



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Estudios de asentamientos instantáneos, por consolidación primaria y secundaria en suelos arcillosos de la ciudad de Loja.

TRABAJO DE TITULACIÓN

AUTOR: Encalada Correa, Cristhian Andrés

DIRECTOR: Tapia Chávez, Ángel Guillermo, M.Sc

CO-DIRECTOR: 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 la ciudad de Loja** realizado por Encalada Correa Cristhian Andrés, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, Septiembre 2017

f) _____

DECLARACIÓN DE AUTORIA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo Encalada Correa Cristhian Andrés declaro ser autor del presente trabajo de titulación: **Estudios de asentamientos por consolidación instantánea, primaria y secundaria en suelos arcillosos de la ciudad de Loja**, de la Titulación de Ingeniería Civil, siendo el M.Sc. Ángel Guillermo Tapia Chávez director y el M.Sc. John Egverto Soto Luzuriaga co-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 que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad.

f): _____

Autor: Encalada Correa Cristhian Andrés

Cédula: 110516174-7

DEDICATORIA

A ese soñador que todos llevamos por dentro...

AGRADECIMIENTO

No puedo evitar sentir nostalgia al escribir estas palabras pues han pasado cinco años desde que ingresé a una nueva etapa de mi vida... y ahora está terminando y comenzando otra... conocí personas buenas y otras no tan buenas, conocí personas sabias y otras no tan sabias, conocí profesores que me exigían que sea como ellos y conocí mentores que me inspiraron a ser como ellos eran... conocí un maravilloso mundo de cosas nuevas, un mundo de conocimiento y oportunidades... durante este tiempo mi ser ha aprendido y madurado continuamente pero para hacerlo tuvo que pasar por muchos momentos de dolor, esfuerzo y sacrificio, pero ahora estoy consciente que los momentos duros, los de sacrificio, los de esfuerzo, que las noches sin dormir, que todas esas cosas que en algún instante creí que no eran tan buenas me hicieron disfrutar aún más las cosas buenas... que los malos momentos fueron necesarios para apreciar aún más los buenos...

Hubo una época en la que creí que todo lo que lograba era gracias a mi esfuerzo... ahora me doy cuenta que todo lo que he logrado ha sido gracias a las personas que me rodean, a mi madre que me ha motivado a llegar a la meta, a mi hermano que me ha inspirado dedicación y disciplina, a personas que sin querer se convirtieron en mi segunda familia, que me abrieron las puertas de su hogar y dejaron su huella en mi brindándome un lugar en su mesa, a esos profesores que se convirtieron en mentores y después en amigos, a mis amigos que fueron la familia que la vida me permitió escoger, a muchas personas que han hecho grandes sacrificios para que hoy yo pueda lograr esta meta... sin importar el camino que sigamos, las decisiones que tomemos, las personas a las que conozcamos... yo seré parte de su historia y ustedes siempre serán parte de la mía... Gracias a todos vosotros por haberme acompañado en este maravilloso viaje.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN 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	viii
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
CAPÍTULO I	5
DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.1 Antecedentes del estudio de asentamientos	6
1.2 Problema	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 Delimitación de la zona de estudio.	8
1.5.2 Caracterización de las arcillas de la zona de estudio.	8
1.5.3 Análisis de resultados obtenidos	8
1.6 Ubicación y descripción de la zona de estudio	9
CAPÍTULO II	12
MARCO TEÓRICO	12
2.1 Cimentaciones	13
2.2 Arcillas	13
2.3 Índice de liquidez	14
2.4 Presión de pre-consolidación	14
2.5 Presión de sobrecarga efectiva in situ	16
2.6 Relación de sobre consolidación	18
2.7 Resistencia cortante no drenada	19
2.8 Módulo de Young o módulo elástico	20
2.9 Relación de Poisson	21
2.10 Esfuerzo vertical	21
2.11 Asentamientos instantáneos	23
2.11.1 Método de Janbú y colaboradores (1956)	23
2.11.2 Método basado en la teoría de la elasticidad.	24
2.12 Asentamientos por consolidación	26
2.12.1 Asentamiento por consolidación primaria	27
2.12.2 Asentamiento por consolidación secundaria.	28
2.13 Análisis por fluorescencia de rayos X	29
CAPÍTULO III	31
TRABAJO DE CAMPO Y ENSAYOS DE LABORATORIO	31
3.1 Trabajo de campo	32
3.1.1 Identificación de la zona de estudio	32
3.1.2 Recolección de muestras	32
3.2 Ensayos de laboratorio	34
3.2.1 Granulometría	34
3.2.2 Límites de Atterberg	35
3.2.3 Consolidación	36
3.2.4 Fluorescencia de rayos X	36
CAPÍTULO IV	38

RESULTADOS Y CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS	38
4.1 Caracterización de la zona de estudio	39
4.2 Ensayo de fluorescencia de rayos x	40
4.3 Ensayo edométrico	41
4.4 Cálculo de asentamientos.....	41
4.4.1 Ejemplo de cálculo, caso I:	42
4.4.2 Ejemplo de cálculo, caso II:	53
CONCLUSIONES.....	61
RECOMENDACIONES	63
BIBLIOGRAFÍA.....	64
ANEXOS 65	
Anexo 1: Ensayos de clasificación de suelos	66
Anexo 2: Ensayos de consolidación (ASTM D – 2435).....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Mapa de ubicación de la zona de estudio	10
Figura 2:	Determinación de la presión de pre consolidación.....	16
Figura 3:	Caso I. El nivel freático se encuentra sobre el punto de cálculo.	17
Figura 4:	Caso II. El nivel freático no influye en la presión de sobrecarga efectiva	18
Figura 5:	Curvas para la determinación de β	20
Figura 6:	Representación del esfuerzo en un estrato de arcilla bajo una zapata	22
Figura 7:	Curvas para la determinación de A_1	24
Figura 8:	Curvas para la determinación de A_2	24
Figura 9:	Representación de la consolidación primaria y secundaria	26
Figura 10:	Flujograma del proceso de cálculo de asentamientos	30
Figura 11:	Inicio muestreo manual.....	32
Figura 12:	Fin del muestreo manual.....	33
Figura 13:	Recolección de muestra inalterada, sector 2.	33
Figura 14:	Preparación de muestras para granulometría por lavado.....	34
Figura 15:	Límite líquido.	35
Figura 16:	Límite plástico.	35
Figura 17:	Aplicación del ensayo edométrico.	36
Figura 18:	Fluorescencia de rayos X	37
Figura 19:	Puntos de muestreo ubicados en la carta de Casagrande.	40
Figura 20:	Interfaz de la hoja de cálculo de asentamientos.	42
Figura 21:	Ejemplo de cálculo, elevación del caso en estudio.	43
Figura 22:	Ejemplo de cálculo, distribución de las columnas.	43
Figura 23:	Ejemplo de cálculo, áreas de aporte de cargas a las columnas.....	45
Figura 24:	Ejemplo de cálculo, representación de las zapatas del caso de estudio I	46
Figura 25:	Ejemplo de cálculo, representación de las zapatas con mejoramiento.	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Coordenadas de los puntos de muestreo.....	9
Tabla 2:	Puntos de muestreo por cada sector	11
Tabla 3:	Relación entre el N_{60} , IC y q_u	19
Tabla 4:	Relación de Poisson μ_s para diferentes condiciones de la arcilla	21
Tabla 5:	Relaciones para el cálculo en el centro y en una esquina de la zapata	25
Tabla 6:	Clasificación de los puntos de muestreo	39
Tabla 7:	Análisis mineralógico de cada sector (%).....	40
Tabla 8:	Parámetros específicos de cada sector	41
Tabla 9:	Cargas aplicadas a cada columna.....	45
Tabla 10:	Asentamientos totales del caso de ejemplo I para cimentaciones flexibles.	52
Tabla 11:	Asentamientos totales del caso de ejemplo I para cimentaciones rígidas.	52
Tabla 12:	Asentamiento diferencial en mm, columnas B1-B2 del caso de ejemplo I....	52
Tabla 13:	Asentamientos totales del caso de ejemplo II para cimentaciones flexibles.	59
Tabla 14:	Asentamientos totales del caso de ejemplo II para cimentaciones rígidas.	59
Tabla 15:	Asentamiento diferencial en mm, columnas B1-B2 del caso de ejemplo II....	60

RESUMEN

Este trabajo se encuentra enfocado al estudio de asentamientos instantáneos, por consolidación primaria y secundaria en suelos arcillosos de la zona de expansión urbana de la ciudad de Loja. Para lograrlo se realizó el ensayo edométrico con el fin de obtener los parámetros que permitan la determinación de los asentamientos.

Mediante el catastro municipal se delimitó la zona de estudio a los sectores de PROURVI, Colinas Lojanas, Ciudad Victoria y Carigan, en los cuales se realizó doce muestreos para determinar las arcillas más sensibles a cargas constantes de diferente magnitud. Se obtuvo la curva de carga, descarga y recarga del ensayo de consolidación para cada sector, la cual fue esencial para el cálculo de asentamientos.

Con los resultados obtenidos se determina que el sector más desfavorable para la construcción es Carigan, seguido de Ciudad Victoria, PROURVI y finalmente Colinas Lojanas.

PALABRAS CLAVES: Asentamientos instantáneos, consolidación primaria, consolidación secundaria.

ABSTRACT

This work is focused on the study of instant settlements, by primary and secondary consolidation in clay soils of the urban expansion zone of Loja city. To do this, the edometric test was carried out in order to obtain the parameters that allow the determination of the settlements.

By means of the municipal cadastre the study area was delimited to the sectors of PROURVI, Colinas Lojanas, Ciudad Victoria and Carigan, in which twelve samples were made to determine the more sensitive clays to constant loads of different magnitude. The load, discharge and recharge curve of the consolidation test for each sector was obtained, which was essential for the settlements calculation.

With the results obtained it is determined that the most unfavorable sector for construction is Carigan, followed by Ciudad Victoria, PROURVI and finally Colinas Lojanas.

KEYWORDS: Immediate settlements, primary consolidation, secondary consolidation.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de fin de titulación está enfocado al *Estudio de asentamientos instantáneos, por consolidación primaria y secundaria en suelos arcillosos de la ciudad de Loja*, es una investigación cuantitativa experimental que tiene por objetivo caracterizar los suelos arcillosos de la zona de expansión de la ciudad de Loja para determinar los parámetros de asentamientos necesarios para el diseño de obras civiles, además analizar y estudiar los problemas que se presentan cuando el terreno de fundación está sujeto a varias cargas constantes de diferente magnitud.

En la construcción local se obvia el tema de asentamientos, se hacen ensayos con el fin de determinar la carga permisible basada en la capacidad portante del suelo más no se realizan ensayos para determinar la capacidad portante debida a los asentamientos, la cual es necesaria para poder estimar de forma correcta la carga permisible. Este trabajo aporta a la construcción local una forma factible de determinar la capacidad portante debida a los asentamientos, complementando así el cálculo de la carga permisible.

El problema que motivó al desarrollo de esta investigación fue la falta de información de las propiedades de las arcillas en la ciudad de Loja, al comprimirse los suelos las obras sufren de asentamientos diferenciales o totales, produciéndose daños estéticos y estructurales al no haberse considerado un estudio de dichos asentamientos. Esto se debe principalmente a la falta de importancia que se le da al tema en la construcción local y regional. En la presente investigación se determinó los parámetros, de las arcillas investigadas, necesarios para el cálculo de asentamientos y se desarrolló una hoja de cálculo de asentamientos con dichos parámetros, la cual permite cuantificar el grado de asentamientos totales de un sistema de cimentación basado en zapatas aisladas.

El objetivo de este trabajo es caracterizar los materiales arcillosos de la zona expansión de la ciudad de Loja para determinar los parámetros necesarios para el cálculo de asentamientos, para cumplir con esto se analizó las propiedades de los suelos arcillosos de la zona de estudio. Los datos para la caracterización de los suelos se los obtuvieron de muestras de campo ensayadas en laboratorio así como los parámetros para determinar los asentamientos que se los obtuvo con el ensayo edométrico.

Teniendo en cuenta que para determinar el grado de asentamiento se lo hará para cargas constantes de diferente magnitud, así mismo dependiendo el asentamiento de la superficie de

contacto entre el suelo y la estructura, se hará una variación de dicha superficie, y que las muestras necesarias para determinar el grado de asentamiento solo son recolectadas una vez, la metodología empleada en este trabajo es experimental del tipo transeccional.

Este trabajo presenta como resultado el posible asentamiento para sistemas de cimentación basados en zapatas aisladas, siempre y cuando se disponga de las cargas que la estructura transmite al terreno y de la ubicación de la obra, pues esta investigación se limita a los sectores urbanizados de la ciudad de Loja de PROURVI (Programa de urbanización y vivienda), Colinas Lojanas, Ciudad Victoria y Carigan, pudiendo ser aplicable a sectores aledaños siempre y cuando se demuestre con ensayos de clasificación que el suelo pertenece al mismo depósito. Finalmente dependiendo del grado de asentamiento se puede mantener el sistema de cimentación de zapatas aisladas o recomendar cambiarlo por un sistema más sofisticado.

Este trabajo se encuentra estructurado de cuatro capítulos, en el capítulo I se habla del problema que motivó a esta investigación así como de los objetivos de la misma y la metodología empleada, se hace una descripción general de la zona de estudio. El capítulo II comprende el marco teórico el cual consta de los métodos empleados para el cálculo de los asentamientos. En el capítulo III se habla de los resultados obtenidos del trabajo de campo y los ensayos de laboratorio que se realizaron con el fin de obtener los parámetros requeridos para el cálculo de los asentamientos. Finalmente en el capítulo IV se hace el cálculo de asentamientos y se analiza los resultados obtenidos.

CAPÍTULO I
DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Antecedentes del estudio de asentamientos

El análisis de asentamientos instantáneos y por consolidación primaria y secundaria es un tema importante, éste ha sido poco estudiado en la ciudad de Loja, pues las únicas referencias que se tiene se limitan a la obtención de los parámetros de consolidación y no hacen un estudio de los asentamientos con los parámetros obtenidos.

1.2 Problema

El problema, motivo de la investigación de este trabajo de fin de titulación, es la falta de información de las propiedades de los suelos arcillosos en la ciudad de Loja. Esto se origina por causas como: falta de interés en el tema por parte de los constructores locales, los cuales no le dan importancia al estudio de asentamientos; no existiendo un control de calidad, las cimentaciones de las estructuras se diseñan en base al límite de carga dado por la capacidad portante del suelo, obviando la capacidad de carga permisible debida a los asentamientos. Todo esto conduce a un efecto en cadena que comienza con errores de cálculo, pues al descartar los asentamientos en los cálculos del diseño estructural, las obras sufrirán un cambio en su estructura comportándose diferente a como se las diseñó y calculó, esto debido a una variación de fuerzas provocada por asentamientos diferenciales o totales.

1.3 Justificación

Los suelos arcillosos son materiales propensos a sufrir asentamientos, estos se deforman bajo la aplicación de cargas y si las deformaciones son de consideración, se pueden dar fallas en la estructura de la obra. Los materiales más rígidos como fachadas son los que sufren daños visibles pero la estructura es la que debe soportar daños importantes, por lo que se debe controlar las deformaciones producidas por los asentamientos y verificar que éstos estén dentro de los límites permisibles. El estudio de los asentamientos presenta dos aspectos que los ingenieros deben considerar.

- Cálculo de los asentamientos teniendo en cuenta las cargas que la estructura transmite al suelo.
- Evaluar la capacidad de la estructura para soportar estos asentamientos, sean diferenciales o totales.

Si además se considera que en toda obra civil se debe controlar los asentamientos, especialmente en suelos arcillosos, para evitar que dichas obras sufran fallas en su estructura; una investigación de asentamientos permitirá determinar los parámetros necesarios que servirán para estudiar amenazas así como para evitar pérdidas humanas y económicas.

