Ceibos	c - 2	Tercera	CH
2	Trapichillo (Café)	c - 4	Primera	CH
3	Ingenio	c - 6	Segunda	CH
4	La vega	c - 7	Segunda	CH

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

De acuerdo los resultados de razón de sobreconsolidación OCR de la tabla 9, se define a las arcillas de las zonas analizadas como sobreconsolidadas puesto que están dentro del rango de OCR de 1.5 a 10 en la tabla 2.

Además, según la tabla 3 y en base al índice de consistencia obtenido en la tabla 9, el suelo se define como firme para las zonas c-2, c-4 y c-6 y con una consistencia media para la zona c-7, en contraste de acuerdo con módulo de Young para todas las zonas de estudio la consistencia es muy firme.

Los resultados obtenidos tras culminar los ensayos de consolidación se muestran en la tabla 9. Estos parámetros permitieron realizar el cálculo de los asentamientos totales de los suelos de la zona de estudio al estar sometidos a una carga de cimentación.

Tabla 9: Parámetros obtenidos del ensayo de consolidación.

PARÁMETROS OBTENIDOS	C. Ceibos	Trapichillo	Ingenio	La Vega
Código	C - 2	C - 4	C - 6	C - 7
Límite Líquido (LI) (%)	63	72	71	58
Límite Plástico (Lp) (%)	28	32	33	21
Índice de plasticidad (Ip)	35	40	38	37
Peso específico Saturado ( $\gamma_{sat}$ ) (g/cm <sup>3</sup> )	2,27	1,91	2,23	1,82
Peso específico natural ( $\gamma$ ) (g/cm <sup>3</sup> )	2,06	1,85	2,01	1,77
Índice de Compresión (Cc)	0,2156	0,2027	0,1886	0,3015
Índice de Expansión (Cs)	0,0108	0,0194	0,0159	0,0154
Índice de Consolidación (Cv) (cm <sup>2</sup> /s)	0,0086	0,0100	0,0073	0,0012
Índice de Consistencia, IC	1,2556	1,0965	1,3342	0,9698
Consistencia, en base al índice de consistencia (IC)	Firme	Firme	Firme	Media
Coeficiente de permeabilidad hidráulica k (cm/s)	2,59E-07	2,89E-07	2,03E-07	6,46E-08
Presión de preconsolidación (kg/cm <sup>2</sup> )	1,3000	1,9000	1,2500	1,6000
Presión de sobrecarga efectiva in situ (kg/cm <sup>2</sup> )	0,3089	0,3692	0,3021	0,3543
Relación de sobreconsolidación, OCR	4,2087	5,1464	4,1378	4,5158
Resistencia cortante no drenada, Cu (kg/cm <sup>2</sup> )	0,9752	1,3692	0,9409	1,1835
Módulo de Young, Es (MPa)	31,6543	34,1392	28,1255	33,6969
Consistencia, en base al módulo de Young (Es)	Muy Firme	Muy Firme	Muy Firme	Muy Firme

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

#### 4.1.5 Ensayo de fluorescencia de rayos X.

Las muestras de suelo del Cantón Catamayo específicamente las zonas de Colina de los Ceibos, Trapichillo, Ingenio y la Vega, presentan óxidos de silicio, aluminio, hierro, calcio, magnesio, potasio y titanio en su composición química, de acuerdo con (Salamanca & Ahumada, 2013), este tipo de composición química es característica de las arcillas lo que permite validar la existencia de arcilla en las zonas de estudio. En la tabla 10 es evidente que la composición química más representativa de las 4 zonas de estudio son el dióxido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y la alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) que son el componente principal de las arcillas. Además, se puede apreciar que el porcentaje de dióxido de hierro III ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) se encuentra en proporciones similares en las 4 zonas, por el contrario, las zonas de Trapichillo y la Vega se poseen en mayor porcentaje el óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y el óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ) con respecto a las otras zonas. También se puede evidenciar que en Trapichillo existe presencia de Azufre (S) y que el resto de componentes encontrados están en proporciones similares para cada zona.

Tabla 10: Resultados de fluorescencia de rayos X.

Nombre	Compuesto	Porcentaje de concentración (%)			
		C. Ceibos	Trapichillo	Ingenio	La Vega
Silicio	$\text{SiO}_2$	50,60	46,80	47,10	46,20
Aluminio	$\text{Al}_2\text{O}_3$	15,70	14,70	15,70	14,40
Hierro	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	6,19	7,30	6,70	4,97
Calcio	$\text{CaO}$	1,22	3,55	1,36	3,46
Magnesio	$\text{MgO}$	0,00	3,46	0,00	3,96
Azufre	S	0,00	2,85	0,00	0,15
Potasio	$\text{K}_2\text{O}$	1,37	1,67	0,48	1,15
Titanio	$\text{TiO}_2$	0,69	0,69	0,64	0,50

Fuente: El Autor  
Elaboración: El autor

#### 4.2 Cálculo de asentamientos.

Para conocer el comportamiento del suelo de las zonas de estudio frente a una carga de cimentación se desarrolló una hoja electrónica, la cual, a partir de las dimensiones de una zapata y las características del suelo de las zonas de estudio obtenidas del ensayo de consolidación, permite obtener el asentamiento total de una estructura ocasionado por la carga transferida hacia el suelo.

Se han propuesto casos, para comparar el asentamiento del suelo producido en las distintas zonas de estudio analizadas en esta investigación.

### Ejemplo de cálculo

Se requieren construir varias viviendas en los sectores de El Ingenio, Colina de los Ceibos, La Vega y Trapichillo, que constan de planta baja, planta alta y una terraza como se muestra en las figuras 17 y 18, para lo cual se ha pedido al diseñador establecer en que sector, es más factible realizar la construcción de la vivienda.

La profundidad de la cimentación será 1.5 metros y el diseñador deberá analizar dos casos, el primero en el cual el estrato está conformado únicamente por arcilla y el segundo que se compone de dos estratos uno de arena y uno de arcilla. Además, se debe considerar el nivel de aguas freáticas como se muestra en los esquemas de los casos propuestos. Los datos adicionales de espesores, pesos específicos y dimensiones de cimentación se muestran en cada caso.

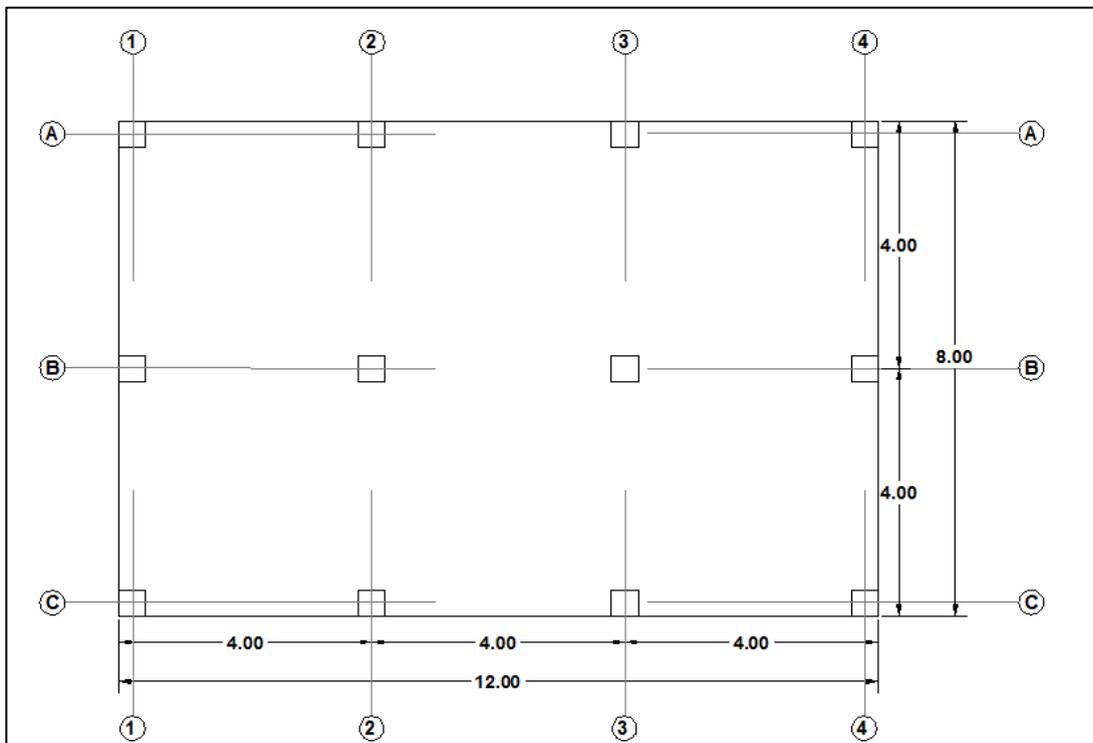


Figura 17: Geometría de la estructura vista en planta.

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

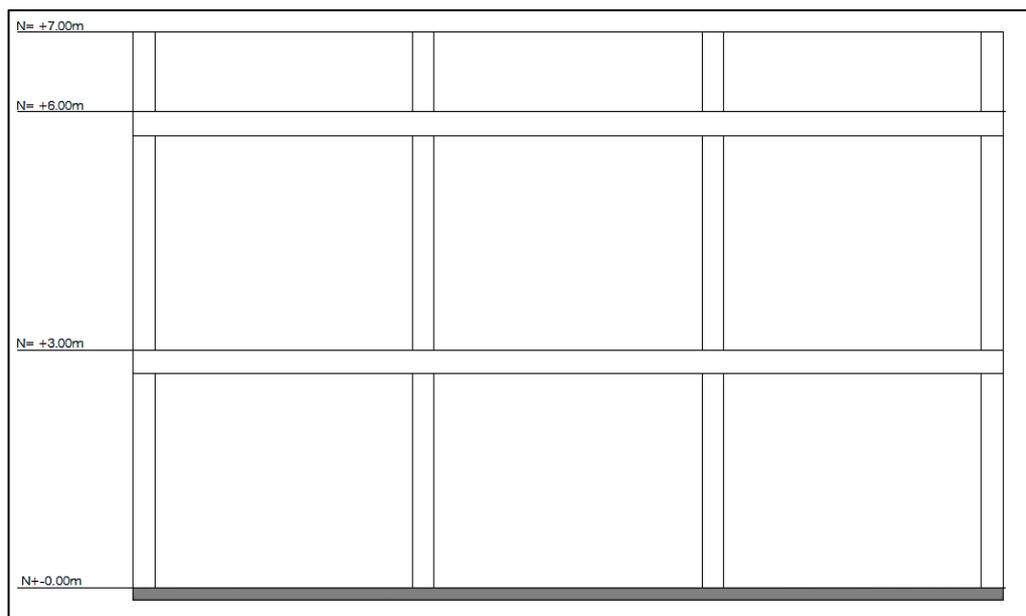


Figura 18: Geometría de la estructura vista en elevación.

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

Para los dos casos propuestos se debe determinar las columnas que soporten mayor carga y la magnitud de la misma. Se procede de la siguiente manera:

### **Cálculo de las cargas en cada columna.**

Para este cálculo fue necesario determinar la magnitud de las cargas vivas y muertas de la estructura, cabe recalcar que el análisis es superficial puesto que el objeto de este ejemplo es calcular los asentamientos.

De acuerdo con la normativa ecuatoriana de la construcción NEC-SE-CG: cargas (no sísmicas) en su apéndice 4.2 establece que:

- Viviendas unifamiliares poseen una carga viva de 2 kN/m<sup>2</sup>.
- Terrazas poseen una carga viva de 1 kN/m<sup>2</sup>.

Para el cálculo de la carga muerta de la estructura se determinó el peso propio de la misma, el cual está conformado por:

- Las paredes con una carga de 1.97 kN/m<sup>2</sup>.
- El contrapiso que para un espesor de 0.025 m proporcionó una carga de 0.55 kN/m<sup>2</sup>.
- Se consideró columnas de 0.30 x 0.30 m y vigas de 0.35x0.30 m y además una losa alivianada de 0.20 m de espesor y se obtuvo una carga de 5.6 kN/m<sup>2</sup>.

La carga muerta total obtenida tras realizar el análisis descrito fue de 8.11 kN/m<sup>2</sup> por cada planta.

Para el cálculo de la carga que soporta cada columna se aplicó la combinación más crítica establecida por la normativa que para este caso fue de 1.2D + 1.6L dando una carga total de la estructura de 24.27 kN/m<sup>2</sup>, y se la multiplicó por las áreas de aporte que se muestra en la figura 19 y se ha obtenido que la carga soportada por las columnas A1, A4, C1 y C4 es de 97 kN, para las columnas A2, A3, B1, B4, C2 y C3 es de 194kN y para las columnas B2 y B3 es de 388 kN.

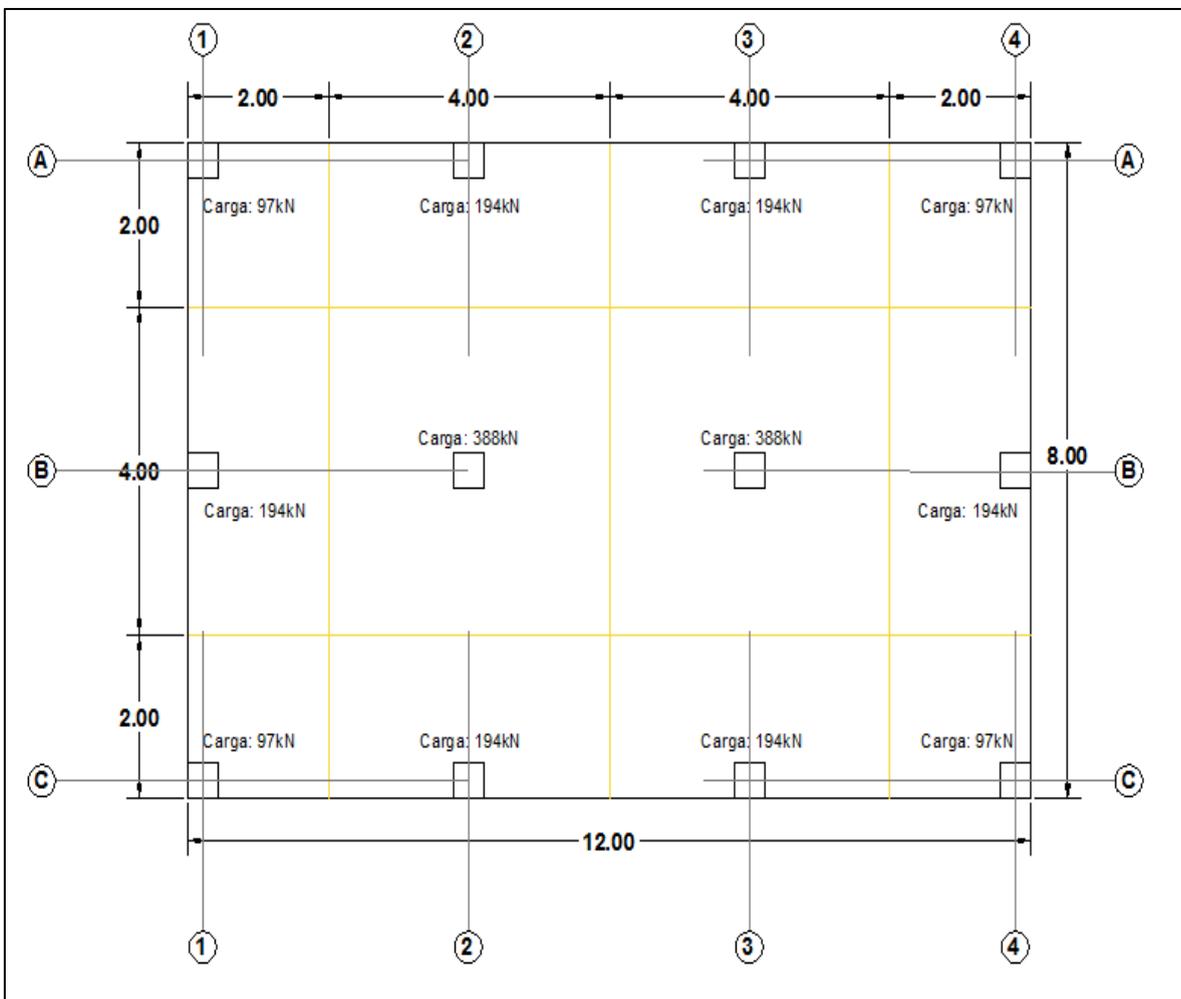


Figura 19: Áreas de aporte de carga de la estructura

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

Una vez se ha determinado que las columnas con mayor carga son B2 y B3 con 388 kN, se procede a la resolución de los casos propuestos:

## CASO 1 – Cimentación sobre estrato de arcilla y nivel freático bajo la cimentación.

Para este caso se han tomado los datos de la arcilla del sector Ingenio y se ha calculado de la siguiente manera:

### Datos:

**Carga:** 388 kN

**Largo:** 1.5 m

**Ancho:** 1.5 m

**Espesor arcilla:** 10 m

**Profundidad Cimentación:** 1.5 m

**$\gamma_{sat}$  de la Arcilla:** 21.88 kN/m<sup>3</sup>

**$\gamma_{natural}$  de la Arcilla:** 19.76 kN/m<sup>3</sup>

### Esquema:

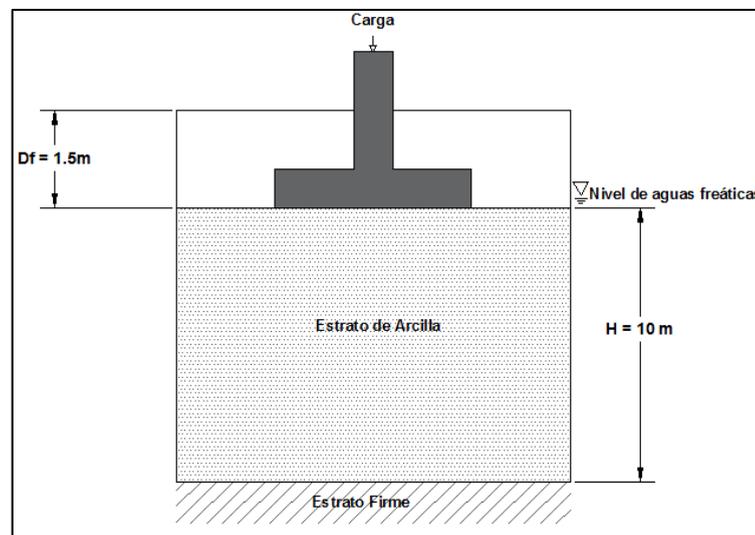


Figura 20: Esquema de zapata – Caso 1.

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

### 1) Cálculo del esfuerzo promedio en el estrato de arcilla.

Para el cálculo del asentamiento es necesario determinar el esfuerzo promedio de estrato de arcilla, para lo cual se utiliza la ecuación 2.20:

$$\Delta\sigma_{prom} = \frac{1}{6}(\Delta\sigma_s + 4\Delta\sigma_m + \Delta\sigma_i)$$

Se conoce del esquema que la potencia del estrato de arcilla es de 10 m, por lo que se deberá calcular el esfuerzo a 0 m, 5 m y 10 m respectivamente. Además, para iniciar el cálculo se ha propuesto una zapata de 1.5 m x 1.5 m que soportará la carga de la columna B2 que se muestra en la figura 19, que posee una carga unitaria  $q_o = 172.44 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Para H = 0m, se utilizan las ecuaciones 2.11 hasta 2.15.

$$m_1 = \frac{L}{B} = \frac{1.5m}{1.5m} = 1 \quad ; \quad n_1 = \frac{H}{\left(\frac{B}{2}\right)} = \frac{0m}{\left(\frac{1.5m}{2}\right)} = 0$$

$$I_c = \frac{2}{\pi} \left( \frac{m_1 n_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + 1}} x \frac{m_1^2 + 2n_1^2 + 1}{(1 + n_1^2)(m_1^2 + n_1^2)} + \text{sen}^{-1} \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2} \sqrt{1 + n_1^2}} \right)$$

$$I_c = \frac{2}{\pi} \left( \frac{1 \times 0}{\sqrt{1^2 + 0^2 + 1}} x \frac{1^2 + 2 \times 0^2 + 1}{(1 + 0^2)(1^2 + 0^2)} + \text{sen}^{-1} \frac{1}{\sqrt{1^2 + 0^2} \sqrt{1 + 0^2}} \right) = 1$$

$$\Delta\sigma_s = q_o I_c = 1 \times 172.44 \frac{kN}{m^2} = 172.44 \frac{kN}{m^2}$$

Para H = 5m, se utilizan las ecuaciones 2.11 hasta 2.15.

$$m_1 = \frac{L}{B} = \frac{1.5m}{1.5m} = 1 \quad ; \quad n_1 = \frac{H}{\left(\frac{B}{2}\right)} = \frac{5m}{\left(\frac{1.5m}{2}\right)} = 6.7$$

$$I_c = \frac{2}{\pi} \left( \frac{m_1 n_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + 1}} x \frac{m_1^2 + 2n_1^2 + 1}{(1 + n_1^2)(m_1^2 + n_1^2)} + \text{sen}^{-1} \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2} \sqrt{1 + n_1^2}} \right)$$

$$I_c = \frac{2}{\pi} \left( \frac{1 \times 6.7}{\sqrt{1^2 + 10^2 + 1}} x \frac{1^2 + 2 \times 6.7^2 + 1}{(1 + 6.7^2)(1^2 + 6.7^2)} + \text{sen}^{-1} \frac{1}{\sqrt{1^2 + 6.7^2} \sqrt{1 + 6.7^2}} \right) = 0.041$$

$$\Delta\sigma_m = q_o I_c = 0.041 \times 172.44 \frac{kN}{m^2} = 7.07 \frac{kN}{m^2}$$

Para H = 10m, se utilizan las ecuaciones 2.11 hasta 2.15.

$$m_1 = \frac{L}{B} = \frac{1.5m}{1.5m} = 1 \quad ; \quad n_1 = \frac{H}{\left(\frac{B}{2}\right)} = \frac{10m}{\left(\frac{1.5m}{2}\right)} = 13.33$$

$$I_c = \frac{2}{\pi} \left( \frac{m_1 n_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + 1}} x \frac{m_1^2 + 2n_1^2 + 1}{(1 + n_1^2)(m_1^2 + n_1^2)} + \text{sen}^{-1} \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2} \sqrt{1 + n_1^2}} \right)$$

$$I_c = \frac{2}{\pi} \left( \frac{1 \times 13.3}{\sqrt{1^2 + 20^2 + 1}} x \frac{1^2 + 2 \times 13.3^2 + 1}{(1 + 13.3^2)(1^2 + 13.3^2)} + \text{sen}^{-1} \frac{1}{\sqrt{1^2 + 13.3^2} \sqrt{1 + 13.3^2}} \right) = 0.011$$

$$\Delta\sigma_i = q_o I_c = 0.011 \times 172.44 \frac{kN}{m^2} = 1.90 \frac{kN}{m^2}$$