Por tanto este trabajo contribuye al aporte en la determinación del índice de comportamiento de arcillas y capacidad de carga permisible debido a asentamientos que servirá de información para la construcción de obras en la región, ya que en nuestro medio este tema no se encuentra desarrollado.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general.

Caracterizar los materiales arcillosos de la zona urbana de la ciudad de Loja 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 que permitan determinar los asentamientos.
- Analizar y estudiar los problemas que se presentan cuando el terreno de fundación está sujeto a varias cargas constantes.

1.5 Metodología

La investigación realizada es de tipo cuantitativa, para lo cual se aplicó una metodología experimental de tipo transeccional. Es cuantitativa por consistir en la determinación numérica del asentamiento. Es experimental porque para determinar el grado de asentamiento se lo hizo para cargas constantes de diferente magnitud, así mismo, al depender el asentamiento de la superficie de contacto entre la cimentación y el suelo, también se hizo una variación de dicha superficie. Es transeccional, pues las muestras requeridas para determinar los parámetros necesarios para calcular el grado de asentamiento fueron recolectadas una sola vez.

La metodología aplicada se encuentra basada en dos variables, una independiente y otra dependiente, la primera se refiere a la carga aplicada a la cimentación, que es dependiente de la estructura que se proyecte, no obstante, en este trabajo se hizo una variación arbitraria de ésta, por lo que se la considera independiente; la otra es el grado de asentamiento, que depende de la carga aplicada y de la superficie de contacto entre la cimentación y el suelo.

1.5.1 Delimitación de la zona de estudio.

Se delimitó la zona de estudio tomando como referencia la zona de expansión urbana, de acuerdo al catastro municipal de la ciudad de Loja, en donde se delimitó ésta investigación para seleccionar los cuatro sectores a estudiar. Para evaluar cada uno de ellos, se realizó un muestreo con el que se determinó los parámetros de las arcillas más sensibles.

1.5.2 Caracterización de las arcillas de la zona de estudio.

Con equipos manuales y la realización de calicatas se recolectó doce muestras de suelo, a las cuales se las ensayó en laboratorio y se realizó su respectiva clasificación, mediante el sistema SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) con los parámetros obtenidos de los ensayos de Límites de Atterberg y granulometría según se detalla en las normas ASTM D-4318 y ASTM D-422 (American Society for Testing and Materials), respectivamente. En base a la clasificación de suelos y a los parámetros obtenidos, de los ensayos anteriormente mencionados, se seleccionó para cada sector el punto de muestreo más crítico teniendo en cuenta que este trabajo está orientado a arcillas de elevada plasticidad y compresibilidad (CH) y arcillas de mediana y baja plasticidad (CL). Seleccionado, para cada sector, el punto de muestreo más crítico, se provino a realizar la toma de muestra inalterada para la realización del ensayo de consolidación según la norma ASTM D-2435, al igual que el ensayo de fluorescencia de rayos X. Con los parámetros obtenidos del ensayo de consolidación se procedió a realizar los cálculos de los asentamientos, y con los resultados del ensayo de fluorescencia de rayos X se determinó la composición química de los suelos.

1.5.3 Análisis de resultados obtenidos

Con los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio y con el cálculo de asentamientos se analizó los parámetros de cada sector de la zona de estudio buscando relaciones entre éstos y el grado de asentamientos.

1.6 Ubicación y descripción de la zona de estudio

Este proyecto de fin de titulación se aplica al estudio de asentamientos de cuatro sectores del cantón Loja, provincia Loja, en los sectores de PROURVI, Colinas Lojanas, Ciudad Victoria y Carigan, sectores comunicados por la vía Lateral de Paso y a los cuales de aquí en adelante se les referirá como sector 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

Los puntos de muestro que a continuación se detallan en la tabla 1 han sido ubicados en la zona de estudio, representada en la figura 1, con un GPS Garmin Rino 110 y están dados en coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator).

Tabla 1: Coordenadas de los puntos de muestreo

Muestreo	Referencia	Norte	Este
L - 01	Julio Ordoñez	9553357.18	699212.97
L - 02	PROURVI	9553792.07	699046.81
L - 03	Mater Dei	9555466.65	697728.45
L - 04	Colinas Lojanas	9555161.30	697121.13
L - 05	Urna de la Vía Lateral de Paso	9555715.17	696653.53
L - 06	Ciudad Victoria	9557681.20	696419.20
L - 07	Ciudad Victoria	9557806.48	696575.57
L - 08	Pista de Motos	9558226.83	695829.01
L - 09	Centro de Retención Vehicular	9559326.48	696082.65
L - 10	Carigan	9559880.21	695949.75
L - 11	Carigan	9560846.32	695665.05
L - 12	Carigan	9561497.09	695625.99

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor

La zona de estudio cuenta de cuatro sectores, en los cuales se realizaron diferentes muestreos para determinar qué tipo de material presentaría las condiciones más desfavorables ante situaciones de carga prolongada, quedando éstos distribuidos como se describe en la tabla 2.

En la zona de estudio, el sector 1 presenta una falla geológica que ha conducido a un movimiento de ladera y existe una cedencia del terreno, la cual debería ser tomada en cuenta antes de realizar cualquier construcción. Entre el sector 2 y 3 se encuentra una falla geológica que ha conducido al deslizamiento de la Vía Lateral de Paso. El sector 4 abarca el lado este de la Vía Lateral de Paso, el cual no presenta novedad.

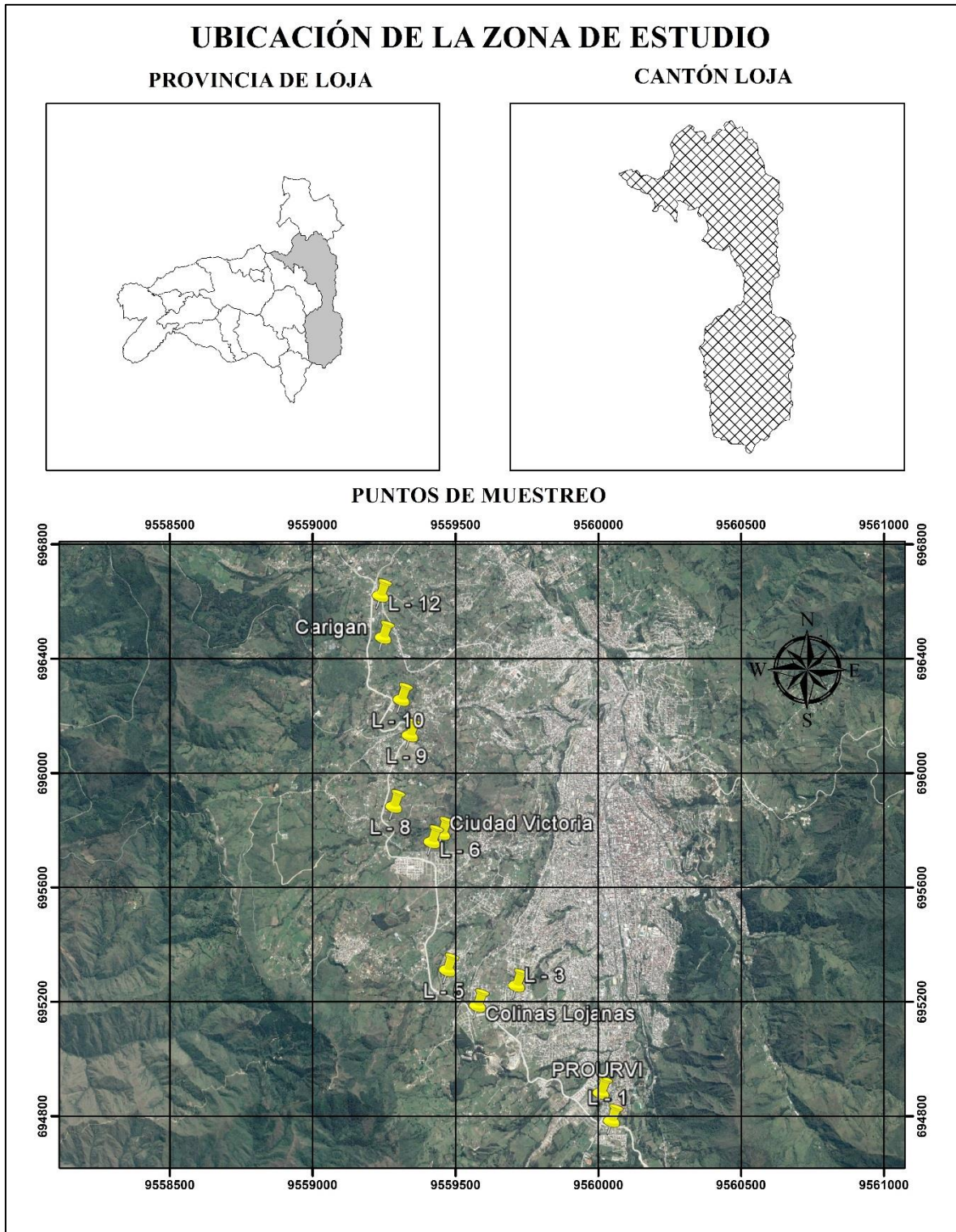


Figura 1: Mapa de ubicación de la zona de estudio
 Fuente: Google Maps
 Elaboración: El Autor

Tabla 2: Puntos de muestreo por cada sector

Sector	Punto de Muestreo	Referencia
1	L – 01	Julio Ordoñez
	L – 02	PROURVI
2	L – 03	Mater Dei
	L – 04	Colinas Lojanas
	L – 05	Urna de la Vía Lateral de Paso
3	L – 06	Ciudad Victoria
	L – 07	Ciudad Victoria
	L – 08	Pista de Motos
	L – 09	Centro de Retención Vehicular
4	L – 10	Carigan
	L – 11	Carigan
	L – 12	Carigan

Fuente: El autor

Elaboración: El Autor

Respecto a la meteorología, según la estación pluviométrica del INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) en la Argelia, la temperatura media anual registrada es de 16.4°C, la temperatura promedio máxima anual es de 21.4°C y la mínima de 12.6°C. En la zona de estudio se tiene una precipitación anual de 1096.4mm, siendo los meses con mayor precipitación los de Octubre, Noviembre, Diciembre, Enero y Febrero lo que se debe tener en cuenta al momento de calcular los asentamientos, pues es más probable que el suelo se encuentre saturado.

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

La carga que se le puede aplicar a una cimentación está limitada por dos condiciones, la carga permisible debida a la capacidad portante del suelo y la carga permisible debida a los asentamientos, y es ésta segunda la que es controlada por las propiedades de los suelos arcillosos y estudiada en este trabajo (Braja Madison, 2012).

La carga permisible debida a asentamientos, a diferencia de la carga permisible debida a la capacidad portante del suelo, es limitada por reglamentos de construcción locales, pues depende solamente de estos reglamentos la tolerancia que se le da a los asentamientos de las estructuras (Braja Madison, 2012).

El asentamiento de una cimentación se divide en dos etapas. La primera es llamada asentamiento instantáneo (elástico o inmediato) y la segunda asentamiento por consolidación, la cual consta de las fases primaria y secundaria. El asentamiento total de una cimentación es la suma del asentamiento instantáneo y del asentamiento por consolidación (Braja Madison, 2012).

2.1 Cimentaciones

Los sistemas de cimentación existentes se los clasifica de dos formas, superficiales y profundos. Aunque están clasificados de esta forma hacen referencia no solo a la profundidad sino también al sistema empleado, las cimentaciones superficiales abarcan zapatas aisladas, continuas, combinadas y losas de cimentación; las zapatas profundas tratan de pilotes y pilas perforadas que transmiten las cargas de la estructura a capas profundas del terreno que generalmente son más resistentes. Las cimentaciones superficiales son mayormente usadas debido a su bajo costo y son empleadas generalmente en obras relativamente livianas y de importancia secundaria, a diferencia de las cimentaciones profundas que habitualmente se emplean para proyectos de gran envergadura en los que las cargas transmitidas al sistema de cimentación no pueden ser resistidas por las capas superficiales del terreno (Crespo Villalaz, 2016).

2.2 Arcillas

“Los suelos tienen su origen en los macizos rocosos preexistentes que constituyen la roca madre, sometida a la acción ambiental disgregadora de la erosión en sus facetas física, química y biológica.” (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).

El suelo es un material complicado y para su estudio se lo ha clasificado en suelos granulares (grava y arena) y suelos finos (limo y arcilla), siendo ésta última aquella en la que están presentes los asentamientos por consolidación. Las arcillas están formadas por partículas con tamaños inferiores a los limos (0,002 mm). Se trata ya de partículas tamaño gel y se necesita que haya existido transformaciones químicas para llegar a estos tamaños. Están formadas, principalmente, por minerales silicatados, constituidos por cadenas de elementos tetraédricos y octaédricos, unidas por enlaces covalentes débiles, pudiendo entrar las moléculas de agua entre las cadenas produciendo, a veces, aumentos de volumen, recuperables cuando el agua se evapora. Todo ello hace que la capacidad de retención del agua sea muy grande, por lo que son generalmente los materiales más problemáticos (tiempos muy elevados de consolidación o de expulsión de agua bajo esfuerzos) (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).

2.3 Índice de liquidez

“La consistencia relativa de un suelo cohesivo en el estado natural se puede definir por medio de una relación denominada índice de liquidez” (Braja Madison, 2015). Se lo puede obtener mediante:

$$IL = \frac{w - LP}{LL - LP} \quad [1]$$

En esta relación, w representa el contenido de humedad in situ del suelo, LP el límite plástico y LL el límite líquido, valores obtenidos mediante el ensayo de límites de Atterberg descrito en la norma de ASTM D-4318.

En una arcilla sensitiva el contenido de humedad natural puede ser mayor que el límite líquido lo que implica que: $IL > 1$, sin embargo en suelos sobre consolidados puede existir un contenido de humedad natural menor que el índice plástico, en este caso $IL < 0$ (Braja Madison, 2015).

2.4 Presión de pre-consolidación

Cuando se produce la meteorización de las rocas y se forman los depósitos de suelos, éstos comienzan a sedimentarse y su altura aumenta con el pasar del tiempo. El incremento de la altura del depósito del suelo está ligado a una disminución de la relación de vacíos y a un

incremento de carga en las capas iniciales de dicho depósito, esto debido a que el suelo tiene un peso dado y las capas de la base del depósito son las que la soportan. Si el suelo no continúa sedimentándose debido a un alto de la meteorización, la carga que soporta será la máxima que ha existido en su historia geológica, y si por un cambio en las condiciones geológico-ambientales se produjera erosión, la máxima carga que ha existido en dicho depósito seguiría siendo la misma. Esta máxima carga a la que ha estado sometido el depósito de suelo, es la que se conoce como presión de pre-consolidación. Es así que se define la presión de pre-consolidación como la máxima carga a la que ha estado sometido un depósito de suelo en su historia geológica. Ésta presión es directamente proporcional con la profundidad pues obviamente las capas de la base del depósito de suelo son las que mayor carga soportan (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2015). La presión de pre-consolidación se puede determinar con correlaciones como las propuestas por Stas y Kulhawy (Stas & Kulhawy, 1984) y la de Kulhawy y Mayne (Kulhawy & Mayne, 1990), más en este trabajo se ha optado por determinarla conforme la norma ASTM D-2435, el procedimiento es como sigue (Braja Madison, 2012), ver figura 2:

- En la curva $e - \log \sigma'$ se determina el punto O donde la curvatura es más pronunciada, es decir, donde el radio de curvatura sea menor.
- Se traza la línea OA paralela al eje de las abscisas.
- Se traza una línea OB tangente a la curva $e - \log \sigma'$ en el punto O .
- Se traza una bisectriz OC en $A\hat{O}B$.
- Se prolonga la parte de la línea recta de la curva $e - \log \sigma'$ hasta intersectar OC . La intersección es el punto D . La presión de pre-consolidación corresponde al valor de la abscisa del punto D .