De tal manera que el esfuerzo promedio es el siguiente:

$$\Delta\sigma_{prom} = \frac{1}{6} (\Delta\sigma_s + 4\Delta\sigma_m + \Delta\sigma_i)$$

$$\Delta\sigma_{prom} = \frac{1}{6} (172.44 + 4 \times 7.07 + 1.90) \frac{kN}{m^2} = 33.81 \frac{kN}{m^2}$$

## 2) Cálculo de asentamiento instantáneo.

El asentamiento elástico es calculado mediante las siguientes metodologías:

### Método de Janbú y colaboradores (1956)

$$\frac{Df}{B} = \frac{1.5m}{1.5m} = 1 \wedge \frac{H}{B} = \frac{10m}{1.5m} = 6.7 \quad \therefore A_2 = 0.920$$

$$\frac{H}{B} = \frac{10m}{1.5m} = 6.7 \wedge \frac{L}{B} = \frac{1.5m}{1.5m} = 1 \quad \therefore A_1 = 0.640$$

Para la obtener  $A_1$  y  $A_2$ , se han utilizado las gráficas del libro de Fundamentos de Ingeniería de cimentaciones (Das, 2012), pág. 244. Se aplica la ecuación 2.24.

$$S_e = A_1 A_2 \frac{q_o B}{E_s}$$

$$S_e = 0.640 \times 0.920 * \frac{172.44 \frac{kN}{m^2} \times 1.5m}{28.13 \times 10^3 \frac{kN}{m^2}} = 0.0054m = 5.414mm$$

### Método basado en la teoría de la elasticidad

Para el asentamiento en el centro de la zapata se utilizan las ecuaciones 2.30 y 2.31:

$$\alpha = 4$$

$$m' = \frac{L}{B} = \frac{1.5m}{1.5m} = 1$$

$$n' = \frac{2H}{B} = \frac{2 \times 10m}{1.5m} = 13.33$$

A partir de estas relaciones y en función de las tablas del libro de Fundamentos de Ingeniería de cimentaciones (Das, 2012), pág. 248 - 251. Se determinaron los valores de  $F_1 = 0.508$  y  $F_2 = 0.013$ , para calcular  $I_s$  con la ecuación 2.26.

$$I_s = F_1 + \frac{1 - 2u_s}{1 - u_s} F_2 = 0.508 + \frac{1 - 2 \times 0.5}{1 - 0.5} \times 0.013 = 0.508$$

$$\frac{Df}{B} = \frac{1.5m}{1.5m} = 1 \wedge \frac{L}{B} = \frac{1.5m}{1.5m} = 1 \wedge u_s = 0.5$$

A partir de estas relaciones y en función de la tabla del libro de Fundamentos de Ingeniería de cimentaciones (Das, 2012), pág. 252. Se determinó el valor de  $I_f = 0.720$  y se calculó  $S_e$  con la ecuación 2.24.

$$S_e = q_o(\alpha B') \frac{1 - u_s^2}{E_s} I_s I_f = 172.44 \frac{kN}{m^2} \times (4 \times 0.5 \times 1.5m) \times \frac{1 - 0.5^2}{28.13 \times 10^3 \frac{kN}{m^2}} \times 0.508 \times 0.720 = 0.00504m$$

$$S_e = 5.045mm$$

De estos dos valores se selecciona el valor mayor de  $S_e = 5.414 mm$ .

### 3) Cálculo de asentamiento por consolidación primaria

Para este caso se está analizando la arcilla del Ingenio que de acuerdo con los datos obtenidos del ensayo de consolidación el valor de OCR = 4.14, es decir se trata de una arcilla sobre consolidada, Se procedió de la siguiente manera:

- Se calcula la presión efectiva con la ecuación 2.2a.

$$\begin{aligned} \sigma'_o &= (D_f)(\gamma_{natural}) + \left(\frac{H}{2}\right)(\gamma_{sat} - \gamma_w) \\ \sigma'_o &= 1.5m \times 19.76 \frac{kN}{m^3} + \frac{10m}{2} \times (21.88 \frac{kN}{m^3} - 9.81 \frac{kN}{m^3}) \\ \sigma'_o &= 89.99 \frac{kN}{m^2} \end{aligned}$$

- Se comprueba las condiciones para arcilla sobreconsolidada

Condición 1:  $\sigma'_o + \Delta\sigma_{prom} \leq \sigma'_c$

$$89.99 \frac{kN}{m^2} + 33.81 \frac{kN}{m^2} \leq 122.63 \frac{kN}{m^2}$$

$$123.8 \frac{kN}{m^2} \leq 122.63 \text{ **No cumple**}$$

Condición 2:  $\sigma'_o < \sigma'_c < (\sigma'_o + \Delta\sigma_{prom})$

$$89.99 \frac{kN}{m^2} < 122.63 \frac{kN}{m^2} \leq 89.99 \frac{kN}{m^2} + 33.81 \frac{kN}{m^2}$$

$$89.99 \frac{kN}{m^2} < 122.63 \frac{kN}{m^2} \leq 123.8 \frac{kN}{m^2} \text{ **cumple**}$$

Cuando se cumple la segunda condición se aplica la ecuación 2.37:

$$S_p = \frac{C_s H}{1 + e_o} \log\left(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_o}\right) + \frac{C_c H}{1 + e_o} \log\left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma_{prom}}{\sigma'_c}\right)$$

$$S_p = \frac{0.0159 \times 10}{1 + 1.259} \log\left(\frac{122.63 \frac{kN}{m^2}}{89.99 \frac{kN}{m^2}}\right) + \frac{0.189 \times 10}{1 + 1.259} \log\left(\frac{89.99 \frac{kN}{m^2} + 33.81 \frac{kN}{m^2}}{122.63 \frac{kN}{m^2}}\right)$$

$$S_p = 0.013m = 12.91mm$$

#### 4) Cálculo de asentamiento por consolidación secundaria

Como se conoce que se cumple la condición 2 se aplican las ecuaciones 2.42 a 2.46.

$$\Delta e = C_s \log\left(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_o}\right) + C_c \log\left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma_{prom}}{\sigma'_c}\right)$$

$$\Delta e = 0.0159 \times \log\left(\frac{122.63 \frac{kN}{m^2}}{89.99 \frac{kN}{m^2}}\right) + 0.189 \times \log\left(\frac{89.99 \frac{kN}{m^2} + 33.81 \frac{kN}{m^2}}{122.63 \frac{kN}{m^2}}\right)$$

$$\Delta e = 0.0029$$

$$e_p = e_o - \Delta e = 1.259 - 0.0029 = 1.2561$$

$$C_{\alpha} = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)} = \frac{0.0029}{\log\left(\frac{25 \text{ años}}{1 \text{ año}}\right)} = 0.002074$$

$$C'_{\alpha} = \frac{C_{\alpha}}{1 + e_p} = \frac{0.0021}{1 + 1.2561} = 0.00093$$

$$S_s = C'_{\alpha} H \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) = 0.001 \times 10m \times \log\left(\frac{25 \text{ años}}{1 \text{ año}}\right) = 0.013001m = 13.00mm$$

### 5) Cálculo de asentamiento total.

El asentamiento total es la suma de los asentamientos calculados, ecuación 2.10:

$$S_{t(flexible)} = S_e + S_p + S_s$$

$$S_{t(flexible)} = 5.41mm + 12.91mm + 13.00mm$$

$$S_{t(flexible)} = 31.32mm$$

**Nota:** Con la hoja de cálculo se obtuvo: 31.55 mm, que es un valor muy aproximado.

Este valor representa el asentamiento para una zapata flexible, para una zapata rígida se aplica la siguiente ecuación:

$$S_{e(rígida)} \approx 0.93xS_{e(flexible)}$$

$$S_{t(rígida)} = 0.93xS_{e(flexible)} + S_p + S_s$$

$$S_{t(rígida)} = 0.93x5.41mm + 12.91mm + 13.00mm$$

$$S_{t(rígida)} = 30.94mm$$

**Nota:** Con la hoja de cálculo se obtuvo: 31.15 mm, que es un valor muy aproximado.

### 6) Cálculo de asentamiento total mediante hoja de cálculo.

Para el cálculo del asentamiento bajo las condiciones expuestas, se utilizó la hoja de Excel en la cual, primeramente, se seleccionó el lugar que se iba a analizar ya sea: Ingenio, Colina de los Ceibos, La Vega y Trapichillo. A continuación, se ingresaron los datos de la geometría de la zapata y la carga que soporta, adicionalmente se ingresaron los datos de espesor del estrato de arcilla y la profundidad de cimentación. El módulo de Poisson utilizado fue de 0.5

puesto que es una arcilla en estado saturado. Cabe recalcar que se ha tomado nuevas dimensiones de zapata (2 x 2 m) y profundidad de cimentación (2 m), con la finalidad de cumplir los asentamientos diferenciales. Finalmente se obtuvieron los siguientes resultados:

### Resultados de asentamiento total:

En la tabla 11 se muestran los resultados del asentamiento de una zapata de 2x2 m con una profundidad de cimentación de 2 m, se puede apreciar que en el sector Colina de los Ceibos el asentamiento es menor en relación con los otros sectores, por el contrario, el sector Trapichillo presenta el mayor asentamiento de todos los sectores. Además, es evidente que los asentamientos en todos los sectores son tolerables puesto que se encuentran bajo el límite máximo de 0.20 m establecido por la normativa ecuatoriana de la construcción NEC-SE-GC, siempre y cuando la construcción sea aislada, en el caso de que la construcción se encuentre entre medianeros, la misma normativa establece que el asentamiento máximo permitido es de 0.10 m. En este ejemplo todos los sectores cumplen con los asentamientos que permite la normativa, pero en el caso de no cumplir es recomendable aumentar las dimensiones de la zapata o en su defecto implementar una capa de mejoramiento.

Tabla 11: Resultados de asentamientos zapata B2 – Caso 1.

Sector	Asentamiento en la cimentación de la columna B2				
	Carga (kN)	Largo (m)	Ancho (m)	A. Cimentación Flexible	A. Cimentación Rígida
Ingenio	388	2,00	2,00	15,87 mm	15,58 mm
Colina de Ceibos	388	2,00	2,00	11,22 mm	10,96 mm
La Vega	388	2,00	2,00	20,95 mm	20,72 mm
Trapichillo	388	2,00	2,00	27,00 mm	26,76 mm

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

### Resultados de asentamiento diferencial:

Para el cálculo del asentamiento diferencial se calculó el asentamiento total de la zapata con carga de la columna C2 y los resultados se muestran en la tabla 12, tomando una zapata de 1.5 x 1.5 m, profundidad de cimentación 1.5 m y la carga mostrada en la figura 19.

Tabla 12: Resultados de asentamientos zapata C2 – Caso 1.

Sector	Asentamiento en la cimentación de la columna C2				
	Carga (kN)	Largo (m)	Ancho (m)	A. Cimentación Flexible	A. Cimentación Rígida
Ingenio	194	1,50	1,50	13,37 mm	13,17 mm
Colina de Ceibos	194	1,50	1,50	9,29 mm	9,11 mm
La Vega	194	1,50	1,50	18,42 mm	18,26 mm
Trapichillo	194	1,50	1,50	23,84 mm	23,68 mm

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

El asentamiento diferencial es la diferencia entre los asentamientos de las zapatas B2 – C2, de acuerdo con la normativa ecuatoriana de la construcción NEC-SE-GC, establece que para edificaciones con muros de carga en concreto o en mampostería el valor máximo de asentamiento diferencial permitido es de  $L/500$ , donde L es la distancia entre columnas.

Para una luz de 4 m entre las columnas B2 – C2 se tiene que el asentamiento diferencial máximo permitido es 0.008 m  $\approx$  8 mm, en la tabla 13 se encuentran los valores de asentamiento diferencial y se puede apreciar que están dentro del rango admitido por la normativa.

Tabla 13: Asentamiento diferencial entre B2 – C2 Caso 1.

Asentamiento Diferencial en las columnas B2 - C2		
Sector	A. Cimentación Flexible	A. Cimentación Rígida
Ingenio	2,51 mm	2,41 mm
Colina de Ceibos	1,94 mm	1,85 mm
La Vega	2,53 mm	2,46 mm
Trapichillo	3,16 mm	3,08 mm

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

En este caso las dimensiones de la cimentación dependerán no sólo del asentamiento total bajo la zapata, sino que también dependen del asentamiento de las zapatas aledañas, puesto que en la normativa también se establece el control de asentamientos diferenciales. En el ejemplo de cálculo caso 1, se calculó el asentamiento diferencial entre la zapata B2 de 1.5 m x 1.5 m y la zapata C2 de 1.5 m x 1.5 m, pero al no cumplir los asentamientos diferenciales se optó por dimensiones de 2 m x 2 m en la zapata B2 (tabla 11), de manera que los asentamientos diferenciales están dentro del rango permitido por la normativa NEC – 15 como se muestra en la tabla 13.

## CASO 2 – Cimentación sobre estrato de arena y arcilla con nivel freático en el estrato de arena.

Para este caso se han tomado los datos de la arcilla del sector Ingenio y se han propuesto datos de la capa de arena. Se ha calculado de la siguiente manera:

### Datos:

**Carga:** 388 kN

**Largo:** 1.5 m

**Ancho:** 1.5 m

**Espesor arcilla:** 8 m

**Profundidad Cimentación:** 1.5m

**$\gamma_{sat}$  de la Arcilla:** 21.88 kN/m<sup>3</sup>

**$\gamma_{natural}$  de la Arcilla:** 19.76 kN/m<sup>3</sup>

**$\gamma_{sat}$  de la Arena:** 17.5 kN/m<sup>3</sup>

**$\gamma$  de la Arena:** 16.5 kN/m<sup>3</sup>

### Esquema:

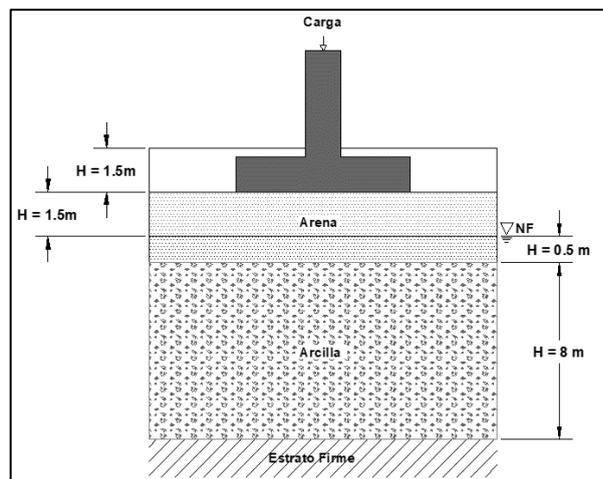


Figura 21: Esquema de zapata – Caso 2.  
Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

## 7) Cálculo del esfuerzo promedio en el estrato de arcilla.

Se ha propuesto una zapata de 1.5m x 1.5m que soportará la carga de la columna B2 que se muestra en la figura 19, que posee una carga unitaria  $q_o = 172.44 \frac{kN}{m^2}$

Para el cálculo del asentamiento es necesario determinar el esfuerzo promedio de estrato de arcilla, para lo cual se utiliza la ecuación 2.20:

$$\Delta\sigma_{prom} = \frac{1}{6} (\Delta\sigma_s + 4\Delta\sigma_m + \Delta\sigma_i)$$

El esfuerzo es de la capa de arcilla que está bajo la capa de arena por lo tanto se determina el esfuerzo al inicio, centro y final de la capa de arcilla.

Para H = 2m, profundidad a la que se encuentra el inicio de la capa de arcilla, se utilizan las ecuaciones 2.11 hasta 2.15.

$$m_1 = \frac{L}{B} = \frac{1.5m}{1.5m} = 1 \quad ; \quad n_1 = \frac{H}{\left(\frac{B}{2}\right)} = \frac{2m}{\left(\frac{1.5m}{2}\right)} = 2.67$$

$$I_c = \frac{2}{\pi} \left( \frac{m_1 n_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + 1}} x \frac{m_1^2 + 2n_1^2 + 1}{(1 + n_1^2)(m_1^2 + n_1^2)} + \text{sen}^{-1} \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2} \sqrt{1 + n_1^2}} \right)$$

$$I_c = \frac{2}{\pi} \left( \frac{1x2.67}{\sqrt{1^2 + 2.67^2 + 1}} x \frac{1^2 + 2x2.67^2 + 1}{(1 + 2.67^2)(1^2 + 2.67^2)} + \text{sen}^{-1} \frac{1}{\sqrt{1^2 + 2.67^2} \sqrt{1 + 2.67^2}} \right) = 0.217$$

$$\Delta\sigma_s = q_o I_c = 0.217x172.44 \frac{kN}{m^2} = 37.42 \frac{kN}{m^2}$$

Para H = 2m +(8/2) m = 6 m, a la mitad del estrato de arcilla, se utilizan las ecuaciones 2.11 hasta 2.15.

$$m_1 = \frac{L}{B} = \frac{1.5m}{1.5m} = 1 \quad ; \quad n_1 = \frac{H}{\left(\frac{B}{2}\right)} = \frac{6m}{\left(\frac{1.5m}{2}\right)} = 8$$

$$I_c = \frac{2}{\pi} \left( \frac{m_1 n_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + 1}} x \frac{m_1^2 + 2n_1^2 + 1}{(1 + n_1^2)(m_1^2 + n_1^2)} + \text{sen}^{-1} \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2} \sqrt{1 + n_1^2}} \right)$$

$$I_c = \frac{2}{\pi} \left( \frac{1x8}{\sqrt{1^2 + 8^2 + 1}} x \frac{1^2 + 2x8^2 + 1}{(1 + 8^2)(1^2 + 8^2)} + \text{sen}^{-1} \frac{1}{\sqrt{1^2 + 8^2} \sqrt{1 + 8^2}} \right) = 0.029$$

$$\Delta\sigma_m = q_o I_c = 0.029x172.44 \frac{kN}{m^2} = 5.00 \frac{kN}{m^2}$$

Para H = 2m +8m = 10 m, al final del estrato de arcilla, se utilizan las ecuaciones 2.11 hasta 2.15.

$$m_1 = \frac{L}{B} = \frac{1.5m}{1.5m} = 1 \quad ; \quad n_1 = \frac{H}{\left(\frac{B}{2}\right)} = \frac{10m}{\left(\frac{1.5m}{2}\right)} = 13.33$$

$$I_c = \frac{2}{\pi} \left( \frac{m_1 n_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + 1}} x \frac{m_1^2 + 2n_1^2 + 1}{(1 + n_1^2)(m_1^2 + n_1^2)} + \text{sen}^{-1} \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2} \sqrt{1 + n_1^2}} \right)$$

$$I_c = \frac{2}{\pi} \left( \frac{1 \times 13.3}{\sqrt{1^2 + 20^2 + 1}} \times \frac{1^2 + 2 \times 13.3^2 + 1}{(1 + 13.3^2)(1^2 + 13.3^2)} + \text{sen}^{-1} \frac{1}{\sqrt{1^2 + 13.3^2} \sqrt{1 + 13.3^2}} \right) = 0.011$$

$$\Delta\sigma_i = q_o I_c = 0.011 \times 172.44 \frac{kN}{m^2} = 1.90 \frac{kN}{m^2}$$

De tal manera que el esfuerzo promedio es el siguiente:

$$\Delta\sigma_{prom} = \frac{1}{6} (\Delta\sigma_s + 4\Delta\sigma_m + \Delta\sigma_i)$$

$$\Delta\sigma_{prom} = \frac{1}{6} (37.42 + 4 \times 5.00 + 1.90) \frac{kN}{m^2} = 9.89 \frac{kN}{m^2}$$

### 8) Cálculo de asentamiento instantáneo.

El asentamiento elástico es calculado mediante las siguientes metodologías:

#### Método de Janbú y colaboradores (1956)

$$\frac{Df}{B} = \frac{1.5m}{1.5m} = 1 \wedge \frac{H}{B} = \frac{8m}{1.5m} = 5.33 \quad \therefore A_2 = 0.920$$

$$\frac{H}{B} = \frac{8m}{1.5m} = 5.33 \wedge \frac{L}{B} = \frac{1.5m}{1.5m} = 1 \quad \therefore A_1 = 0.640$$

Para la obtener  $A_1$  y  $A_2$ , se han utilizado las gráficas del libro de Fundamentos de Ingeniería de cimentaciones (Das, 2012), pág. 244. Se aplica la ecuación 2.24.

$$S_e = A_1 A_2 \frac{q_o B}{E_s}$$

$$S_e = 0.640 \times 0.920 * \frac{172.44 \frac{kN}{m^2} \times 1.5m}{28.13 \times 10^3 \frac{kN}{m^2}} = 0.0054m = 5.414mm$$

#### Método basado en la teoría de la elasticidad

Para el asentamiento en el centro de la zapata se utilizan las ecuaciones 2.30 y 2.31:

$$\alpha = 4$$

$$m' = \frac{L}{B} = \frac{1.5m}{1.5m} = 1$$

$$n' = \frac{2H}{B} = \frac{2 \times 8m}{1.5m} = 10.67$$

A partir de estas relaciones y en función de las tablas del libro de Fundamentos de Ingeniería de cimentaciones (Das, 2012), pág. 248 - 251. Se determinaron los valores de  $F_1 = 0.50$  y  $F_2 = 0.0155$ , para calcular  $I_s$  con la ecuación 2.26.

$$I_s = F_1 + \frac{1 - 2u_s}{1 - u_s} F_2 = 0.50 + \frac{1 - 2 \times 0.5}{1 - 0.5} \times 0.0155 = 0.50$$

$$\frac{Df}{B} = \frac{1.5m}{1.5m} = 1 \wedge \frac{L}{B} = \frac{1.5m}{1.5m} = 1 \wedge u_s = 0.5$$

A partir de estas relaciones y en función de la tabla del libro de Fundamentos de Ingeniería de cimentaciones (Das, 2012), pág. 252. Se determinó el valor de  $I_f = 0.720$  y se calculó  $S_e$  con la ecuación 2.24.

$$S_e = q_o(\alpha B') \frac{1 - u_s^2}{E_s} I_s I_f = 172.44 \frac{kN}{m^2} \times (4 \times 0.5 \times 1.5m) \times \frac{1 - 0.5^2}{28.13 \times 10^3 \frac{kN}{m^2}} \times 0.50 \times 0.720 = 0.00497m$$

$$S_e = 4.965mm$$

De estos dos valores se selecciona el valor mayor de  $S_e = 5.414 mm$ .