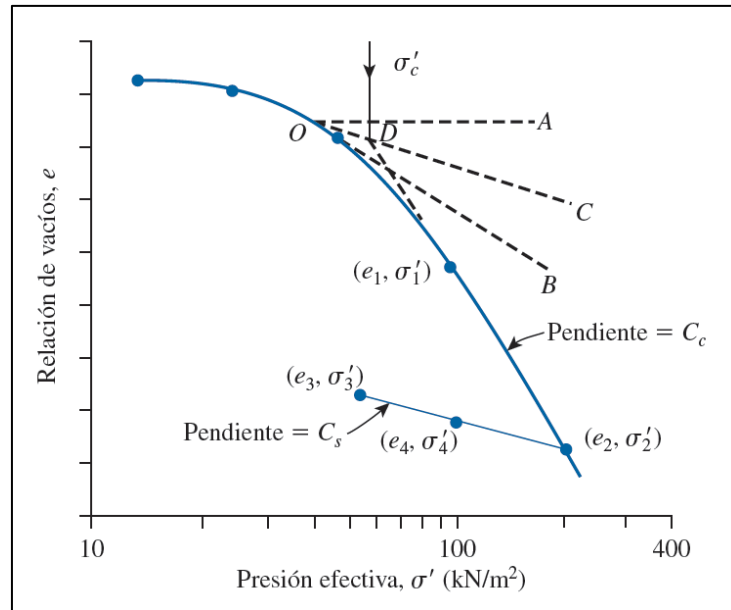


Figura 2: Determinación de la presión de pre consolidación.
 Fuente: (Braja Madison, Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, 2012)
 Elaboración: El Autor

2.5 Presión de sobrecarga efectiva in situ

La presión de sobrecarga efectiva, es la carga que el depósito de suelo soporta actualmente, pudiendo o no ser, según se describió en el apartado 2.4, igual a la presión de pre-consolidación (Braja Madison, 2012). Nagaraj y Murthy (Nagaraj & Murthy, 1985) propusieron un método para determinar la presión de sobrecarga efectiva in situ, sin embargo se ha optado por aplicar el método deducido de la mecánica de suelos, en donde, la carga que soporta un depósito de suelo es directamente proporcional con la profundidad y depende de si el depósito se encuentra o no saturado y en caso que sí, de la profundidad del nivel freático (Braja Madison, 2012). Siempre que sea posible debe aplicarse este método, según el cual:

- Caso I: El nivel freático se encuentra sobre el estrato de arcilla, ver figura 3.

$$\sigma'_o (KN/m^2) = D_1 \cdot \gamma_1 + D_2 (\gamma_{sat1} - \gamma_w) + \frac{1}{2} D_3 (\gamma_{sat2} - \gamma_w) \quad [2]$$

Donde:

σ'_o = Presión de sobrecarga efectiva in situ

D_1 = Profundidad al nivel freático

γ_1 = Peso específico seco del suelo del primer estrato

D_2 = Espesor del primer estrato que se encuentra saturado

γ_{sat1} = Peso específico saturado del primer estrato

D_3 = Espesor del estrato de arcilla

γ_{sat2} = Peso específico saturado del estrato de arcilla

γ_w = Peso específico del agua

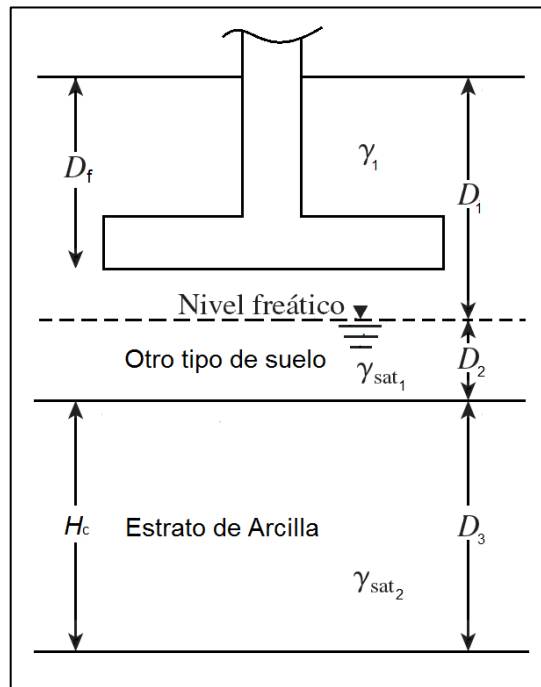


Figura 3: Caso I. El nivel freático se encuentra sobre el punto de cálculo.
Fuente: (Braja Madison, Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, 2012)
Elaboración: El Autor

- Caso II: El nivel freático se encuentra bajo el estrato de arcilla y no influye en la presión de sobrecarga efectiva, ver figura 4.

$$\sigma'_o(KN/m^2) = D_1 \cdot \gamma_1 + \frac{1}{2} D_2 \cdot \gamma_2 \quad [3]$$

Donde:

σ'_o = Presión de sobrecarga efectiva in situ

D_1 = Espesor del primer estrato

γ_1 = Peso específico del suelo del primer estrato

D_2 = Espesor del estrato de arcilla

γ_2 = Peso específico del estrato de arcilla

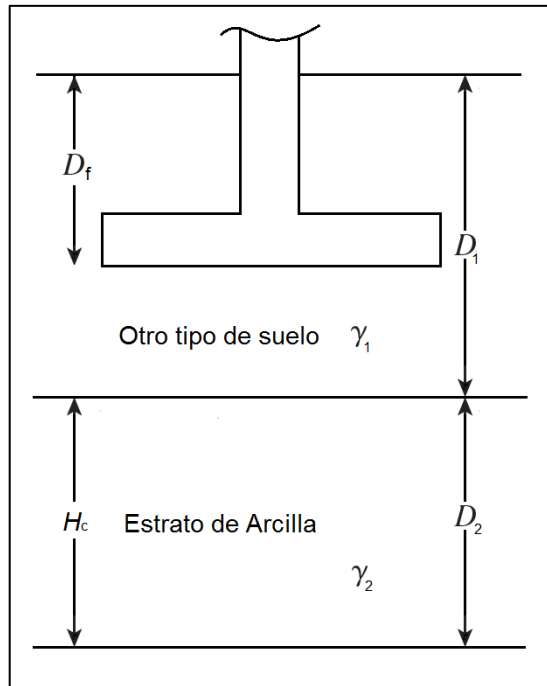


Figura 4: Caso II. El nivel freático no influye en la presión de sobrecarga efectiva
 Fuente: (Braja Madison, Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, 2012)
 Elaboración: El Autor

2.6 Relación de sobre consolidación

Un factor determinante para el cálculo de asentamientos es la relación de sobre consolidación, OCR (Over Consolidation Ratio), pues el estado en que se encuentra el suelo y su historia geológica respecto a las cargas a las que ha estado sometido es descrito por este factor. Se dice que un suelo se encuentra normalmente consolidado cuando la presión de pre-consolidación es igual a la presión de sobrecarga efectiva, y cuando esto no sucede, el suelo se encuentra sobre consolidado (Braja Madison, 2012). La relación de sobre consolidación OCR queda determinada por el cociente entre la presión de pre-consolidación y la presión de sobrecarga efectiva.

$$OCR = \frac{\text{Presión de preconsolidación } (\sigma'_c)}{\text{Presión de sobrecarga efectiva } (\sigma'_o)} \quad [4]$$

Dado que la presión de pre-consolidación es la máxima presión de sobrecarga a la que ha estado sometido el suelo y que la presión de sobrecarga efectiva es la que actualmente tiene dicho suelo, el valor de OCR no puede ser menor a 1, siendo para suelos normalmente consolidados: $OCR = 1$ y para suelos sobre consolidados: $OCR > 1$ (Braja Madison, 2012). El

OCR es un valor importante y diferentes autores han propuesto diferentes correlaciones para su determinación como la de Ladd (Ladd, Foote, Ishihara, & Schlosser, 1977), aunque siempre que sea posible, el OCR debe ser obtenido con los resultados del ensayo de consolidación detallado en la norma ASTM D – 2435.

2.7 Resistencia cortante no drenada

La cohesión es la capacidad que tienen las partículas de los suelos de mantenerse unidas entre sí en función de fuerzas internas, que entre otras cosas, dependen del número de puntos de contacto. Consecuentemente la cohesión es mayor en suelos finos. Cuando la presión de poros no se disipa se denomina cohesión no drenada o resistencia cortante no drenada. La cohesión se puede determinar mediante el ensayo triaxial con la prueba no consolidada no drenada (UU) según se especifica en la norma ASTM D – 2850. Hara y colaboradores (1971) proponen una correlación entre la resistencia a la compresión simple, el número de penetración estándar N_{60} y el índice de consistencia (IC), tal como se detalla en la tabla 3.

Tabla 3: Relación entre el N_{60} , IC y q_u

Número de penetración estándar, N_{60}	Índice de consistencia, IC	Resistencia a la compresión simple, q_u ($\frac{KN}{m^2}$)
< 2	< 0.5	< 25
2 - 8	0.5 - 0.75	25 - 80
8 - 15	0.75 - 1	80 - 150
15 - 30	1 - 1.5	150 - 400
> 30	> 1.5	> 400

Fuente: (Hara, Ohata, & Niwa, 1971)

Elaboración: El Autor

$$IC = \frac{LL - w}{LL - LP} \quad [5]$$

Donde w, LL y LP hacen referencia al contenido de humedad, límite líquido y límite plástico respectivamente. Del ensayo a la compresión simple se tiene que:

$$C_u = \frac{q_u}{2} \quad [6]$$

Donde:

C_u = Resistencia cortante no drenada

q_u = Resistencia a la compresión simple

2.8 Módulo de Young o módulo elástico

“Hooke enunció la ley que el esfuerzo es proporcional a la deformación. Pero fue Thomas Young, en 1807, quien introdujo la expresión matemática con una constante de proporcionalidad que se llama Módulo de Young.” (Pytel & Singer, 2012).

El módulo de Young o módulo de elasticidad como también se le conoce, al igual que la presión de pre-consolidación es directamente proporcional con la profundidad y su valor sirve para el cálculo de asentamientos por consolidación. Se puede determinar su valor con ensayos de laboratorio, más en este trabajo se ha optado por calcularlo de acuerdo a una correlación que relaciona el OCR y la cohesión no drenada (Duncan & Buchignani, 1976), pues no es objeto de este trabajo su estudio. Ver figura 5.

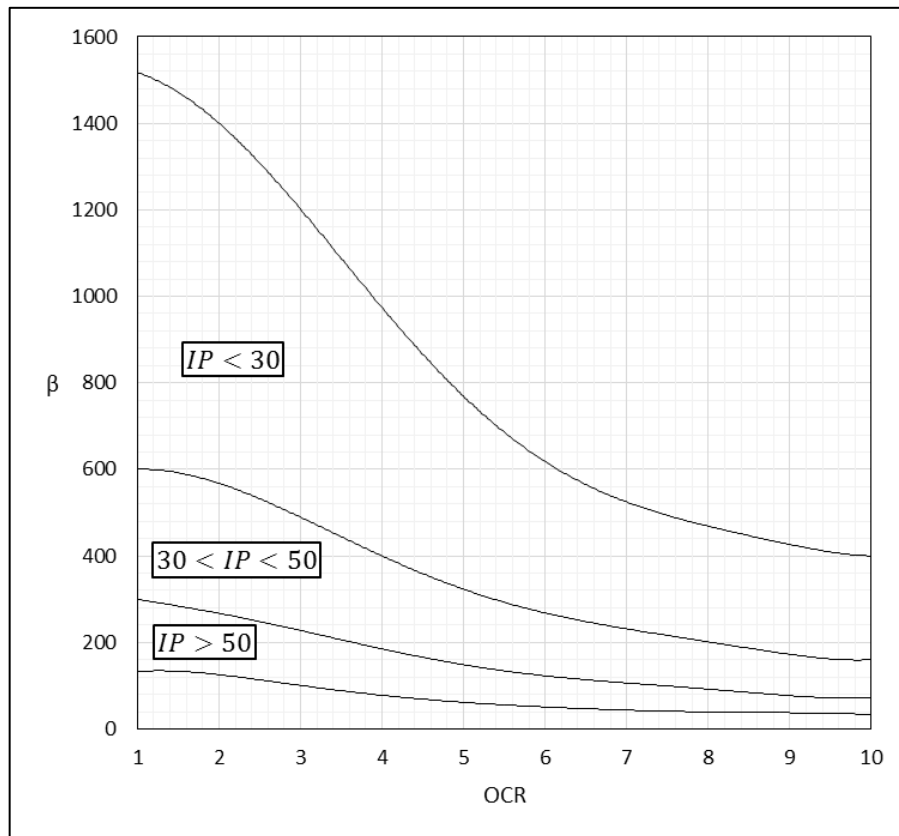


Figura 5: Curvas para la determinación de β
Fuente: (Duncan & Buchignani, 1976)
Elaboración: El Autor

El módulo de Young se calcula como:

$$E_s = \beta C_u \quad [7]$$

C_u hace referencia a la resistencia cortante no drenada mientras que β es un coeficiente que se encuentra en función del índice de plasticidad y de la relación de sobre consolidación OCR, para valores intermedios de IP y OCR el valor de β se obtiene interpolando.

2.9 Relación de Poisson

“El coeficiente de Poisson denotado como μ_s , es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento.” (Ortiz Berrocal, 1998). Este parámetro es necesario para el cálculo de asentamientos, su valor recomendado es $\mu_s = 0.4$, en la tabla 4 se dan otros valores.

Tabla 4: Relación de Poisson (μ_s) para diferentes condiciones de la arcilla

Suelo	μ_s
Arcilla saturada	0.5
Arcilla parcialmente saturada	0.3 a 0.4
Arcilla con arena	0.2 a 0.4
Arcillas blandas normalmente consolidadas	0.35
Arcillas medias	0.28
Arcillas duras pre-consolidadas	0.42

Fuente: (Leoni, 2010)

Elaboración: El Autor

2.10 Esfuerzo vertical

“Para el cálculo de los asentamientos de cimentaciones se requiere estimar el incremento del esfuerzo vertical en la masa de suelo debido a la carga neta aplicada sobre la cimentación.” (Braja Madison, 2012). La magnitud del asentamiento depende del esfuerzo vertical pues son directamente proporcionales. Boussinesq propuso un método para determinar el esfuerzo vertical efectivo (Boussinesq, 1883), a continuación se detalla:

$$\Delta\sigma = q_o I_c \quad [8]$$

Donde:

$\Delta\sigma =$ Incremento total del esfuerzo

$q_o =$ Presión neta aplicada sobre la cimentación

$I_c =$ Fator de influencia

La presión neta q_o se obtiene mediante la siguiente ecuación, en donde Q es la carga que se transmite de la columna a la zapata y A es la superficie de la zapata que está en contacto con el suelo.

$$q_o = \frac{Q}{A} \quad [9]$$

El factor de influencia se calcula con:

$$I_c = \frac{2}{\pi} \left(\frac{m_1 n_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + 1}} \times \frac{m_1^2 + 2n_1^2 + 1}{(1 + n_1^2)(m_1^2 + n_1^2)} + \text{sen}^{-1} \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2} \sqrt{1 + n_1^2}} \right) \quad [10]$$

Donde:

$$m_1 = \frac{L}{B}; \quad n_1 = \frac{2z}{(B)}$$

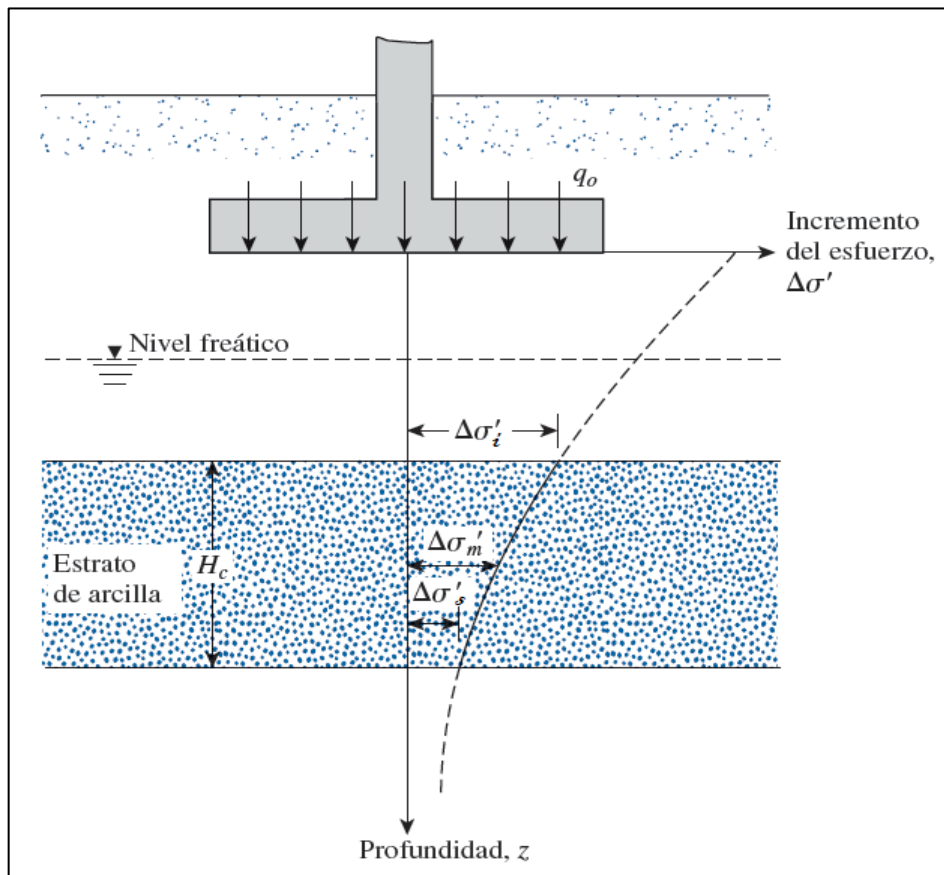


Figura 6: Representación del esfuerzo en un estrato de arcilla bajo una zapata
Fuente: (Braja Madison, Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, 2012)
Elaboración: El Autor

Por lo general en el cálculo de asentamiento se necesita el esfuerzo promedio para lo cual se lo calcula en $H = 0, H = H/2$ y $H = H$. Se aplica la siguiente ponderación donde $\Delta\sigma_i, \Delta\sigma_m$ y $\Delta\sigma_s$ son el esfuerzo al inicio, mitad y final, respectivamente, del estrato de arcilla, ver figura 6.

$$\Delta\sigma = \frac{1}{6}(\Delta\sigma_s + 4\Delta\sigma_m + \Delta\sigma_i) \quad [11]$$

2.11 Asentamientos instantáneos

El asentamiento instantáneo también llamado elástico o inmediato se da durante la construcción o inmediatamente después de ésta; y se debe a un reajuste de las partículas provocado por el aumento de carga, en este reajuste de partículas se expulsa el aire que está contenido en la masa de suelo bajo la cimentación (Braja Madison, 2012).

2.11.1 Método de Janbú y colaboradores (1956).

$$S_e = A_1 \cdot A_2 \frac{q_o \cdot B}{E_s} \quad [12]$$

Donde:

S_e = Asentamiento elástico o inmediato, (Charles Janbu, Bjerrum, & Kjaernsli, 1956)

A_1 = Función de $\frac{H}{B}$ y $\frac{L}{B}$ (ver figura 7)

A_2 = Función de $\frac{D_f}{B}$ (ver figura 8)

q_o = Presión neta aplicada sobre la cimentación

B = Ancho de la zapata

E_s = Módulo de Young o módulo elástico

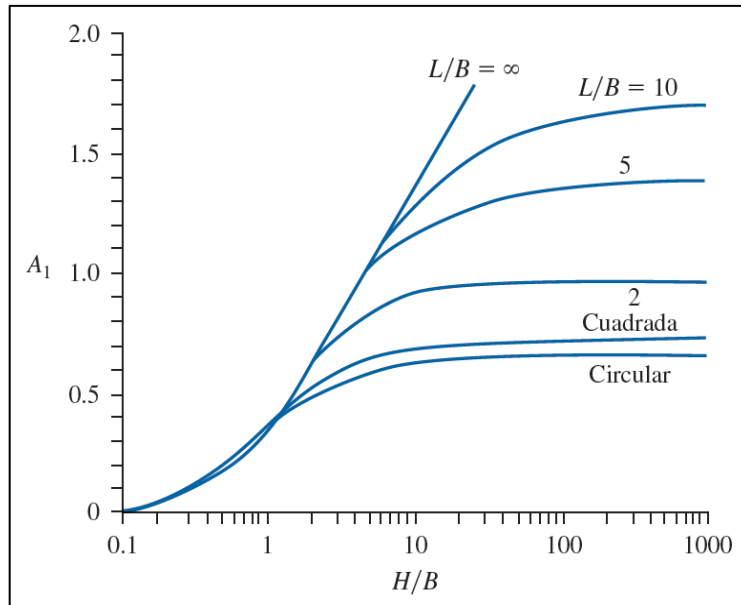


Figura 7: Curvas para la determinación de A_1
 Fuente: (Jhon Tyler & Carrier III, 1978).
 Elaboración: El Autor

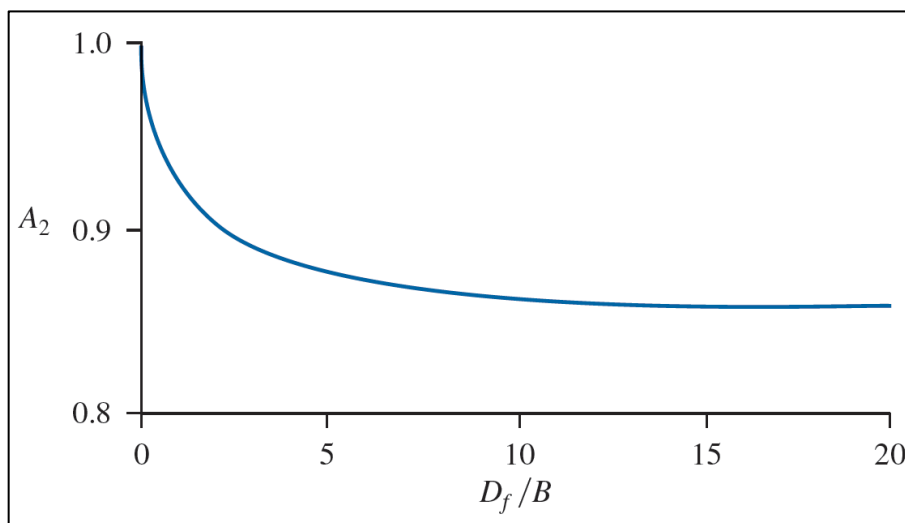


Figura 8: Curvas para la determinación de A_2
 Fuente: (Jhon Tyler & Carrier III, 1978).
 Elaboración: El Autor

2.11.2 Método basado en la teoría de la elasticidad.

$$S_e = q_o \cdot (\alpha \cdot B') \frac{1 - u_s^2}{E_s} I_s I_f \quad 13]$$

Donde:

S_e = Asentamiento elástico o inmediato

q_o = Presión neta aplicada sobre la cimentación

α = Factor que depende de la ubicación donde se calcula el asentamiento

B' = Factor que depende de la ubicación donde se calcula el asentamiento

μ_s = Relación de Poisson del suelo (valor recomendado 0.4)

E_s = Módulo de Young o módulo elástico

I_s = Factor de forma

I_f = Factor de profundidad, función de D_f, B, L y u_s

La relación de Poisson es directamente proporcional con el grado de saturación del suelo, tiene un valor de 0.5 para suelos completamente saturados y tiende a 0 (cero) conforme disminuye el grado de saturación. El factor de profundidad I_f se lo obtiene de la tabla propuesta en (Bowles, 1987).

- Factor de forma I_s

Tabla 5: Relaciones para el cálculo en el centro y en una esquina de la zapata

Factores de cálculo	Centro de la zapata	Esquina de la zapata
α	4	1
B'	$\frac{B}{2}$	B
m'	$\frac{L}{B}$	$\frac{L}{B}$
n'	$\frac{2H}{B}$	$\frac{H}{B}$

Fuente: (Braja Madison, Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, 2012)

Elaboración: El Autor

$$I_s = F_1 + \frac{1 - 2u_s}{1 - u_s} F_2 \quad [14]$$

$$F_1 = \frac{A_0 + A_1}{\pi} \quad [15]$$

$$F_2 = \frac{n' \cdot \text{Arctan}(A_2)}{2\pi} \quad (\text{trabajar en radianes}) \quad [16]$$

$$A_0 = m' \ln \frac{(1 + \sqrt{m'^2 + 1})\sqrt{m'^2 + n'^2}}{m'(1 + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1})} \quad [17]$$

$$A_1 = \ln \frac{(m' + \sqrt{m'^2 + 1})\sqrt{1 + n'^2}}{m' + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}} \quad [18]$$

$$A_2 = \frac{m'}{n'\sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}} \quad [19]$$

En asentamiento elástico para una cimentación rígida se puede estimar con:

$$(S_e)_{rigida} \approx 0.93(S_e)_{flexible} \quad [20]$$

2.12 Asentamientos por consolidación

El proceso de disipación de los excesos de la presión intersticial (presión de poros) generados por una aplicación de carga en el terreno, se denomina consolidación (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).

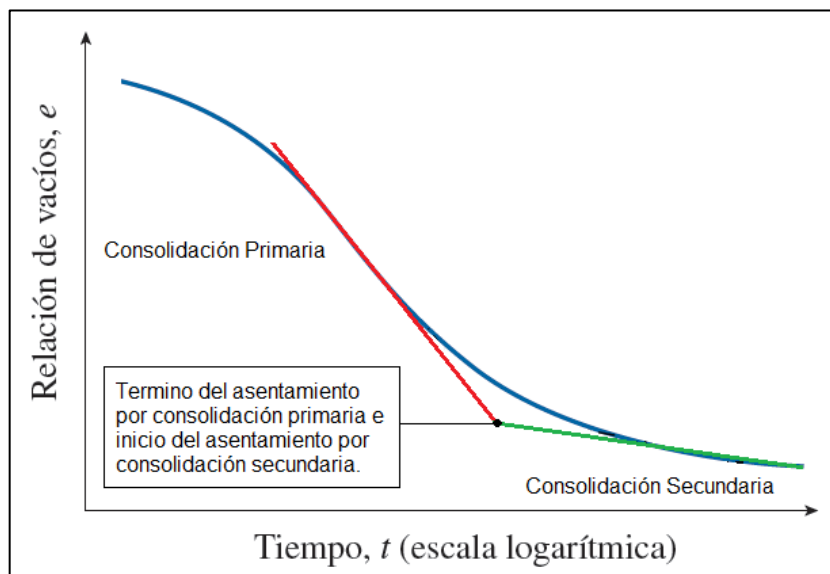


Figura 9: Representación de la consolidación primaria y secundaria
Fuente: Norma ASTM D-2435
Elaboración: El Autor

La rapidez de flujo y consiguiente disipación de presión de poros de un suelo, dependerá de su permeabilidad hidráulica (Capacidad de filtración). Así pues, en un suelo granular con relativamente elevada permeabilidad hidráulica la disipación de la presión de poros se dará al mismo tiempo en que es aplicada la carga. Al contrario, en un suelo arcilloso, cuya permeabilidad hidráulica es relativamente baja la disipación de la presión de poros puede prolongarse durante periodos de tiempo considerables (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño,

& Oteo, 2002). Este fenómeno es apreciable cuando se realiza el ensayo de edométrico, en la figura 9 se presenta una gráfica adimensional de una curva del ensayo donde se puede apreciar la consolidación, siendo la consolidación primaria la parte de mayor pendiente de la curva y la consolidación secundaria la parte final de la curva, cuya pendiente tiende a cero.

El nivel de asentamiento está directamente relacionado con la relación de sobre consolidación OCR, pues en un suelo sobre consolidado ($OCR > 1$) el asentamiento es menor que en un suelo normalmente consolidado ($OCR = 1$) (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002). A continuación se examina las dos fases del asentamiento por consolidación.

2.12.1 Asentamiento por consolidación primaria.

El asentamiento por consolidación primaria se produce generalmente en un tiempo de algunos meses o unos pocos años después de construida la obra y se debe a la disipación de la presión de poro del agua, esta fase es más importante en arcillas inorgánica y en suelos limosos, su cálculo difiere dependiendo si el suelo se encuentra normalmente consolidado o sobre consolidado (Braja Madison, 2012)

Cuando se trata de arcillas normalmente consolidadas ($OCR = 1$) se usa la siguiente expresión:

$$S_{c(p)} = \frac{C_c H_c}{1 + e_o} \log \left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'_{prom}}{\sigma'_o} \right) \quad [21]$$

En el caso de arcillas sobre consolidadas se presentan dos casos para la determinación del asentamiento por consolidación primaria.

- Si: $\sigma'_o + \Delta\sigma_{prom} \leq \sigma'_c$

$$S_{c(p)} = \frac{C_s H_c}{1 + e_o} \log \left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'_{prom}}{\sigma'_o} \right) \quad [22]$$

- Si: $\sigma'_o < \sigma'_c < \sigma'_o + \Delta\sigma'_{prom}$

$$S_{c(p)} = \frac{C_s H_c}{1 + e_o} \log \left(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_o} \right) + \frac{C_c H_c}{1 + e_o} \log \left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'_{prom}}{\sigma'_c} \right) \quad [23]$$

Donde:

$S_{c(p)}$ = Asentamiento por consolidación primaria

C_c = Coeficiente de compresión

C_s = Coeficiente de expansión o recompresión (C_r)

H_c = Espesor del estrato de arcilla

e_o = Relación de vacíos inicial

σ'_o = Presión de sobrecarga efectiva insitu

σ'_c = Presión de pre – consolidación

$\Delta\sigma'_{prom}$ = Esfuerzo promedio en el estrato de arcilla

2.12.2 Asentamiento por consolidación secundaria.

El asentamiento por consolidación secundaria se produce en un tiempo que puede comprender algunas décadas y se debe a un ajuste plástico de la textura del suelo provocado por la disipación de presión de poro del agua, esta fase es más significativa en suelos orgánicos (Braja Madison, 2012). La normativa ecuatoriana propone un tiempo de 25 años para la consolidación secundaria.

$$S_{c(s)} = C'_\alpha H_c \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad [24]$$

$$C'_\alpha = \frac{C_\alpha}{1 + e_p} \quad [25]$$

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\log(t_2/t_1)} \quad [26]$$

$$e_p = e_o - \Delta e \quad [27]$$

Donde:

$S_{c(s)}$ = Asentamiento por consolidación secundaria

C'_α = Coeficiente de consolidación secundaria

H_c = Espesor del estrato de arcilla

C_α = Índice de compresión secundaria

e_p = Relación de vacíos al final de la consolidación primaria

e_o = Relación de vacíos inicial

$\Delta e =$ Variación en la relación de vacíos

$t_2, t_1 =$ Tiempos

Cuando se trata de arcillas normalmente consolidadas (OCR = 1) la variación en la relación de vacíos se obtiene como sigue:

$$\Delta e = C_c \times \log \left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'_{prom}}{\sigma'_o} \right) \quad [28]$$

En el caso de arcillas sobre consolidadas se presentan dos casos:

- Si: $\sigma'_o + \Delta\sigma_{prom} \leq \sigma'_c$

$$\Delta e = C_s \times \log \left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'_{prom}}{\sigma'_o} \right) \quad [29]$$

- Si: $\sigma'_o < \sigma'_c < \sigma'_o + \Delta\sigma'_{prom}$

$$\Delta e = C_s \times \log \left(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_o} \right) + C_c \times \log \left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'_{prom}}{\sigma'_c} \right) \quad [30]$$

Donde:

$C_c =$ Coeficiente de compresión

$C_s =$ Coeficiente de expansión o recompresión (C_r)

$\sigma'_o =$ Presión de sobrecarga efectiva insitu

$\sigma'_c =$ Presión de pre – consolidación

$\Delta\sigma'_{prom} =$ Esfuerzo promedio en el estrato de arcilla

2.13 Análisis por fluorescencia de rayos X

La fluorescencia de rayos X (XRF, sigla en inglés) consiste en emisión de rayos X secundarios (o fluorescentes) característicos de un material que ha sido excitado al ser bombardeado con rayos X de alta energía o rayos gamma. Este fenómeno es muy utilizado para análisis elemental y análisis químico, particularmente en la investigación de metales, vidrios, cerámicos y materiales de construcción, así como en la de geoquímica, ciencia forense y arqueología. Al ser aplicable a materiales de construcción, este ensayo es usado para

determinar la composición mineralógica de los suelos, lo que permite corroborar o refutar la clasificación, obtenida por otro método, de un tipo de suelo (Beckhoff, Kanngieber, Langhoff, Wedell, & Wolff, 2006).