## 9) Cálculo de asentamiento por consolidación primaria

Para este caso se está analizando la arcilla del Ingenio que de acuerdo con los datos obtenidos del ensayo de consolidación el valor de OCR = 4.14, es decir se trata de una arcilla sobre consolidada, Se procedió de la siguiente manera:

- Se calcula la presión efectiva con la ecuación 2.2a.

$$\sigma'_o = (D_f)(\gamma_{arena}) + (h_1)(\gamma_{arena}) + (h_2)(\gamma_{sat arena} - \gamma_w) + \left(\frac{H}{2}\right)(\gamma_{sat} - \gamma_w)$$

$$\sigma'_o = 1.5m \times 16.5 \frac{kN}{m^3} + 1.5m \times 16.5 \frac{kN}{m^3} + 0.5m \times (17.5 \frac{kN}{m^3} - 9.81 \frac{kN}{m^3}) + \frac{8m}{2} \times (21.88 \frac{kN}{m^3} - 9.81 \frac{kN}{m^3})$$

$$\sigma'_o = 101.625 \frac{kN}{m^2}$$

- Se comprueba las condiciones para arcilla sobreconsolidada

Condición 1:  $\sigma'_o + \Delta\sigma_{prom} \leq \sigma'_c$

$$101.63 \frac{kN}{m^2} + 9.89 \frac{kN}{m^2} \leq 122.63 \frac{kN}{m^2}$$

$$111.52 \frac{kN}{m^2} \leq 122.63 \text{ **cumple**}$$

Cuando se cumple la primera condición se aplica la ecuación 2.36:

$$S_p = \frac{C_s H}{1 + e_o} \log\left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'}{\sigma'_o}\right)$$

$$S_p = \frac{0.0159 \times 8m}{1 + 1.259} \log\left(\frac{101.63 \frac{kN}{m^2} + 9.89 \frac{kN}{m^2}}{101.63 \frac{kN}{m^2}}\right)$$

$$S_p = 0.0023m = 2.271mm$$

## 10) Cálculo de asentamiento por consolidación secundaria

Como se conoce que se cumple la condición 1 se aplican las ecuaciones 2.41 y 2.43 hasta 2.46

$$\Delta e = C_s \log\left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'}{\sigma'_o}\right)$$

$$\Delta e = 0.016 \times \log\left(\frac{101.63 \frac{kN}{m^2} + 9.89 \frac{kN}{m^2}}{101.63 \frac{kN}{m^2}}\right)$$

$$\Delta e = 0.00065$$

$$e_p = e_o - \Delta e = 1.259 - 0.00065 = 1.2584$$

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)} = \frac{0.00065}{\log\left(\frac{25 \text{ años}}{1 \text{ año}}\right)} = 0.000465$$

$$C'_\alpha = \frac{C_\alpha}{1 + e_p} = \frac{0.0005}{1 + 1.2584} = 0.000221$$

$$S_s = C'_\alpha H \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) = 0.000221 \times 8m \times \log\left(\frac{25\text{años}}{1\text{año}}\right) = 0.0025m = 2.4716mm$$

### 11) Cálculo de asentamiento total.

El asentamiento total es la suma de los asentamientos calculados, ecuación 2.10:

$$S_{t(\text{flexible})} = S_e + S_p + S_s$$

$$S_{t(\text{flexible})} = 5.41mm + 2.27mm + 2.47mm$$

$$S_{t(\text{flexible})} = 10.15mm$$

**Nota:** Con la hoja de cálculo se obtuvo: 10.11 mm, que es un valor muy aproximado.

Este valor representa el asentamiento para una zapata flexible, para una zapata rígida se aplica la siguiente ecuación:

$$S_{e(\text{rígida})} \approx 0.93xS_{e(\text{flexible})}$$

$$S_{t(\text{rígida})} = 0.93xS_{e(\text{flexible})} + S_p + S_s$$

$$S_{t(\text{rígida})} = 0.93x5.41mm + 2.27mm + 2.47mm$$

$$S_{t(\text{rígida})} = 9.77mm$$

**Nota:** Con la hoja de cálculo se obtuvo: 9.72 mm, que es un valor muy aproximado.

### 12) Cálculo de asentamiento total mediante hoja de cálculo.

#### Resultados de asentamiento total:

En la tabla 14 se muestran los resultados del asentamiento de la cimentación con un estrato de arcilla y otro de arena.

Tabla 14: Resultados de asentamientos zapata B2 – Caso 2.

Asentamiento en la cimentación de la columna B2					
Sector	Carga (kN)	Largo (m)	Ancho (m)	A. Cimentación Flexible	A. Cimentación Rígida
Ingenio	388	1,50	1,50	10,11 mm	9,72 mm
Colina de Ceibos	388	1,50	1,50	7,90 mm	7,55 mm
La Vega	388	1,50	1,50	10,68 mm	10,37 mm
Trapichillo	388	1,50	1,50	13,15 mm	12,83 mm

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

### Resultados de asentamiento diferencial:

Para el cálculo del asentamiento diferencial se calculó el asentamiento total en la zapata que va a soportar la carga de la columna C2 y los resultados se muestran en la tabla 15, con una zapata de 1.5 m x 1.5 m, profundidad de cimentación de 1.5m y la carga mostrada en la figura 19.

Tabla 15: Resultados de asentamientos zapata C2 – Caso 2.

Asentamiento en la cimentación de la columna C2					
Sector	Carga (kN)	Largo (m)	Ancho (m)	A. Cimentación Flexible	A. Cimentación Rígida
Ingenio	194	1,50	1,50	5,11 mm	4,91 mm
Colina de Ceibos	194	1,50	1,50	3,98 mm	3,81 mm
La Vega	194	1,50	1,50	5,43 mm	5,27 mm
Trapichillo	194	1,50	1,50	6,69 mm	6,53 mm

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

El asentamiento diferencial es la diferencia entre los asentamientos de las zapatas B2 – C2, de acuerdo con la normativa ecuatoriana de la construcción NEC-SE-GC, establece que para edificaciones con muros de carga en concreto o en mampostería el valor máximo de asentamiento diferencial permitido es de  $L/500$ , donde L es la distancia entre columnas.

Para una luz de 4 m entre las columnas B2 – C2 se tiene que el asentamiento diferencial máximo permitido es 0.008 m  $\approx$  8 mm, en la tabla 16 se encuentran los valores de asentamiento diferencial y se puede apreciar que están dentro del rango admitido por la normativa.

Tabla 16: Asentamiento diferencial entre B2 – C2 Caso 2.

Asentamiento Diferencial en las columnas B2 - C2		
Sector	St Cimentación F.	St Cimentación R.
Ingenio	5,00 mm	4,81 mm
Colina de Ceibos	3,92 mm	3,74 mm
La Vega	5,26 mm	5,10 mm
Trapichillo	6,46 mm	6,30 mm

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

## CONCLUSIONES

Tras haber realizado la investigación y el análisis de resultados que permitieron culminar este trabajo de fin de titulación, expongo las siguientes conclusiones:

- En esta investigación, se han propuesto dos casos de estudio: el caso uno en el que la cimentación se encuentra sobre un estrato de arcilla y el caso dos en el que la cimentación se encuentra sobre un estrato de arena y arcilla. Se ha podido concluir que el asentamiento total de una zapata perteneciente a una vivienda unifamiliar de dos plantas es menor en el caso dos.
- El asentamiento obtenido en el caso de estudio uno para la zapata de una vivienda unifamiliar, es menor en sector Colina de los Ceibos con una magnitud de 11.22 mm, seguido del sector Ingenio con 15.87 mm y el sector La Vega con 20.95 mm, finalmente el sector de Trapichillo presenta el mayor asentamiento con un valor de 27.00 mm. Con estos valores se puede concluir que para las condiciones expuestas en el caso uno, los asentamientos de la cimentación están dentro del rango permitido por la normativa NEC-SE-GC.
- El asentamiento obtenido en el caso de estudio dos para la zapata de una vivienda unifamiliar, es menor en sector Colina de los Ceibos con una magnitud de 3.98 mm, seguido del sector Ingenio con 5.11 mm y el sector La Vega con 5.43 mm, finalmente el sector de Trapichillo presenta el mayor asentamiento con un valor de 6.69 mm. Con estos valores se puede concluir que para las condiciones expuestas en el caso uno, los asentamientos de la cimentación están dentro del rango permitido por la normativa NEC-SE-GC
- Las arcillas de las zonas de estudio han sido catalogadas como sobreconsolidadas, puesto que los valores de OCR obtenidos en el ensayo de consolidación se encuentran en el rango de 1.5 a 10. Esto se debe a que en su historial geológico estas arcillas han experimentado esfuerzos más altos.
- Las arcillas predominantes en las zonas de estudio corresponden a arcillas de alta plasticidad de acuerdo con la clasificación de suelos SUCS, esto se debe a que la mayoría de muestras analizadas poseen límites líquidos e índices de plasticidad superiores a 58% y 35% respectivamente.

- El análisis de las muestras mediante fluorescencia de rayos X, ha determinado que los componentes más representativos de las arcillas de las zonas de estudio son dióxido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y dióxido de hierro III ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y otros componentes en cantidades menores como óxidos de: calcio, magnesio, azufre, potasio y titanio.
- En los resultados obtenidos del ensayo de consolidación, es evidente que a medida que se aumenta la carga el coeficiente de permeabilidad hidráulica disminuye, esto sucede por la expulsión del agua y el acomodamiento de las partículas del suelo.
- Con esta investigación se ha podido determinar que el asentamiento por consolidación depende principal de las propiedades del suelo, de la magnitud de carga que soporta, de la geometría de la cimentación y de la potencia del estrato de suelo.
- Los parámetros de consolidación obtenidos en esta investigación son un referente para la construcción de nuevas obras civiles en las zonas de estudio puesto que con el control de asentamientos se brinda mayor seguridad a las estructuras y consecuentemente a la ciudadanía.
- Las metodologías aplicadas para la obtención del índice de consolidación fueron el método logarítmico y el método de la raíz cuadrada, los cuales proporcionan resultados similares, sin embargo, el rango de similitud entre estos dos métodos depende de la precisión y percepción con que se realicen, puesto que al ser métodos gráficos pueden ocasionar estimaciones erróneas.