Finalmente en la figura 10 se presenta un flujograma que resume el proceso de cálculo de los asentamientos.

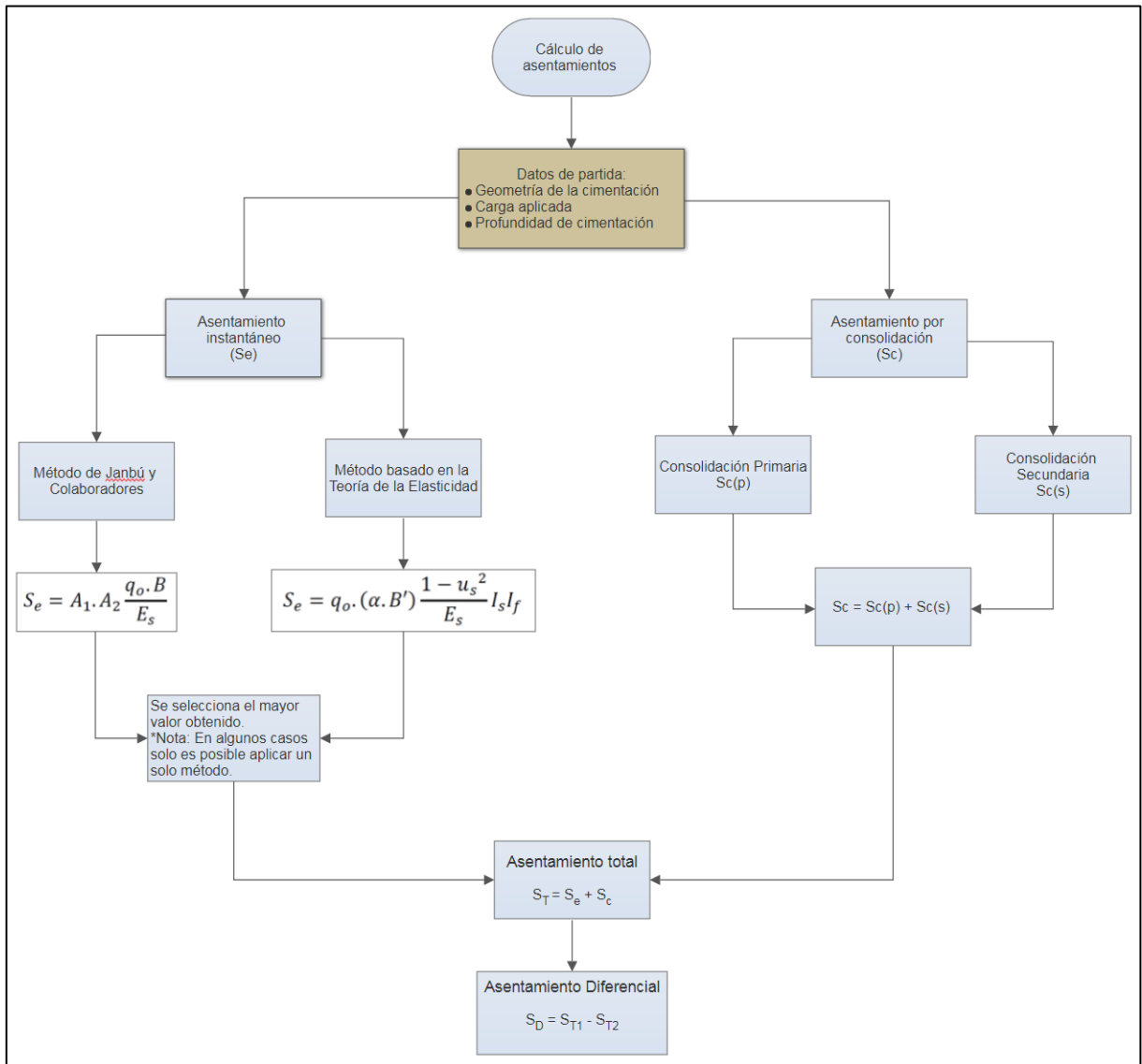


Figura 10: Flujograma del proceso de cálculo de asentamientos

Fuente: El autor

Elaboración: El Autor

CAPÍTULO III
TRABAJO DE CAMPO Y ENSAYOS DE LABORATORIO

3.1 Trabajo de campo

Primero se realizó un reconocimiento de la zona de estudio, posteriormente se procedió a la recolección de las muestras necesarias para la elaboración de los ensayos de laboratorio.

3.1.1 Identificación de la zona de estudio

La identificación y posterior reconocimiento, se la realizó en conjunto con el director y codirector de este trabajo investigativo. En el reconocimiento se constató la existencia de depósitos de arcilla en la zona de estudio.

3.1.2 Recolección de muestras

Se recolectó muestras en dos ocasiones, la primera con la finalidad de realizar una clasificación del suelo y determinar mediante ensayos de laboratorio cuales eran los puntos de muestreo a los cuales pertenecían las arcillas más sensibles, la segunda para obtener los parámetros de las arcilla que permitan determinar los asentamientos.



Figura 11: Inicio muestreo manual
Fuente: El autor
Elaboración: El Autor



Figura 12: Fin del muestreo manual
Fuente: El autor
Elaboración: El Autor

Al primer muestreo se lo realizó con equipo manual a una profundidad comprendida entre uno y dos metros, ver figura 11 y 12, se obtuvo muestras alteradas de doce puntos. La segunda toma de muestras abarcó la obtención de cuatro muestras inalteradas necesarias para realizar el ensayo edométrico, para esto se realizó una calicata por cada punto a ser ensayado, ver figura 13.



Figura 13: Recolección de muestra inalterada, sector 2.
Fuente: El autor
Elaboración: El Autor

3.2 Ensayos de laboratorio

A las doce muestras obtenidas en el primer muestreo se les realizó los ensayos de granulometría y límites de Atterberg con la finalidad de clasificarlas y determinar mediante normativa a qué tipo de suelo pertenecían. A las cuatro muestras inalteradas recolectadas posteriormente, se les realizó adicional a los ensayos antes mencionados, los ensayos de fluorescencia de rayos X y de consolidación.

3.2.1 Granulometría

Se realizó en base a la norma ASTM D-422, se aplicó la granulometría por lavado para las doce muestras, ver figura 14.



Figura 14: Preparación de muestras para granulometría por lavado.

Fuente: El autor
Elaboración: El Autor

3.2.2 Límites de Atterberg

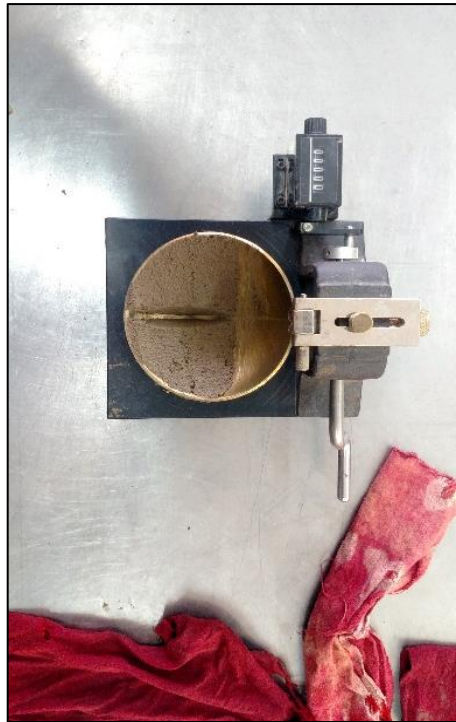


Figura 15: Límite líquido.

Fuente: El autor

Elaboración: El Autor



Figura 16: Límite plástico.

Fuente: El autor

Elaboración: El Autor

Este ensayo se realizó según la norma ASTM D-4318, ver figura 15 y 16, sus resultados sirvieron para clasificar el tipo de material encontrado en las zonas de estudio.

3.2.3 Consolidación

También llamado ensayo edométrico, se lo realizó con el fin de obtener los parámetros necesarios para el cálculo de los asentamientos en las arcillas pertenecientes a la zonas de estudio. Se aplicó la norma ASTM D-2435, se ensayó dos muestras al mismo tiempo en un consolidómetro de tipo fijo, ver figura 17.



Figura 17: Aplicación del ensayo edométrico.

Fuente: El autor

Elaboración: El Autor

3.2.4 Fluorescencia de rayos X

Se lo utilizó en los cuatro especímenes del segundo muestreo, sirvió para determinar la composición mineralógica de las arcillas a las cuales se les aplicó el ensayo edométrico. Se usó el equipo BRUKER S1 y el método Mining Light Elements, ver figura 18.

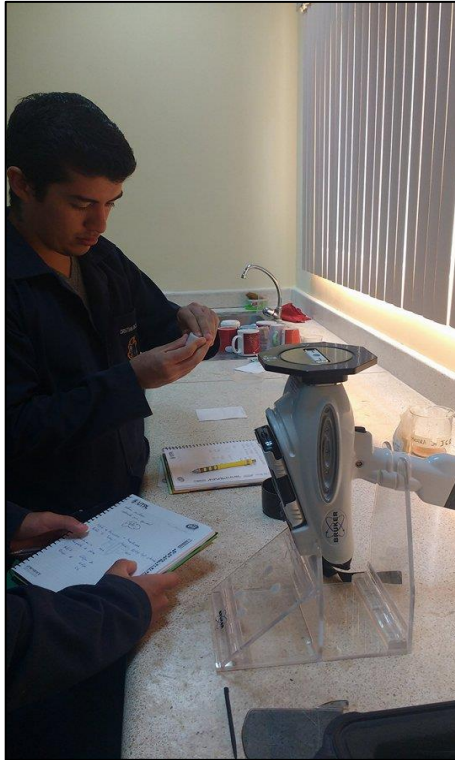


Figura 18: Fluorescencia de rayos X
Fuente: El autor
Elaboración: El Autor

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS

4.1 Caracterización de la zona de estudio

Finalizada la primera parte del trabajo de laboratorio se obtuvo la caracterización del suelo de los diferentes puntos de muestreo que conforman los sectores de la zona de estudio, en la tabla 6 se detallan sus resultados mientras que en la figura 19 se realiza su localización en la carta de Casagrande. Se puede observar que gran parte de estos suelos son arcillas a excepción de los puntos 4, 6 y 10 los cuales se tratan de limo (MH), limo (MH) y arena limosa (SM) respectivamente.

Tabla 6: Clasificación de los puntos de muestreo

Muestreo	Referencia	%Pasa 200	LL	LP	IP	IG	SUCS
L - 01	Julio Ordoñez	82	29	16	13	09	CL
L - 02	Urb. Col. Ing. Civiles Loja	92	39	22	17	17	CL
L - 03	Mater Dei	85	89	35	54	54	CH
L - 04	Colinas Lojanas	88	93	43	50	54	MH
L - 05	Urna de la Vía Lateral de Paso	90	87	33	54	57	CH
L - 06	Ciudad Victoria	72	58	34	24	19	MH
L - 07	Ciudad Victoria	91	93	37	56	61	CH
L - 08	Pista de Motos	88	76	25	51	51	CH
L - 09	Centro de Retención Vehicular	57	35	18	17	07	CL
L - 10	Carigan	26	45	28	17	01	SM
L - 11	Carigan	89	84	30	54	33	CH
L - 12	Carigan	88	86	38	48	28	CH

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

Los puntos seleccionados para la siguiente parte de este trabajo fueron el 2, 4, 7 y 11 representando a los sectores 1, 2, 3 y 4 correspondientemente, se seleccionó dichas muestras por tratarse de arcillas, que es el material al que se encuentra orientado este trabajo, y por ser de alta compresibilidad pues estos suelos sufren mayores asentamientos y lo que esta investigación busca es estudiar el comportamiento de las arcillas más sensibles.

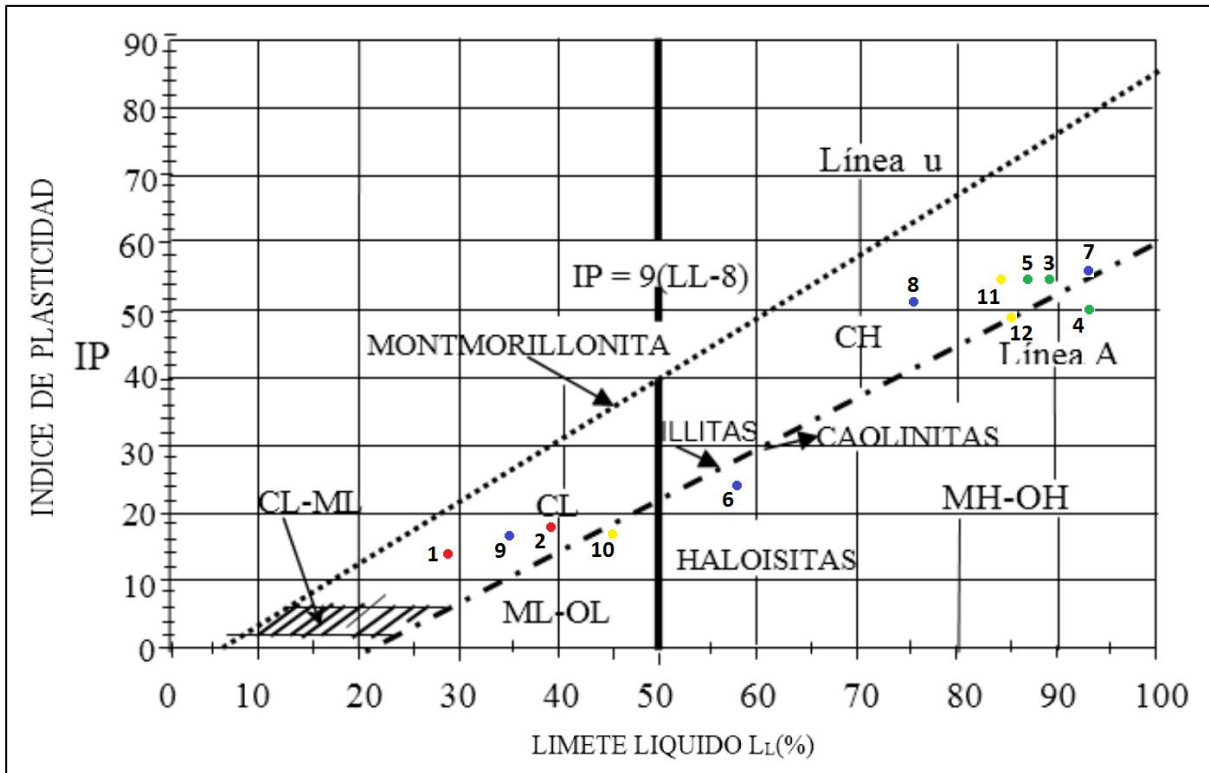


Figura 19: Puntos de muestreo ubicados en la carta de Casagrande.

Fuente: El autor.

Elaboración: El Autor

4.2 Ensayo de fluorescencia de rayos x

Tabla 7: Análisis mineralógico de cada sector (%)

Código	L - 02	L - 04	L - 07	L - 11
SiO ₂	57.60	47.00	44.10	45.10
Al ₂ O ₃	13.80	12.70	12.40	13.50
Fe ₂ O ₃	4.43	5.43	5.25	5.29
MgO Err	2.62	2.76	4.47	2.95
K ₂ O	2.05	1.10	0.71	1.24
CaO	0.87	1.59	1.72	4.83
S	0.06	0.04	0.07	3.94
MgO	0.00	0.00	1.54	0.00
SUCS	CL	MH	CH	CH

Fuente: El autor

Elaboración: El Autor

El óxido de silicio (SiO₂), óxido de aluminio (Al₂O₃) y el óxido de hierro (Fe₂O₃) son elementos característicos de suelos arcillosos, lo que corrobora el resultado obtenido con los ensayos de clasificación de suelos, pues “las arcillas se encuentran formadas principalmente por minerales silicatados, constituidos por cadenas de elementos tetraédricos y octaédricos (el ión silicio se encuentra en el centro de cada una de estas estructuras)” (González de Vallejo,

Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002). Se ha descartado los componentes cuyo porcentaje representa menos del 1% de la totalidad de la composición del material.

4.3 Ensayo edométrico

En los puntos de muestreo que representan a los cuatro sectores se realizó el ensayo de consolidación conforme la norma ASTM D - 2435 obteniendo los parámetros detallados en la tabla 8. Además se determinó el Módulo de Young mediante una correlación pues su valor es indispensable para el cálculo de los asentamientos.

Tabla 8: Parámetros específicos de cada sector

Parámetros Obtenidos	Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4
Ubicación	Prouvi	Colinas Lojanas	Ciudad Victoria	Carigan
Código	L - 02	L - 04	L - 07	L - 11
% de Material que pasa el tamiz 200	92	88	91	89
Límite líquido, LL	39	93	93	84
Límite plástico, LP	22	43	37	30
Índice plástico, IP	17	50	56	54
Índice de grupo, IG	17	54	61	33
Tipo de suelo de acuerdo al SUCS	CL	MH	CH	CH
Índice de Compresión, C_c	0.1123	0.0948	0.7357	0.3634
Índice de Expansión, C_s	0.0239	0.0135	0.0273	0.0233
Índice de Consolidación, C_v (cm ² /min)	0.0026	0.0071	0.0005	0.0006
Índice de Consistencia, IC	1.4711	1.6024	0.8012	0.9752
Coefficiente de permeabilidad hidráulica, k (cm/min)	3.05E-08	8.18E-08	2.25E-08	2.66E-08
Presión de pre-consolidación (kg/cm ²)	2.850	1.550	1.500	1.100
Presión de sobrecarga efectiva in situ (kg/cm ²)	0.429	0.520	0.162	0.164
Relación de sobre consolidación, OCR	6.638	2.982	9.252	6.697
Resistencia cortante no drenada, C_u (kg/cm ²)	1.952	1.246	0.961	0.752
Módulo de Young, E_s (MPa)	77.366	29.519	4.873	6.236
Consistencia, en base al índice de consistencia (IC)	Firme	Muy Firme	Media	Media
Consistencia, en base al módulo de Young (E_s)	Dura	Muy Firme	Blanda	Media


Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

4.4 Cálculo de asentamientos

Posterior al análisis de los resultados de los ensayos de laboratorio se procedió a realizar una hoja de cálculo que consta con los parámetros de los cuatro sectores de este trabajo, esta hoja permite la determinación de los asentamientos totales para zapatas aisladas, y aunque

no fue objeto de esta investigación, esta hoja también sirve para zapatas corridas y losas de cimentación. Se programó la hoja de tal manera que al usuario no se le complique su uso, es así que para utilizarla se requiere solamente de datos esenciales, en la figura 20 se muestra su interfaz y los datos de entrada.



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS TOTALES

Datos de entrada

Geometría de cimentación	Carga sobre la cimentación	Características del terreno
Lugar: Colinas Lojanas	Carga: $P = 176.00 \text{ kN}$	Espesor de estr. $H = 8.00 \text{ m}$
Largo: $L = 1.20 \text{ m}$	Carga por área: $q_0 = 122.2 \text{ kN/m}^2$	C. Poisson: $\nu = 0.50$
Ancho: $B = 1.20 \text{ m}$	Prof. Cimen: $D_f = 1.50 \text{ m}$	Datos de la capa de mejoramiento
		$z = 0.00 \text{ m}$

Asentamineto Total Cimentación Flexible	42.052 mm	
Asentamineto Total Cimentación Rígida	41.839 mm	Grabar

Figura 20: Interfaz de la hoja de cálculo de asentamientos.

Fuente: El autor.

Elaboración: El Autor

Para el uso de esta hoja se requiere conocer la geometría de la cimentación ($B \times L$), la carga aplicada (P), la profundidad de cimentación (D_f) y el espesor del estrato bajo la cimentación (H), adicionalmente dependiendo del grado de saturación del suelo se ha colocado el coeficiente de Poisson, siendo 0.4 su valor recomendado, en la tabla 4 se dan más valores de este coeficiente. Finalmente en caso que los requerimientos de la obra así lo solicitasen, se ha tomado en cuenta una capa de mejoramiento cuyo espesor depende solamente de la tolerancia de los asentamientos.

Con la finalidad de evaluar el comportamiento de las arcillas estudiadas, se ha planteado dos casos de estudio aplicados a los cuatro sectores analizados en este trabajo.

4.4.1 Ejemplo de cálculo, caso I:

Se ha proyectado construir en el sector de Colinas Lojanas una vivienda de tres plantas altas como se detalla en la figura 21; la planta baja, primera y segunda planta alta serán ocupadas como vivienda unifamiliar, la tercera planta alta quedará como terraza compartida. Se plantea un sistema de zapatas aisladas para la cimentación. La construcción ocupará 10m de largo por 10m de ancho y sus columnas están distribuidas como se muestra en la figura 22.

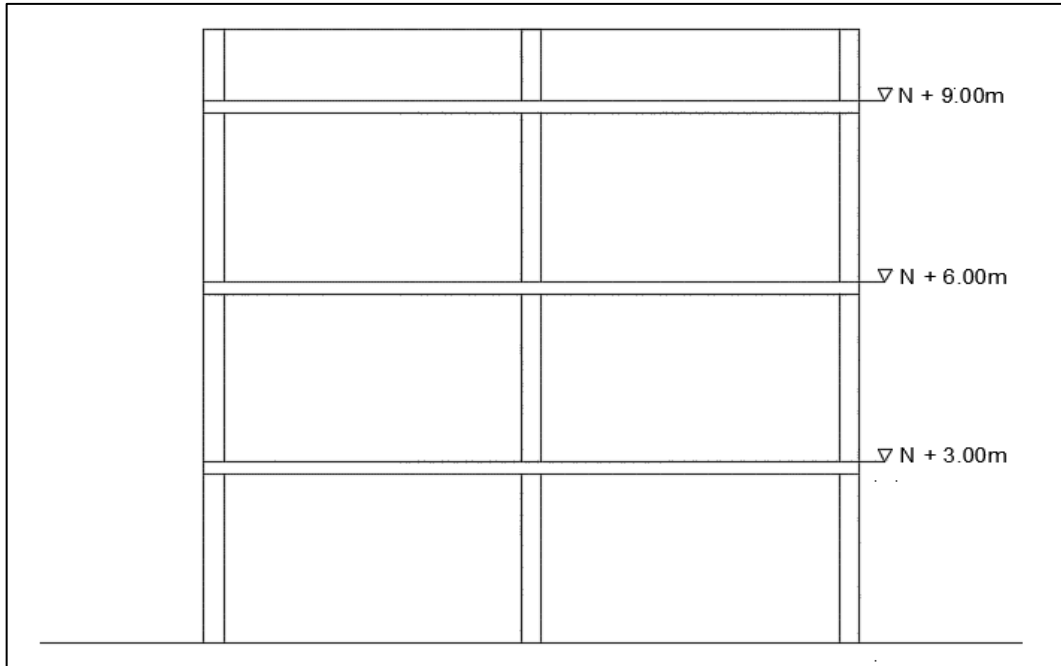


Figura 21: Ejemplo de cálculo, elevación del caso en estudio.
 Fuente: El autor
 Elaboración: El Autor

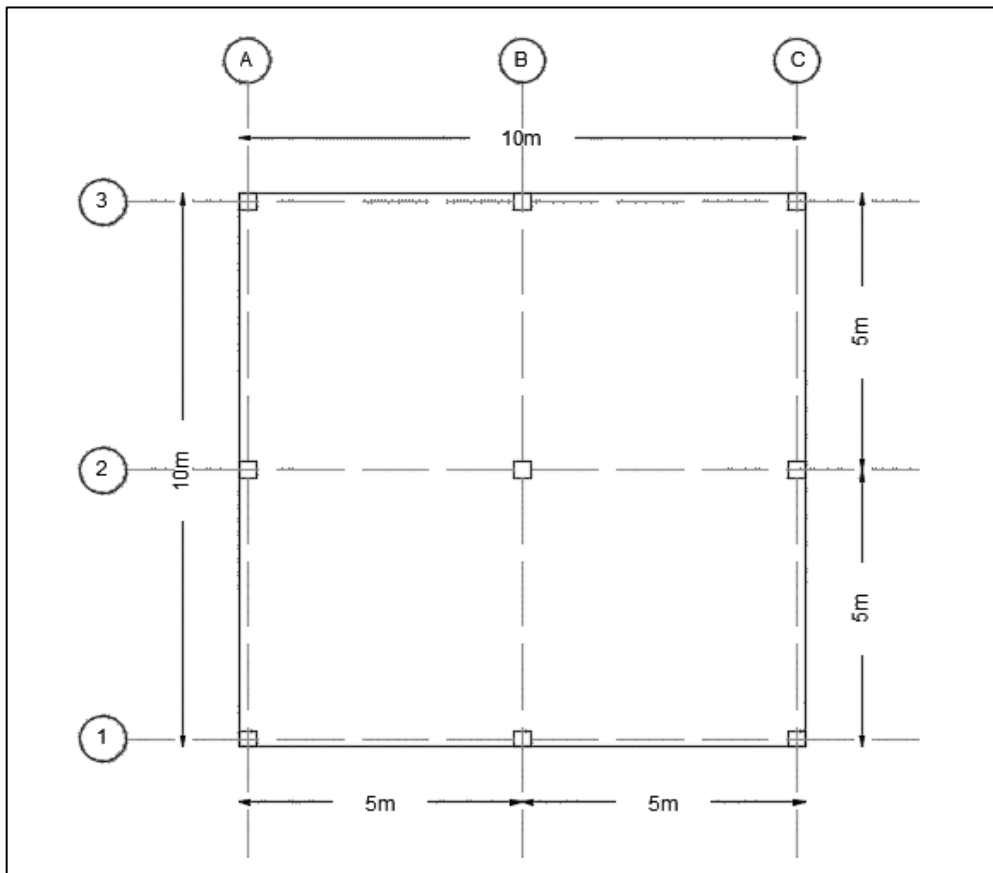


Figura 22: Ejemplo de cálculo, distribución de las columnas.
 Fuente: El autor
 Elaboración: El Autor

Del estudio geotécnico se determinó un espesor de 8 metros del estrato de arcilla y que el nivel freático se encuentra a una profundidad que afecta directamente al asentamiento, así que es necesario tomarlo en cuenta. Determinar el asentamiento producido por la estructura si la profundidad de la cimentación es 1.5m, el peso de la arcilla en condiciones naturales es 16.998 KN/m^3 y su peso saturado es 17.576 KN/m^3 , el nivel freático se encuentra a la misma profundidad de cimentación.

Para el cálculo de asentamientos se necesita estimar la carga que la estructura transmite al terreno. Teniendo en cuenta que este ejemplo lo que intenta es evaluar el comportamiento de las arcillas, se hará una estimación superficial de las cargas y se aplicará la combinación de cargas más crítica para esta construcción.

Determinación de las cargas:

La carga viva para viviendas unifamiliares según la NEC15 SE-CG es de 2 KN/m^2 . La carga viva para la terraza según la misma norma es 1 KN/m^2 .

La carga muerta se la determina sumando la carga de diferentes elementos. Las paredes, según la NEC15 SE-CG, tienen una carga mínima de 2 KN/m^2 , el contrapiso de hormigón simple tiene para cada centímetro de espesor 0.22 KN/m^2 y suponiendo 3cm de espesor se tiene una carga distribuida de 0.66 KN/m^2 , el cielo raso de yeso sobre listones de madera tiene 0.20 KN/m^2 . La suma de estos elementos da 2.86 KN/m^2 la cual es la carga muerta adicional al peso propio de la estructura.

La estructura se proyectó con hormigón armado y tiene una losa en dos direcciones de 20cm de espesor alivianada con bloques y nervios de 10cm de espesor cada 50cm, columnas de 35cm x 35cm y las vigas propuestas son vigas descolgadas de 25cm de ancho y 35cm de peralte. Realizando el cálculo del volumen de la losa alivianada y el volumen del hormigón armado se tiene una carga distribuida debido al peso propio de 2.73 KN/m^2 .

Por la disposición de las columnas según la figura 23, se tiene tres diferentes áreas de aporte de carga, las columnas A1, A3, C1 y C3 tienen un área de aporte de 6.25 m^2 , las columnas A2, B1, B3 y C2 tienen un área de aporte de 12.5 m^2 , mientras que la columna B2 tiene un área diferente a las otras, la cual es de 25 m^2 .