## RECOMENDACIONES

- Antes de edificar una estructura es recomendable realizar los estudios de suelos que permitan conocer el comportamiento del mismo, esto permitirá que el diseñador elija el tipo de cimentación adecuada.
- En el caso de que las curvas del ensayo de consolidación con consolidómetro de tipo fijo, realizadas mediante el método logarítmico no presenten la forma característica de este tipo de curvas, se recomienda aplicar el método de Taylor.
- Generalmente en las ecuaciones aplicadas es necesario realizar la lectura de gráficas para obtener parámetros o coeficientes necesarios para el cálculo, por esta razón es recomendable determinar la ecuación para cada gráfica a fin de estimar con mayor precisión los valores de dichos coeficientes.
- En esta investigación sólo se han obtenido los parámetros de consolidación de los sectores del Ingenio, Colina de los Ceibos, la Vega y Trapichillo pertenecientes al Catón Catamayo, por lo que es recomendable ampliar este tipo de investigaciones no sólo a nivel local, sino más bien a nivel de la provincia de Loja y a través de esta iniciativa generar una base de datos de los parámetros y características de los suelos arcillosos que permitan calcular los asentamientos por consolidación instantánea, primaria y secundaria.
- Es recomendable implementar el cálculo de asentamientos de una cimentación como medida de control y seguridad antes de realizar la construcción de una edificación, esto evitará que se produzcan daños como el agrietamiento de elementos estructurales o incluso el colapso de la estructura como consecuencia de los asentamientos excesivos por consolidación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Becker, D., Crooks, J., Been, K., & Jefferies, M. (1987). Work as a criterion for determining in situ and yield stresses in clays . 549-564.
- Bowles, J. (1987). Elastic foundation settlement on sand deposits. *Journal of Geotechnical Engineering*, 846-860.
- Cabrera, T. (2011). *Estados límite de servicio*. Madrid: Universidad de Madrid.
- Casagrande, A. (1936). Determination of the preconsolidation load and its practical significance. 60-64.
- Das, B. (2012). *Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones*. México D. F: Cengage Learning Editores, S.A.
- Duncan, J., & Buchignani, A. (1976). *An engineering manual for settlement studies*. Berkeley: Department of Civil Engineering, University of California.
- El-Sayed, A., & El-Kasaby. (1990). Estimation of guide values for the modulus of elasticity of soils. *Bulletin of the Faculty of Engineering*, 1-6.
- Fang, H.-Y. (1991). *Foundation engineering handbook*. New York.
- Fox, E. (1948). The mean elastic settlement of a uniformly loaded area at a depth below the ground surface. *Proceedings, 2nd International conference on soil mechanics and foundation engineering*, 129-132.
- GAD Catamayo. (2012). Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón Catamayo. Loja, Ecuador: GAD Municipal Loja.
- González, M. (2012, Enero 17). *Física*. Retrieved from <https://goo.gl/6AZuTc>
- Guamán Armijos, J. F. (2006). *Determinación de la curva de consolidación en arcillas del sector sur de la ciudad de Loja mediante el ensayo de consolidación ASTM-D-2435*. Loja.
- Hara, A., Ohata, T., & Niwa, M. (1971). Shear modulus and shear strength of cohesive soils. *Soils and Foundations*, 1-12.
- Janbú, N., Bjerrum, L., & Kjaernsli, B. (1956). Veiledning vedlossning av fundamentering soppgaver. *Norwegian Geotechnical Institute*, 30-32.
- Jiménez Salas, J., & Justo Alpañes, J. (1975). *Geotecnia y cimientos I*. Madrid: Editorial Rueda.
- Juárez, E., & Rico, A. (2005). *Mecánica de suelos*. México: Limusa.
- Ladd, C. (1977). Stress deformation and strength characteristics. Tokio.
- Loayza Arias, C. A. (2017). *Caracterización de arcillas naturales del cantón Catamayo y sus usos potenciales en la tecnología*. Loja.
- López García, L., & López Perales, J. A. (1999). *Cimentaciones*. La Mancha: Universidad de Castilla.

- López, A. J. (2005). *Manual de edafología*. Sevilla.
- Mesri, G., & Feng, T. W. (2014). Consolidation of soils. *Soil behavior fundamentals to innovations in geotechnical engineering*, 322-337.
- Ministerio de desarrollo urbano y vivienda. (2014). Geotecnia y Cimentaciones. In *Normativa ecuatoriana de la construcción*.
- Preeti, N., & Singh, B. (2007). Instrumental characterization of clay by XRF, XRD and FTIR. *Indian Academy of Sciences.*, 235-238.
- Salamanca, D., & Ahumada, V. (2013). *Evaluación de los parámetros de consolidación con grandes deformaciones en función de las propiedades índices de los suelos de baja plasticidad*. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- Stas, C., & Kulhawy, F. (1984). *Critical Evaluation of Design Methods for Foundations Under Axial*. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute.
- Terzaghi, K., & Peck, R. (1973). *Soil mechanics in engineering practice* (Second ed.). New York.
- Urbaitis, D., Lekstutyte, I., & Gribulis, D. (2016). Overconsolidation ratio determination of cohesive soil. 108-112.
- Verruijt, A. (2008). Consolidation of soils. In *Theory of consolidation* (pp. 1-16). Chichester, UK.
- Wood, D. M. (1983). Index properties and critical state soil mechanics. Bangkok.

## **ANEXOS**

**A. Ensayos de clasificación de clasificación de suelos.**

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA Y MINAS E INGENIERÍA CIVIL						
LABORATORIOS UCG - UTPL						
ENSAYO DE CLASIFICACIÓN						
INF-LAB-UCG-001-2017						
<b>PROYECTO :</b>	ESTUDIO DE ASENTAMIENTOS INSTANTÁNEOS POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIA Y SECUNDARIA EN SUELOS ARCILLOSOS DE ALTA PLASTICIDAD DEL CANTÓN CATAMAYO DE LA PROVINCIA DE LOJA					
<b>OBRA:</b>	PROYECTO DE FIN DE TITULACIÓN			<b>NORMA:</b>	ASTM D 4318, AASHTO T-27	
<b>LOCALIZACIÓN:</b>	LOS TEJARES - CATAMAYO			<b>CALICATA:</b>	1	
<b>SOLICITADO:</b>	DIRECTOR DE PROYECTO DE FIN DE TITULACIÓN			<b>MUESTRA:</b>	1	
<b>REALIZADO:</b>	COSME DAVID GUERRERO RIOFRÍO			<b>PROFUNDIDAD:</b>	1.5 m	
<b>FECHA:</b>	07/11/2016					
	GOLPES	PESO HUM.	PESO SECO	CÁPSULA	w %	RESULTADO
1. CONTENIDO DE AGUA		453,60 447,62	390,54 382,80	59,21 55,71	19,03 19,82	19,42
2.- LÍM. LÍQUIDO	15 20 26 31	78,67 70,04 83,28 70,23	73,37 65,58 78,41 65,47	66,87 59,97 72,12 59,21	81,54 79,50 77,42 76,04	78
3.- LÍMITE PLÁSTICO		57,82 67,18	57,73 66,98	57,43 66,31	30,00 29,85	30
4.- GRANULOMETRÍA				5.- CLASIFICACIÓN		
PESO IN= 612,12 (H/S)		S 612,12		GRAVA 0,00		
PESO INICIAL DE CÁLCULO:				ARENA 1,51		
				FINOS 98,49		
TAMIZ	PESO RT.	% RET	% PASA			
1"	0,00	0,00	100,00	LL = 78,00		
3/4"	0,00	0,00	100,00	LP = 30,00		
1/2"	0,00	0,00	100,00	IP = 48,00		
3/8"	0,00	0,00	100,00			
No. 4	0,00	0,00	100,00	CLASIFICACIÓN		
No. 10	0,15	0,02	99,98	SUCS : CH		
No. 40	5,65	0,92	99,08	AASHTO: A-7-6		A-7-6
No. 200	9,23	1,51	98,49	IG(86): 56		
				IG(45): 20		
<p style="text-align: center;"><b>LÍMITE LÍQUIDO</b></p>						
CLASIFICACIÓN SUCS: Suelo arcilloso de alta plasticidad (CH)						
Observaciones: La toma de muestras es realizada por el profesional en formación y llevada al laboratorio de la UTPL.						
<hr/> Ing. Ángel Tapia Ch. <b>DIRECTOR DE PROYECTO</b>			<hr/> Sr. Cosme David Guerrero Riofrío <b>PROFESIONAL EN FORMACIÓN</b>			

## B. Ensayos de consolidación de suelos.

### UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

#### ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN

Proyecto: TESIS ASENTAMIENTOS	Calicata N°: 1
Localización del proyecto: CATAMAYO - INGENIO	Muestra N°: 1
Descripción del Suelo: CH (Arcilla color café)	Profundidad de la Muestra: 1,00m
Realizado por: GUERRERO RIOFRÍO Cosme	Fecha de inicio del Ensayo: 13/12/2016
Consolidómetro tipo: Fijo	Anillo N°: 1

Relación de amplificación del sistema de carga:

Dimensiones del anillo:

Diámetro: 6,30 cm      Área: 31,17 cm<sup>2</sup>      Altura: 2,40 cm      Volumen: 74,81 cm<sup>3</sup>

Altura inicial del suelo,  $H_i$  = 2,40 cm  
 Gravedad específica del suelo,  $G_s$  =  
 Peso del anillo + muestra al comienzo del ensayo = 651,27 g  
 Peso del anillo = 500,60 g  
 Peso del suelo húmedo,  $W_t$  = 150,67 g  
 Peso del suelo seco al horno,  $W_s$  = 135,74 g  
 Altura de los sólidos,  $H_s$  = 1,06 cm  
 Altura inicial de vacíos,  $H_v = H_i - H_s$  = 1,34 cm  
 Relación de vacíos inicial,  $e_i = H_v/H_s$  = 1,26  
 Grado de saturación inicial,  $S_i = (W_t - W_s) / (H_v \times A)$  = 35,82%

#### Determinación del contenido de humedad inicial

Peso de lata + suelo húmedo =	392,39 g
Peso de lata + suelo seco =	335,30 g
Peso de la lata =	54,08 g
Peso del suelo seco =	281,22 g
Peso del agua =	57,09 g
Contenido de humedad (inicial) =	20,30%

#### Datos finales del ensayo (obtenidos al final del ensayo)

Lectura inicial del deformímetro = 4+000,0  
 Lectura final del deformímetro = 10+132,5  
 Cambio en altura de la muestra = 0,34 cm  
 Altura final de vacíos,  $H_{vf}$  = 1,00 cm  
 Relación de vacíos final,  $e_f = H_{vf}/H_s$  = 0,94

#### Determinación del contenido de humedad final

Peso final del anillo + Muestra humedad =	667,48 g
Peso final del anillo + Muestra seca =	636,34 g
Peso o Volumen de agua =	31,15 g
Peso del suelo seco al horno, $W_s$ =	135,74 g
Contenido de humedad final, $W_f$ =	22,95%
Grado de saturación final, $S_f$ =	479,53%

Ing. Ángel Guillermo Tapia Chávez

Cosme David Guerrero Riofrío

**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**

ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN

Proyecto: TESIS ASENTAMIENTOS  
 Localización del proyecto: CATAMAYO - INGENIO  
 Descripción del Suelo: CH (Arcilla color café)  
 Realizado por: GUERRERO RIOFRÍO Cosme  
 Consolidómetro tipo: Fijo

Calicata N°: 1  
 Muestra N°: 1  
 Profundidad de la Muestra: 1,00m  
 Fecha de inicio del Ensayo: 13/12/2016  
 Anillo N°: 1

**DATOS DEL ENSAYO (CARGA):**

Carga: 0 - 1 kg  
 Fecha de aplicación: 13/12/2016  
 Aplicado por: GUERRERO Cosme

Carga: 1 - 2 kg  
 Fecha de aplicación: 14/12/2016  
 Aplicado por: GUERRERO Cosme

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Deformación 0,00254 mm	
		Original	Ajustada
08:25:00	0	4+000,0	0,0000
08:25:06	0,1	4+152,0	0,3861
08:25:15	0,25	4+159,0	0,4039
08:25:30	0,5	4+164,5	0,4178
08:26:00	1	4+170,0	0,4318
08:27:00	2	4+175,5	0,4458
08:29:00	4	4+180,8	0,4592
08:33:00	8	4+185,5	0,4712
08:40:00	15	4+190,0	0,4826
08:55:00	30	4+195,2	0,4958
09:25:00	60	5+000,2	0,5085
10:25:00	120	5+005,4	0,5217
12:25:00	240	5+009,9	0,5331
16:25:00	480	5+013,6	0,5425
18:25:00	600	5+014,5	0,5448
08:25:00	1440	5+017,3	0,5519

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Deformación 0,00254 mm	
		Original	Ajustada
08:25:00	0	5+017,3	0,5519
08:25:06	0,1	5+082,5	0,7176
08:25:15	0,25	5+089,5	0,7353
08:25:30	0,5	5+094,5	0,7480
08:26:00	1	5+100,0	0,7620
08:27:00	2	5+106,5	0,7785
08:29:00	4	5+113,0	0,7950
08:33:00	8	5+119,5	0,8115
08:40:00	15	5+125,0	0,8255
08:55:00	30	5+129,7	0,8374
09:25:00	60	5+134,0	0,8484
10:25:00	120	5+138,2	0,8590
12:25:00	240	5+142,2	0,8692
16:25:00	480	5+146,2	0,8793
18:25:00	600	5+147,5	0,8827
08:25:00	1440	5+152,2	0,8946

Ing. Ángel Guillermo Tapia Chávez

Cosme David Guerrero Riofrío

**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**

ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN

Proyecto: TESIS ASENTAMIENTOS  
 Localización del proyecto: CATAMAYO - INGENIO  
 Descripción del Suelo: CH (Arcilla color café)  
 Realizado por: GUERRERO RIOFRIO Cosme  
 Consolidómetro tipo: Fijo

Calicata N°: 1  
 Muestra N°: 1  
 Profundidad de la Muestra: 1,00m  
 Fecha de inicio del Ensayo: 13/12/2016  
 Anillo N°: 1

**DATOS DEL ENSAYO (CARGA):**

Carga: 2 - 4 kg  
 Fecha de aplicación: 15/12/2016  
 Aplicado por: GUERRERO Cosme

Carga: 4 - 8 kg  
 Fecha de aplicación: 16/12/2016  
 Aplicado por: GUERRERO Cosme

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Deformación 0,00254 mm	
		Original	Ajustada
08:25:00	0	5+152,2	0,8946
08:25:06	0,1	6+080,0	1,2192
08:25:15	0,25	6+091,0	1,2471
08:25:30	0,5	6+099,5	1,2687
08:26:00	1	6+108,5	1,2916
08:27:00	2	6+116,5	1,3119
08:29:00	4	6+124,5	1,3322
08:33:00	8	6+132,4	1,3523
08:40:00	15	6+140,8	1,3736
08:55:00	30	6+148,5	1,3932
09:25:00	60	6+156,0	1,4122
10:25:00	120	6+163,0	1,4300
12:25:00	240	6+168,0	1,4427
16:25:00	480	6+172,5	1,4542
18:25:00	600	6+174,0	1,4580
08:25:00	1440	6+177,1	1,4658

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Deformación 0,00254 mm	
		Original	Ajustada
08:25:00	0	6+177,1	1,4658
08:25:06	0,1	7+132,0	1,8593
08:25:15	0,25	7+146,0	1,8948
08:25:30	0,5	7+157,0	1,9228
08:26:00	1	7+167,0	1,9482
08:27:00	2	7+177,5	1,9749
08:29:00	4	7+188,0	2,0015
08:33:00	8	7+196,5	2,0231
08:40:00	15	8+003,6	2,0411
08:55:00	30	8+012,0	2,0625
09:25:00	60	8+020,2	2,0833
10:25:00	120	8+028,0	2,1031
12:25:00	240	8+035,0	2,1209
16:25:00	480	8+042,0	2,1387
18:25:00	600	8+044,0	2,1438
08:25:00	1440	8+051,2	2,1620

.....  
 Ing. Ángel Guillermo Tapia Chávez

.....  
 Cosme David Guerrero Riofrío

# UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

## LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

### ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN

Proyecto: TESIS ASENTAMIENTOS  
 Localización del proyecto: CATAMAYO - INGENIO  
 Descripción del Suelo: CH (Arcilla color café)  
 Realizado por: GUERRERO RIOFRÍO Cosme  
 Consolidómetro tipo: Fijo

Calicata N°: 1  
 Muestra N°: 1  
 Profundidad de la Muestra: 1,00m  
 Fecha de inicio del Ensayo: 13/12/2016  
 Anillo N°: 1

#### DATOS DEL ENSAYO (CARGA):

Carga: 8 - 16 kg  
 Fecha de aplicación: 17/12/2016  
 Aplicado por: GUERRERO Cosme

Carga: 16 - 32 kg  
 Fecha de aplicación: 18/12/2016  
 Aplicado por: GUERRERO Cosme

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Deformación 0,00254 mm	
		Original	Ajustada
08:25:00	0	8+051,2	2,1620
08:25:06	0,1	8+175,0	2,4765
08:25:15	0,25	8+186,0	2,5044
08:25:30	0,5	8+197,5	2,5337
08:26:00	1	9+008,0	2,5603
08:27:00	2	9+018,0	2,5857
08:29:00	4	9+029,0	2,6137
08:33:00	8	9+039,0	2,6391
08:40:00	15	9+048,0	2,6619
08:55:00	30	9+057,8	2,6868
09:25:00	60	9+066,5	2,7089
10:25:00	120	9+073,5	2,7267
12:25:00	240	9+080,0	2,7432
16:25:00	480	9+086,5	2,7597
18:25:00	600	9+088,5	2,7648
08:25:00	1440	9+095,0	2,7813

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Deformación 0,00254 mm	
		Original	Ajustada
08:25:00	0	9+095,0	2,7813
08:25:06	0,1	10+005,0	3,0607
08:25:15	0,25	10+025,0	3,1115
08:25:30	0,5	10+038,0	3,1445
08:26:00	1	10+050,0	3,1750
08:27:00	2	10+063,0	3,2080
08:29:00	4	10+075,0	3,2385
08:33:00	8	10+086,0	3,2664
08:40:00	15	10+095,5	3,2906
08:55:00	30	10+104,0	3,3122
09:25:00	60	10+112,0	3,3325
10:25:00	120	10+119,5	3,3515
12:25:00	240	10+125,8	3,3675
16:25:00	480	10+129,8	3,3777
18:25:00	600	10+130,5	3,3795
08:25:00	1440	10+132,5	3,3846

.....  
Ing. Ángel Guillermo Tapia Chávez

.....  
Cosme David Guerrero Riofrío



# UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

## LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

### ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN

Proyecto:	TESIS ASENTAMIENTOS	Calicata N°:	1
Localización del proyecto:	CATAMAYO - INGENIO	Muestra N°:	1
Descripción del Suelo:	CH (Arcilla color café)	Profundidad de la Muestra:	1,00m
Realizado por:	GUERRERO RIOFRÍO Cosme	Fecha de inicio del Ensayo:	13/12/2016
Consolidómetro tipo:	Fijo	Anillo N°:	1

### ETAPA DE DESCARGA Y RECARGA

#### DATOS DEL ENSAYO:

Volumen inicial de la muestra	74,81 cm <sup>3</sup>	Peso del suelo seco al horno, Ws =	135,74 g
Gravedad específica del suelo, Gs =		Altura de los sólidos, Hs =	1,06 cm
Altura inicial de vacíos, Hv = Hi - Hs =	1,34 cm	Relación de vacíos inicial, ei = Hv/Hs =	1,26
Altura inicial del suelo, Hi =	2,40 cm	Área de la muestra	31,17 cm <sup>2</sup>

Carga (Kg)	Lectura al final del incremento	Cambio en la altura de la muestra (cm)	$\epsilon = \Delta H/H_s$	Relación de vacíos instantáneos	H <sub>m</sub> para el incremento de carga (cm)	t (min) para el 50% de la consolidación	Cv (cm <sup>2</sup> /min)	Presión (kg/cm <sup>2</sup> )
			1,2590					
32	10+136,0	0,3393	0,3194	0,9396				10,2655
16	10+112,5	0,3334	0,3138	0,9452				5,1327
8	10+066,2	0,3216	0,3027	0,9563				2,5664
4	10+012,0	0,3078	0,2898	0,9692				1,2832
2	9+150,0	0,2921	0,2749	0,9840				0,6416
1	9+086,5	0,2760	0,2598	0,9992				0,3208
0	8+059,0	0,2182	0,2054	1,0536				0,0321
1	8+133,5	0,2371	0,2232	1,0358				0,3208
2	8+176,0	0,2479	0,2333	1,0256				0,6416
4	9+038,0	0,2637	0,2482	1,0108				1,2832
8	9+126,0	0,2860	0,2692	0,9898				2,5664
16	10+031,5	0,3128	0,2944	0,9646				5,1327
32	10+147,1	0,3422	0,3221	0,9369				10,2655