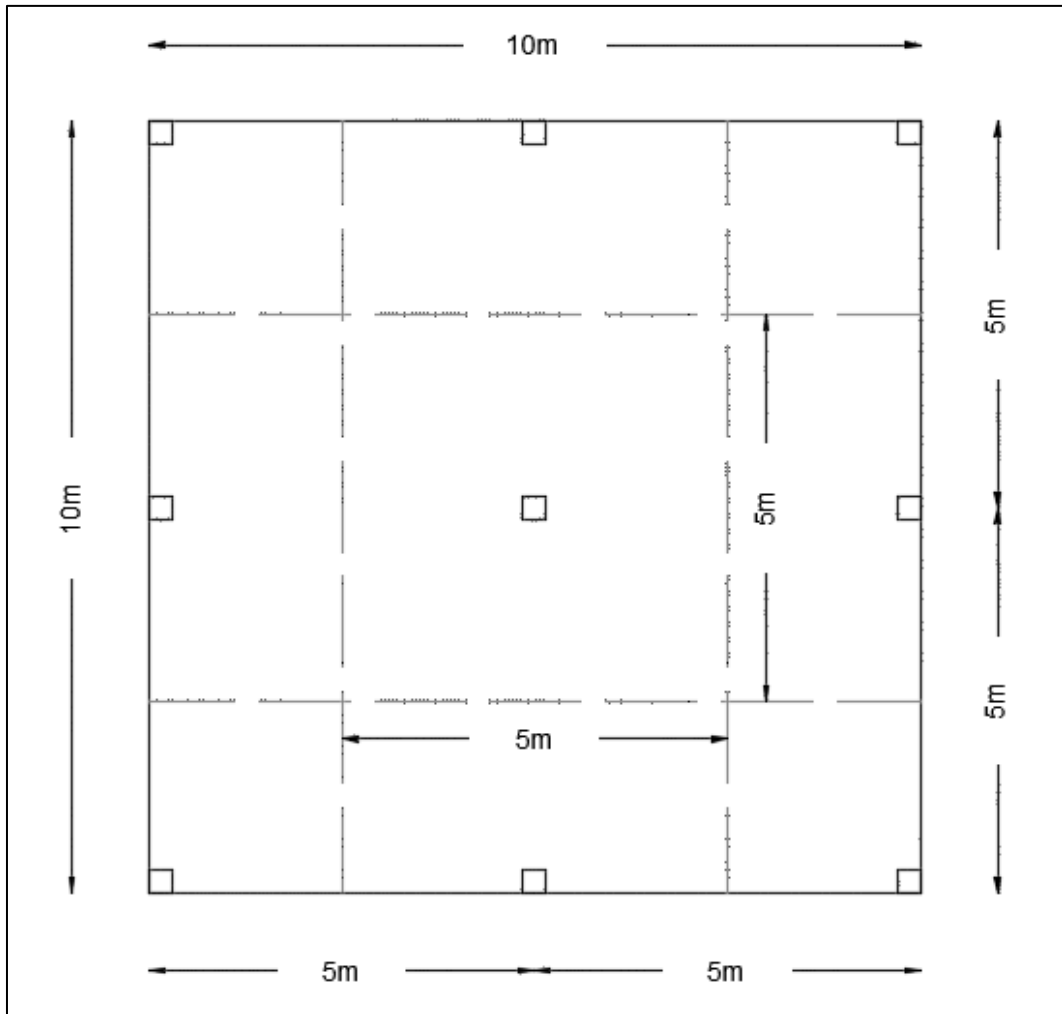


Figura 23: Ejemplo de cálculo, áreas de aporte de cargas a las columnas.
 Fuente: El autor
 Elaboración: El Autor

Después de aplicar la combinación de carga $1.2D + 1.6L$, se tiene la carga transmitida por cada columna a sus respectivas zapatas como se especifica en la tabla 9:

Tabla 9: Cargas aplicadas a cada columna

Columna	Carga (KN)
A1, A3, C1, C3	176
A2, B1, B3, C2	352
B2	704

Fuente: El autor
 Elaboración: El Autor

El cálculo del asentamiento se hará para la columna B2. La columna está sometida a una carga de 704 KN y la zapata que soporta esta carga es de 2m X 2m, la carga unitaria por lo tanto es $q_o = 176 \frac{KN}{m^2}$

- Para determinar los asentamientos se necesita el esfuerzo promedio para lo cual se calcula los esfuerzos en $H = 8$, $H = 4$ y $H = 0$; el valor de H se cuenta desde el fondo de la zapata, tal como se muestra en la figura 24.

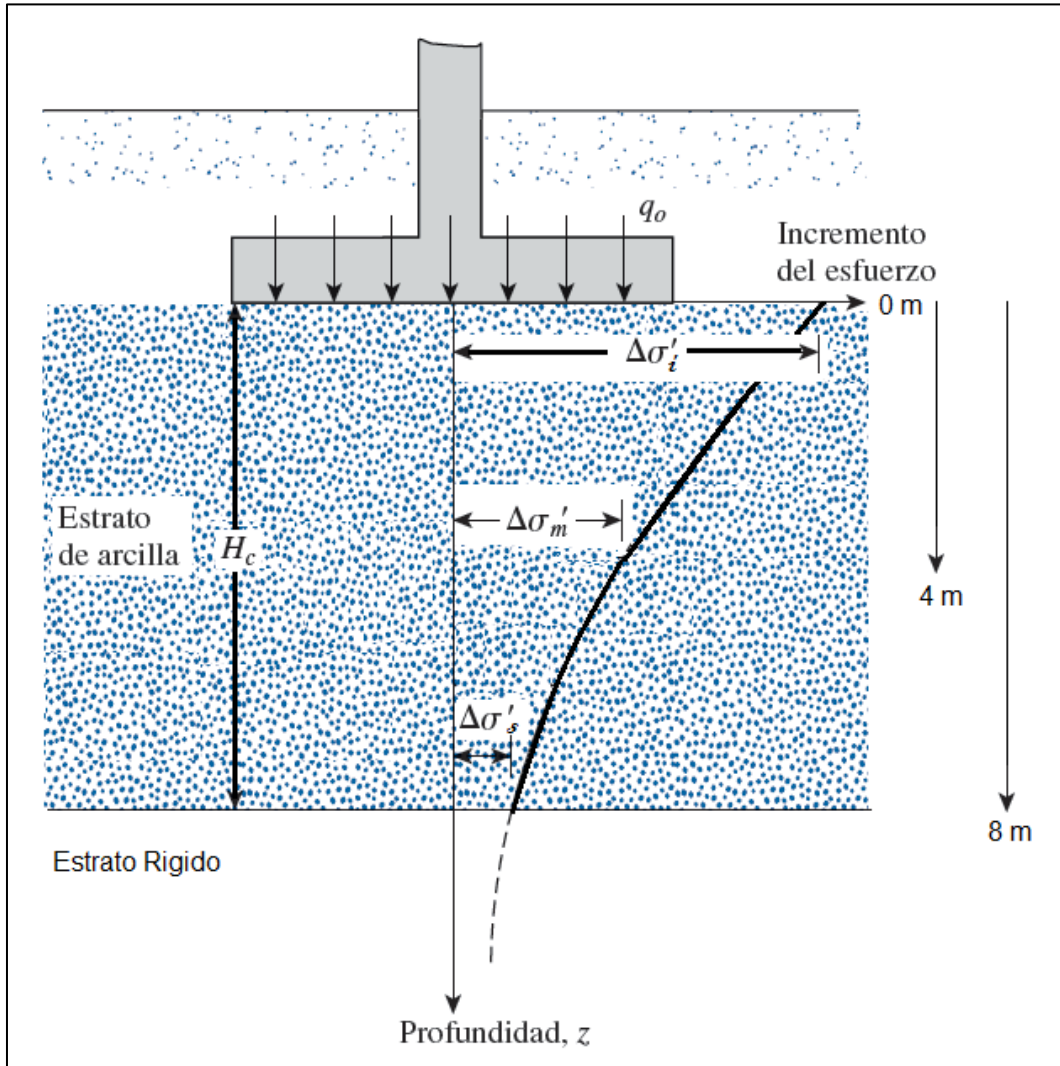


Figura 24: Ejemplo de cálculo, representación de las zapatas del caso de estudio I

Fuente: El autor

Elaboración: El Autor

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

- Para $H = 8m$

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

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

$$I_c = \frac{2}{\pi} \left(\frac{1 \times 8}{\sqrt{1^2 + 8^2 + 1}} x \frac{1^2 + 2 \times 8^2 + 1}{(1 + 8^2)(1^2 + 8^2)} + \text{sen}^{-1} \frac{1}{\sqrt{1^2 + 8^2} \sqrt{1 + 8^2}} \right) = 0.0291$$

$$\Delta\sigma_s = q_o I_c = 176 \frac{kN}{m^2} \times 0.0291 = 5.12 \frac{kN}{m^2}$$

- Para H = 4m

$$m_1 = \frac{L}{B} = \frac{2m}{2m} = 1 \quad ; \quad n_1 = \frac{H}{\left(\frac{B}{2}\right)} = \frac{4m}{\left(\frac{2}{2}m\right)} = 4$$

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

$$I_c = \frac{2}{\pi} \left(\frac{1 \times 4}{\sqrt{1^2 + 4^2 + 1}} x \frac{1^2 + 2 \times 4^2 + 1}{(1 + 4^2)(1^2 + 4^2)} + \text{sen}^{-1} \frac{1}{\sqrt{1^2 + 4^2} \sqrt{1 + 4^2}} \right) = 0.1081$$

$$\Delta\sigma_m = q_o I_c = 176 \frac{kN}{m^2} \times 0.1081 = 19.02 \frac{kN}{m^2}$$

- Para H = 0m

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

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

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

$$\Delta\sigma_i = q_o I_c = 176 \frac{kN}{m^2} \times 1 = 176 \frac{kN}{m^2}$$

Finalmente se calcula el esfuerzo promedio con la siguiente ponderación:

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

$$\Delta\sigma_{prom} = \frac{1}{6}\left(5.12 \frac{kN}{m^2} + 4 \times 19.02 \frac{kN}{m^2} + 176 \frac{kN}{m^2}\right) = 42.87 \frac{kN}{m^2}$$

- Asentamiento elástico o inmediato

Para determinar el asentamiento inmediato se lo hará mediante dos métodos y se seleccionará el valor que resulte más elevado.

- Método de Janbú y colaboradores (1956)

$$\frac{D_f}{B} = \frac{1.5m}{2m} = 1.6 \rightarrow A_1 = 0.6290$$

$$\frac{H}{B} = \frac{8m}{2m} = 4 \wedge \frac{L}{B} = \frac{2m}{2m} = 1 \rightarrow A_2 = 0.9328$$

$$S_e = A_1 \cdot A_2 \frac{q_o \cdot B}{E_s} = 0.629 \times 0.9328 \times \frac{176 \frac{kN}{m^2} \cdot 2m}{29.52 \times 10^3 \frac{kN}{m^2}} = 6.9962mm$$

- Método basado en la teoría de la elasticidad

$$\alpha = 4$$

$$m' = \frac{L}{B} = \frac{2m}{2m} = 1$$

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

$$A_0 = m' \ln \frac{(1 + \sqrt{m'^2 + 1})\sqrt{m'^2 + n'^2}}{m'(1 + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1})} = 1 \times \ln \frac{(1 + \sqrt{1^2 + 1})\sqrt{1^2 + 8^2}}{1 \times (1 + \sqrt{1^2 + 8^2 + 1})} = 0.7577$$

$$A_1 = \ln \frac{(m' + \sqrt{m'^2 + 1})\sqrt{1 + n'^2}}{m' + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}} = \ln \frac{(1 + \sqrt{1^2 + 1})\sqrt{1 + 8^2}}{1 + \sqrt{1^2 + 8^2 + 1}} = 0.7577$$

$$A_2 = \frac{m'}{n'\sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}} = \frac{1}{8 \times \sqrt{1 + 8^2 + 1}} = 0.0154$$

$$F_1 = \frac{A_0 + A_1}{\pi} = \frac{0.7577 + 0.7577}{\pi} = 0.482$$

$$F_2 = \frac{n' \cdot \text{Arctan}(A_2)}{2\pi} = \frac{8 \times \text{Arctan}(0.0154)}{2\pi} = 0.020$$

$$I_s = F_1 + \frac{1 - 2u_s}{1 - u_s} F_2 = 0.482 + \frac{1 - 2 \times 0.5}{1 - 0.5} \times 0.020 = 0.482$$

$$\frac{D_f}{B} = \frac{1.5m}{2m} = 0.75 \wedge \frac{L}{B} = \frac{2m}{2m} = 1 \wedge u_s = 0.5 \rightarrow I_f = 0.7825$$

$$S_e = q_o \cdot (\alpha \cdot B') \frac{1 - u_s^2}{E_s} I_s I_f = 176 \frac{KN}{m^2} \cdot (4 \times 0.5 \times 2m) \frac{1 - 0.5^2}{29.52 \times 10^3 \frac{K}{m^2}} \times 0.482 \times 0.7825$$

$$S_e = 6.746mm$$

Del resultado de los dos métodos anteriores se tomará el mayor valor, es así que:

$$S_e = 6.9962mm$$

- Asentamiento por consolidación primaria

Para el sector de construcción se tiene un OCR de 2.98, lo que implica que se trata de un suelo sobre consolidado, la presión de sobrecarga efectiva se calcula con:

$$\sigma'_o (KN/m^2) = D_f \cdot \gamma + \frac{1}{2} H_c (\gamma_{sat} - \gamma_w)$$

$$\sigma'_o (KN/m^2) = (1.5m) \left(16.998 \frac{KN}{m^3} \right) + \frac{1}{2} (8m) \left(17.576 \frac{KN}{m^3} - 9.81 \frac{KN}{m^3} \right)$$

$$\sigma'_o = 56.560 \text{ KN/m}^2$$

Se cumple que:

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

$$56.560 \text{ KN/m}^2 + 42.87 \text{ KN/m}^2 \leq 152.06 \text{ KN/m}^2$$

$$99.430 \text{ KN/m}^2 \leq 152.06 \text{ KN/m}^2$$

Por lo tanto se aplica:

$$S_{c(p)} = \frac{C_s H_c}{1 + e_o} \log\left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'_{prom}}{\sigma'_o}\right)$$

$$S_{c(p)} = \frac{0.0135 \times 8m}{1 + 0.54} \log\left(\frac{56.56 \text{ KN/m}^2 + 42.87 \text{ KN/m}^2}{56.56 \text{ KN/m}^2}\right) = 17.18mm$$

- Cálculo de asentamientos por consolidación secundaria:

Para arcilla sobre-consolidada con $\sigma'_o + \Delta\sigma_{prom} \leq \sigma'_c$ se tiene que:

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

$$\Delta e = 0.0135 \times \log\left(\frac{56.56 \text{ KN/m}^2 + 42.87 \text{ KN/m}^2}{56.56 \text{ KN/m}^2}\right) = 0.00331$$

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\log(t_2/t_1)} = \frac{0.00578}{\log(25\text{años}/1\text{año})} = 0.00237$$

$$e_p = e_o - \Delta e$$

$$e_p = 0.5376 - 0.00331$$

$$e_p = 0.5343$$

$$C'_\alpha = \frac{C_\alpha}{1 + e_p} = \frac{0.00237}{1 + 0.5343} = 0.00154$$

$$S_{c(s)} = 0.00154 \times 8m \times \log\left(\frac{25\text{años}}{1\text{año}}\right) = 17.25mm$$

El cálculo del asentamiento total se obtiene sumando el asentamiento instantáneo y por consolidación primaria y secundaria.

$$S_{T(F)} = S_e + S_{c(p)} + S_{c(s)}$$

$$S_{T(F)} = 7.00mm + 17.18mm + 17.25mm = 41.43mm$$

Este valor es aplicable para zapatas flexibles, para el caso de zapatas rígidas se tiene:

$$S_{T(R)} \approx 0.93 \times S_e + S_{c(p)} + S_{c(s)}$$

$$S_{T(R)} \approx 0.93 \times 7.00mm + 17.18mm + 17.25mm = 40.94mm$$

Ahora, realizando el mismo cálculo en la hoja electrónica, se tiene los siguientes valores:

$$S_{T(F)} = 41.42mm$$

$$S_{T(R)} = 40.93mm$$

El asentamiento obtenido mediante la hoja de cálculo es diferente al obtenido manualmente pues algunos factores en el cálculo manual fueron obtenidos mediante interpolaciones, mientras que en la hoja de cálculo todos los parámetros necesarios se los obtuvo mediante funciones.

Este mismo proceso se aplica a las otras zapatas con área de aporte de cargas diferente a la anterior calculada. En la tabla 10 se muestra, para los sectores comprendidos en esta investigación, los valores obtenidos de la hoja de cálculo para las nueve zapatas que soportan

la estructura. En la tabla 11, se muestran los asentamientos que se obtienen suponiendo que las zapatas son rígidas.

Tabla 10: Asentamientos totales del caso de ejemplo I para cimentaciones flexibles.

Ubicación	Carga Q (KN)	Dimensión (L x B)	Prouarvi	Colinas Lojanas	Ciudad Victoria	Carigan
A1, A3, C1, C3	176.00	1.20 x 1.20	29.18	24.59	38.20	42.03
A2, B1, B3, C2	352.00	2.00 x 1.00	41.88	35.14	56.96	61.46
B2	704.00	2.00 x 2.00	48.52	41.42	73.51	76.63

* S_r Cimentaciones flexibles (mm)

Fuente: El autor.