Ing. Ángel Guillermo Tapia Chávez

Cosme David Guerrero Riofrío

---

RESULTADOS DEL SECTOR INGENIO

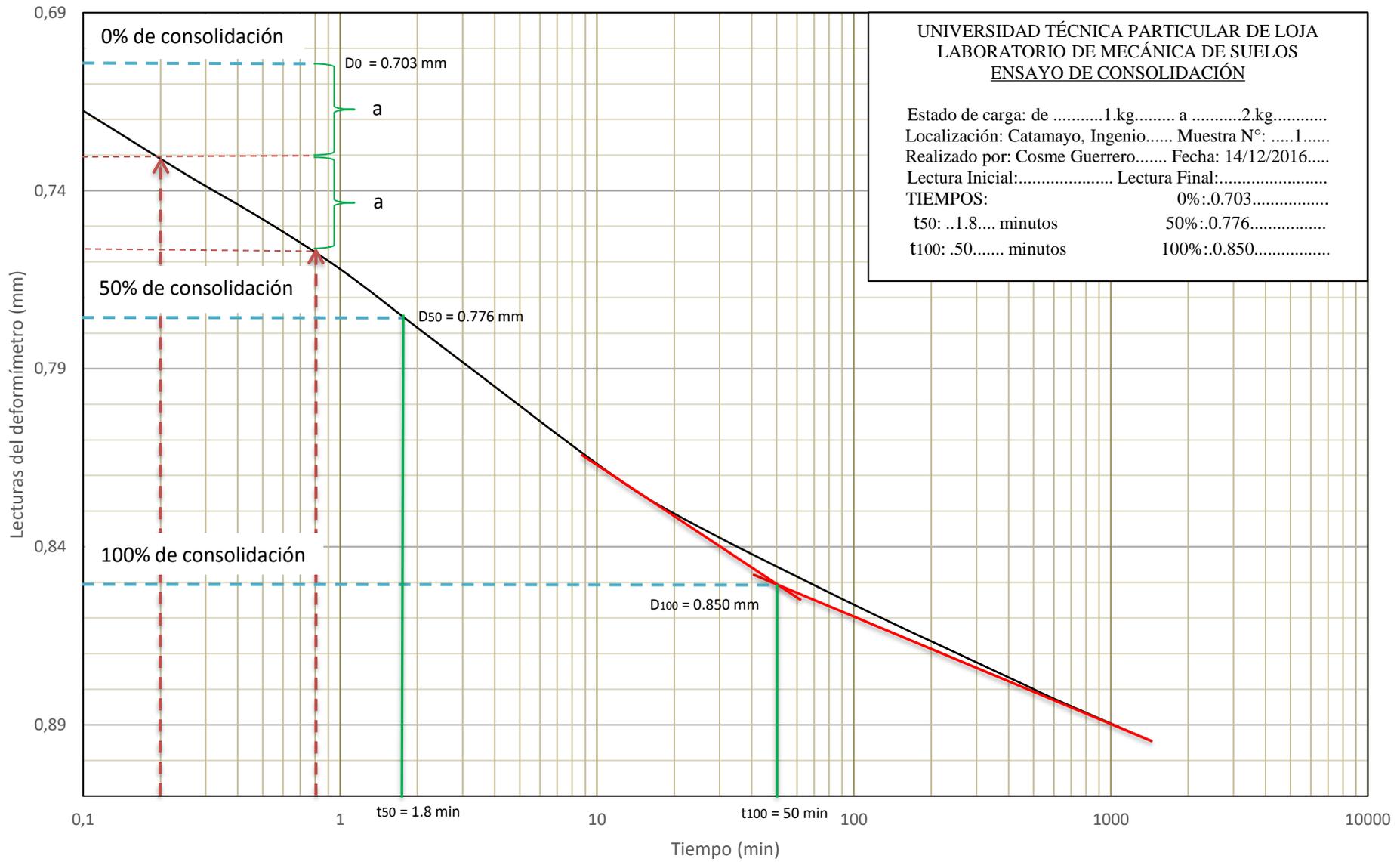
---

Índice de Compresión_Cc	0,1886
Índice de Expansión_Cs	0,0159
Índice de Consolidación_Cv (cm <sup>2</sup> /s)	0,0073
Índice de Consistencia, IC	1,3342
Consistencia, en base al índice de consistencia (IC)	Firme
Coefficiente de permeabilidad hidráulica k (cm/s)	2,03E-07
Presión de preconsolidación (kg/cm <sup>2</sup> )	1,25
Presión de sobrecarga efectiva in situ (kg/cm <sup>2</sup> )	0,3021
Relación de sobreconsolidación, OCR	4,1378
Resistencia cortante no drenada, Cu (kg/cm <sup>2</sup> )	0,9409
Módulo de Young, Es (MPa)	28,1255
Consistencia, en base al módulo de Young (Es)	Muy Firme

---



# ENSAYO CONSOLIDACIÓN INGENIO - CARGA: 1 - 2 Kg



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA  
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS  
ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN

Estado de carga: de .....1.kg..... a .....2.kg.....  
 Localización: Catamayo, Ingenio..... Muestra N°: .....1.....  
 Realizado por: Cosme Guerrero..... Fecha: 14/12/2016.....  
 Lectura Inicial:..... Lectura Final:.....  
 TIEMPOS: 0%:0.703.....  
 t50: ..1.8.... minutos 50%:0.776.....  
 t100: .50..... minutos 100%:0.850.....









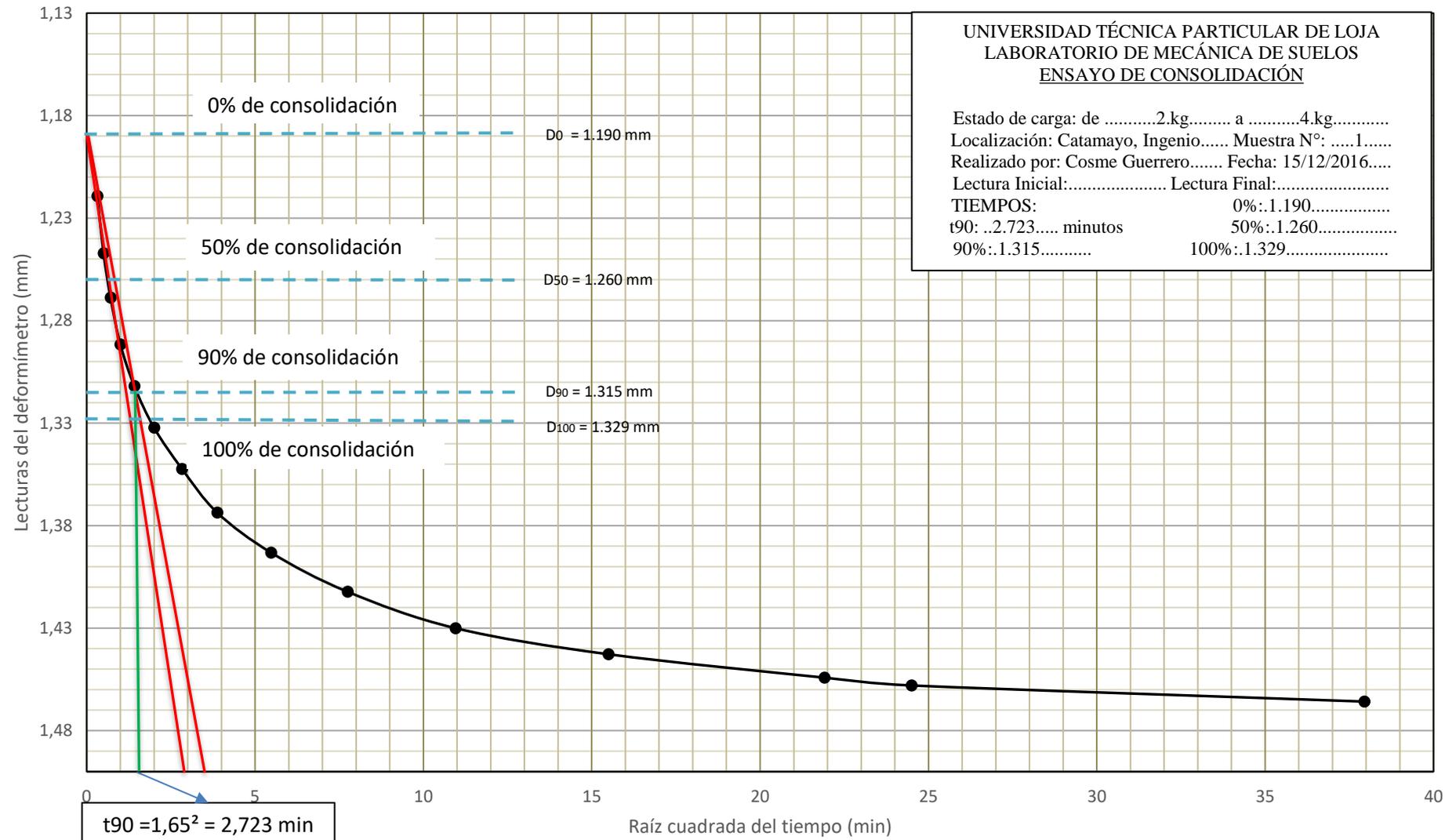




# ENSAYO CONSOLIDACIÓN INGENIO - CARGA: 2 - 4 Kg

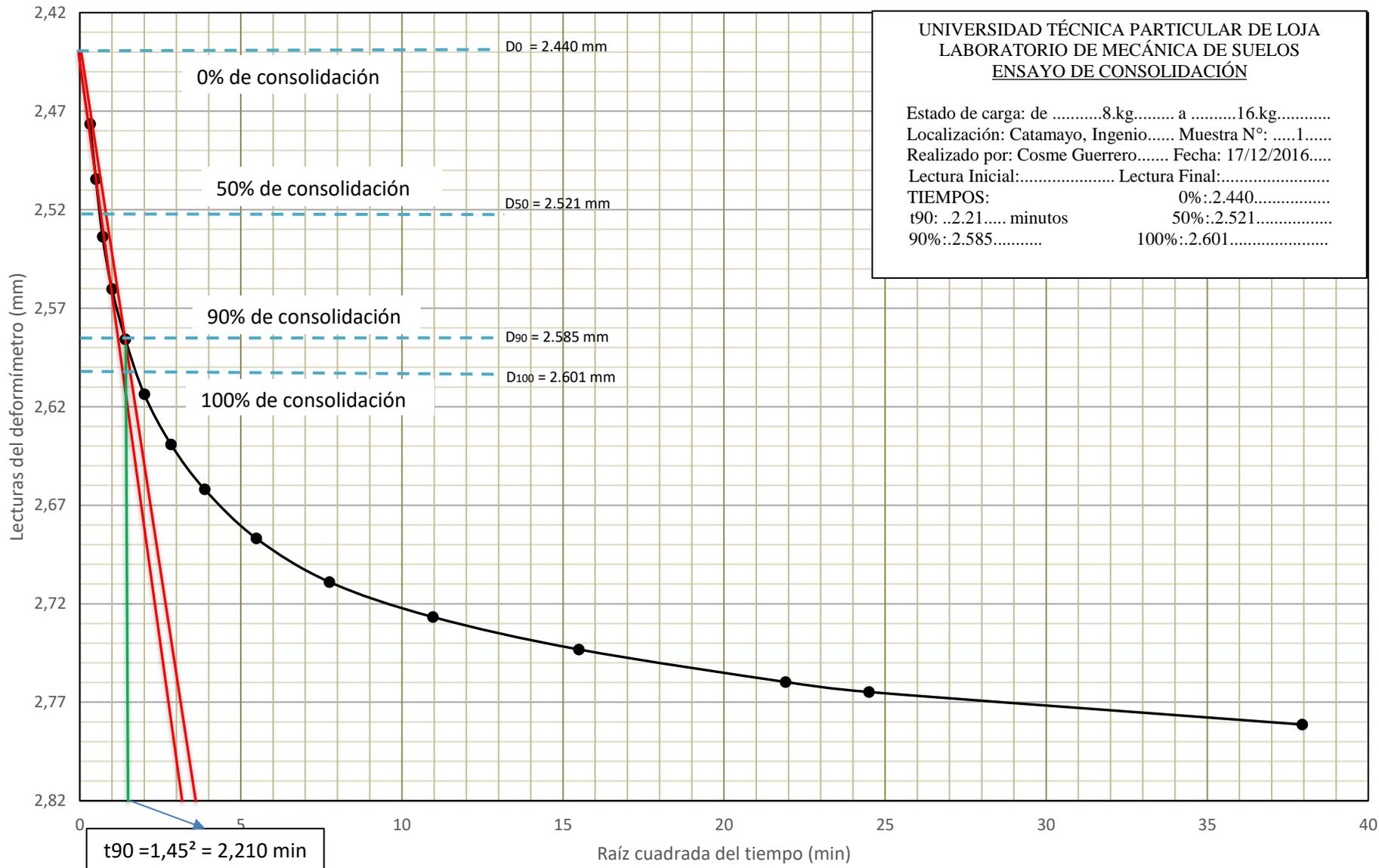
UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA  
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS  
ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN

Estado de carga: de .....2.kg..... a .....4.kg.....  
 Localización: Catamayo, Ingenio..... Muestra N°: .....1.....  
 Realizado por: Cosme Guerrero..... Fecha: 15/12/2016.....  
 Lectura Inicial:..... Lectura Final:.....  
 TIEMPOS: 0%:1.190.....  
 t90: ..2.723..... minutos 50%:1.260.....  
 90%:1.315..... 100%:1.329.....





# ENSAYO CONSOLIDACIÓN INGENIO - CARGA: 8 - 16 Kg





# ENSAYO CONSOLIDACIÓN INGENIO - CARGA, DESCARGA Y RECARGA

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA  
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS  
ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN

Estado de carga: Carga, descarga y recarga.....  
 Localización: Catamayo, Ingenio..... Muestra N°: .....1.....  
 Realizado por: Cosme Guerrero..... Fecha: 19/12/2016.....  
 Lectura Inicial:..... Lectura Final:.....  
 TIEMPOS: 0%:.....  
 t50: ..... minutos 50%:.....  
 t100: ..... minutos 100%:.....