Elaboración: El Autor

Tabla 11: Asentamientos totales del caso de ejemplo I para cimentaciones rígidas.

Ubicación	Carga Q (KN)	Dimensión (L x B)	Prouarvi	Colinas Lojanas	Ciudad Victoria	Carigan
A1, A3, C1, C3	176.00	1.20 x 1.20	29.10	24.38	36.91	41.02
A2, B1, B3, C2	352.00	2.00 x 1.00	41.75	34.80	54.90	59.85
B2	704.00	2.00 x 2.00	48.33	40.93	70.54	74.31

* S_r Cimentaciones rígidas (mm).

Fuente: El autor.

Elaboración: El Autor

La normativa ecuatoriana NEC15 SE-CG es permisible en el caso de los asentamientos totales, pues si la estructura se asienta uniformemente ésta no sufrirá deformaciones que pongan en riesgo su estabilidad; sin embargo, para el caso de los asentamientos diferenciales la misma normativa establece que éstos no deben ser mayores a $L/500$ para edificaciones con muros de carga de concreto o en mampostería, siendo L el claro entre columnas.

Los asentamientos diferenciales son la resta entre los asentamientos totales de dos zapatas, éstos son más peligrosos que los totales y cuando se diseña se busca minimizar su valor pues ponen en riesgo la estructura de la obra. En este ejemplo su valor permitido es $5\text{m}/500$, esto es 10mm, en la tabla 12 se presentan los asentamientos diferenciales correspondientes a las columnas B1-B2.

Tabla 12: Asentamiento diferencial en mm, columnas B1-B2 del caso de ejemplo I

Sector	Cimentación Flexible	Cimentación Rígida
PROURVI	6.64	6.58
Colinas Lojanas	6.28	6.13
Ciudad Victoria	16.55	15.64
Carigan	15.17	14.46

Fuente: El autor.

Elaboración: El Autor

Los asentamientos totales obtenidos para la estructura planteada se encuentran en los límites permitidos por la normativa ecuatoriana NEC15 SE-CG. Más no es el caso de los asentamientos diferenciales, se requiere un límite menor de éstos asentamientos por lo que se propone alternativas como un sistema de cimentación más sofisticado basado zapatas continuas o una capa de mejoramiento con un espesor tal que mantenga los asentamientos diferenciales dentro de los límites establecidos en la normativa.

4.4.2 Ejemplo de cálculo, caso II:

Se calculará los asentamientos para el mismo ejemplo del caso anterior pero esta vez suponiendo que existe un estrato de arena de 2.5m comprendido desde el ras del terreno hasta el estrato de arcilla, tal como se detalla en la figura 24. El peso específico seco de la arena es 16.7 KN/m^3 y el peso específico saturado de la misma 17.8 KN/m^3 .

El cálculo del asentamiento se hará para la columna B2. La columna está sometida a una carga de 704 KN y la zapata que soporta esta carga es de 2m X 2m, la carga unitaria por lo tanto es $q_o = 176 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$

- Para determinar los asentamientos se necesita el esfuerzo promedio en el estrato de arcilla, para lo cual se calcula los esfuerzos en $H = 7.00\text{m}$, $H = 3.50\text{m}$ y $H = 0\text{m}$; el valor de H se cuenta desde el fin del estrato de arena, tal como se muestra en la figura 25, Z representa la distancia comprendida desde el fondo de la cimentación hasta el inicio del estrato de arcilla.

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

- Para $H = 7.00 \text{ m}$

$$m_1 = \frac{L}{B} = \frac{2\text{m}}{2\text{m}} = 1 \quad ; \quad n_1 = \frac{Z + H_c}{\left(\frac{B}{2}\right)} = \frac{1\text{m} + 7\text{m}}{\left(\frac{2}{2}\text{m}\right)} = 8$$

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

$$I_c = \frac{2}{\pi} \left(\frac{1 \times 8}{\sqrt{1^2 + 8^2 + 1}} \times \frac{1^2 + 2 \times 8^2 + 1}{(1 + 8^2)(1^2 + 8^2)} + \text{sen}^{-1} \frac{1}{\sqrt{1^2 + 8^2} \sqrt{1 + 8^2}} \right) = 0.0291$$

$$\Delta\sigma_s = q_o I_c = 176 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 0.0291 = 5.12 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

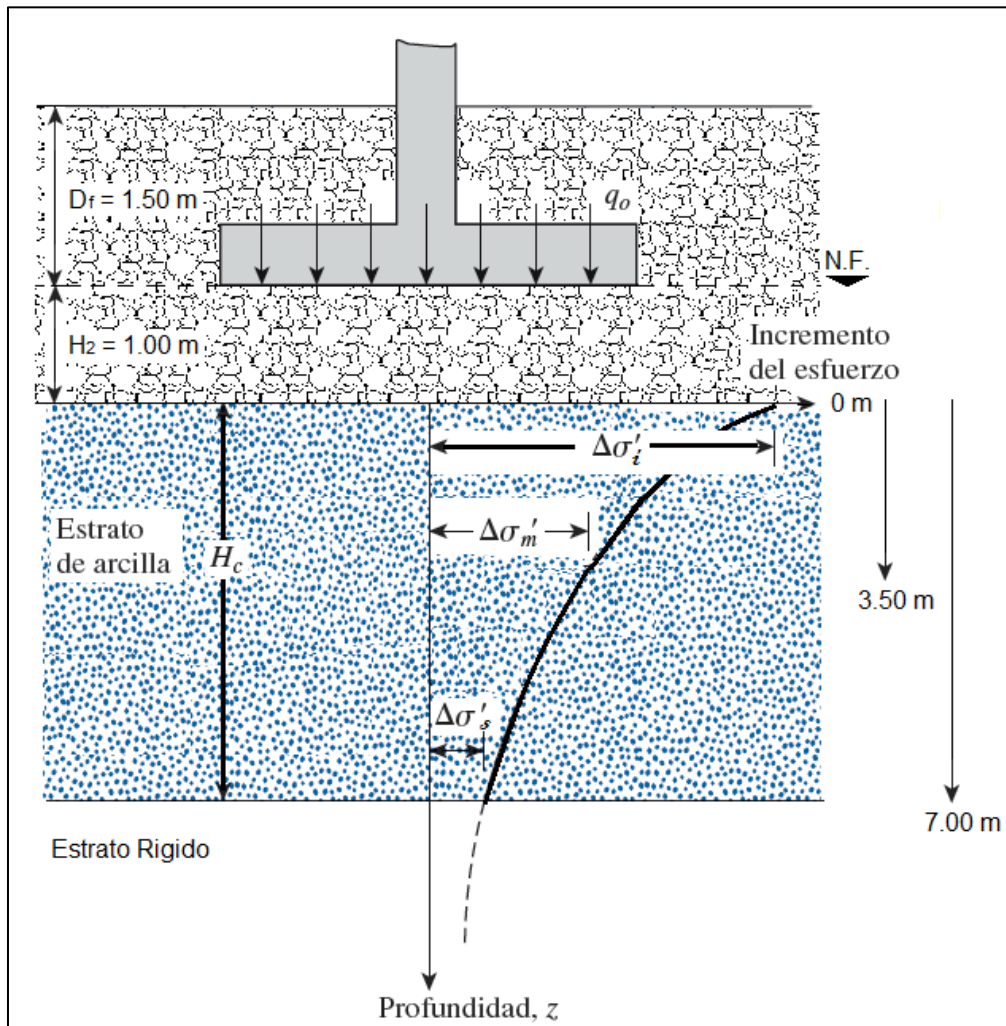


Figura 25: Ejemplo de cálculo, representación de las zapatas con mejoramiento.

Fuente: El autor

Elaboración: El Autor

- Para $H = 3.50 \text{ m}$

$$m_1 = \frac{L}{B} = \frac{2m}{2m} = 1 \quad ; \quad n_1 = \frac{Z + H}{\left(\frac{B}{2}\right)} = \frac{1m + 3.5m}{\left(\frac{2}{2}m\right)} = 4.50$$

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

$$I_c = \frac{2}{\pi} \left(\frac{1 \times 4.50}{\sqrt{1^2 + 4.50^2 + 1}} \times \frac{1^2 + 2 \times 4.50^2 + 1}{(1 + 4.50^2)(1^2 + 4.50^2)} + \text{sen}^{-1} \frac{1}{\sqrt{1^2 + 4.50^2} \sqrt{1 + 4.50^2}} \right) = 0.0871$$

$$\Delta\sigma_m = q_o I_c = 176 \frac{kN}{m^2} \times 0.0661 = 15.33 \frac{kN}{m^2}$$

- Para H = 0.00 m

$$m_1 = \frac{L}{B} = \frac{2m}{2m} = 1 \quad ; \quad n_1 = \frac{Z + H}{\left(\frac{B}{2}\right)} = \frac{1m}{\left(\frac{2}{2}m\right)} = 1.00$$

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

$$I_c = \frac{2}{\pi} \left(\frac{1 \times 1}{\sqrt{1^2 + 1^2 + 1}} \times \frac{1^2 + 2 \times 1^2 + 1}{(1 + 1^2)(1^2 + 1^2)} + \text{sen}^{-1} \frac{1}{\sqrt{1^2 + 1^2} \sqrt{1 + 1^2}} \right) = 0.7009$$

$$\Delta\sigma_i = q_o I_c = 176 \frac{kN}{m^2} \times 0.70089 = 123.36 \frac{kN}{m^2}$$

Finalmente se calcula el esfuerzo promedio con la siguiente ponderación:

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

$$\Delta\sigma_{prom} = \frac{1}{6} \left(5.12 \frac{kN}{m^2} + 4 \times 15.33 \frac{kN}{m^2} + 123.36 \frac{kN}{m^2} \right) = 31.64 \frac{kN}{m^2}$$

- Asentamiento elástico o inmediato

Para determinar el asentamiento inmediato se lo hará mediante dos métodos y se seleccionará el valor que resulte más elevado.

- Método de Janbú y colaboradores (1956)

$$\frac{D_f}{B} = \frac{1.5m}{2m} = 1.6 \rightarrow A_1 = 0.6290$$

$$\frac{Z + H_c}{B} = \frac{8m}{2m} = 4 \wedge \frac{L}{B} = \frac{2m}{2m} = 1 \rightarrow A_2 = 0.9328$$

$$S_e = A_1 \cdot A_2 \frac{q_o \cdot B}{E_s} = 0.629 \times 0.9328 \times \frac{176 \frac{KN}{m^2} \cdot 2m}{29.52 \times 10^3 \frac{KN}{m^2}} = 6.9962mm$$

- Método basado en la teoría de la elasticidad

$$\alpha = 4$$

$$m' = \frac{L}{B} = \frac{2m}{2m} = 1$$

$$n' = \frac{2(Z + H_c)}{B} = \frac{2 \times 8m}{2m} = 8$$

$$A_0 = m' \ln \frac{(1 + \sqrt{m'^2 + 1}) \sqrt{m'^2 + n'^2}}{m'(1 + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1})} = 1 \times \ln \frac{(1 + \sqrt{1^2 + 1}) \sqrt{1^2 + 8^2}}{1 \times (1 + \sqrt{1^2 + 8^2 + 1})} = 0.7577$$

$$A_1 = \ln \frac{(m' + \sqrt{m'^2 + 1}) \sqrt{1 + n'^2}}{m' + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}} = \ln \frac{(1 + \sqrt{1^2 + 1}) \sqrt{1 + 8^2}}{1 + \sqrt{1^2 + 8^2 + 1}} = 0.7577$$

$$A_2 = \frac{m'}{n' \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}} = \frac{1}{8 \times \sqrt{1 + 8^2 + 1}} = 0.0154$$

$$F_1 = \frac{A_0 + A_1}{\pi} = \frac{0.7577 + 0.7577}{\pi} = 0.482$$

$$F_2 = \frac{n' \cdot \text{Arctan}(A_2)}{2\pi} = \frac{8 \times \text{Arctan}(0.0154)}{2\pi} = 0.020$$

$$I_s = F_1 + \frac{1 - 2u_s}{1 - u_s} F_2 = 0.482 + \frac{1 - 2 \times 0.5}{1 - 0.5} \times 0.020 = 0.482$$

$$\frac{D_f}{B} = \frac{1.5m}{2m} = 0.75 \wedge \frac{L}{B} = \frac{2m}{2m} = 1 \wedge u_s = 0.5 \rightarrow I_f = 0.7825$$

$$S_e = q_o \cdot (\alpha \cdot B') \frac{1 - u_s^2}{E_s} I_s I_f = 176 \frac{KN}{m^2} \cdot (4 \times 0.5 \times 2m) \frac{1 - 0.5^2}{29.52 \times 10^3 \frac{KN}{m^2}} \times 0.482 \times 0.7825$$

$$S_e = 6.746mm$$

Del resultado de los dos métodos anteriores se tomará el mayor valor, es así que:

$$S_e = 6.9962mm$$

- Asentamiento por consolidación primaria

Para el sector de construcción se tiene un OCR de 2.98, lo que implica que se trata de un suelo sobre consolidado, la presión de sobrecarga efectiva se calcula con:

$$\sigma'_o (KN/m^2) = D_f \cdot \gamma + H_2 (\gamma_{sat} - \gamma_w) + \frac{1}{2} H_c (\gamma_{sat} - \gamma_w)$$

$$\sigma'_o (KN/m^2) = 1.5m \times \left(16.7 \frac{KN}{m^3}\right) + 1m \times \left(17.8 \frac{KN}{m^3} - 9.81 \frac{KN}{m^3}\right) + \frac{7m}{2} \left(17.576 \frac{KN}{m^3} - 9.81 \frac{KN}{m^3}\right)$$

$$\sigma'_o = 60.221 KN/m^2$$

Se cumple que:

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

$$60.22 KN/m^2 + 31.64 KN/m^2 \leq 152.06 KN/m^2$$

$$91.86 KN/m^2 \leq 152.06 KN/m^2$$

Por lo tanto se aplica:

$$S_{c(p)} = \frac{C_s H_c}{1 + e_o} \log \left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'_{prom}}{\sigma'_o} \right)$$

$$S_{c(p)} = \frac{0.0135 \times 7m}{1 + 0.54} \log \left(\frac{60.22 KN/m^2 + 31.64 KN/m^2}{60.22 KN/m^2} \right) = 11.25mm$$

- Cálculo de asentamientos por consolidación secundaria:

Para arcilla sobre-consolidada con $\sigma'_o + \Delta\sigma_{prom} \leq \sigma'_c$ se tiene que:

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

$$\Delta e = 0.0135 \times \log\left(\frac{60.22 \text{ KN/m}^2 + 31.64 \text{ KN/m}^2}{60.22 \text{ KN/m}^2}\right) = 0.00248$$

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\log(t_2/t_1)} = \frac{0.00248}{\log(25\text{años}/1\text{año})} = 0.00177$$

$$e_p = e_o - \Delta e$$

$$e_p = 0.5376 - 0.00248$$

$$e_p = 0.5351$$

$$C'_\alpha = \frac{C_\alpha}{1 + e_p} = \frac{0.00177}{1 + 0.5351} = 0.00115$$

$$S_{c(s)} = 0.00115 \times 7m \times \log\left(\frac{25\text{años}}{1\text{año}}\right) = 11.28mm$$

El cálculo del asentamiento total se obtiene sumando el asentamiento instantáneo y por consolidación primaria y secundaria.

$$S_{T(F)} = S_e + S_{c(p)} + S_{c(s)}$$

$$S_{T(F)} = 7.00mm + 11.25mm + 11.28mm = 29.53mm$$

Este valor es aplicable para zapatas flexibles, para el caso de zapatas rígidas se tiene:

$$S_{T(R)} \approx 0.93 \times S_e + S_{c(p)} + S_{c(s)}$$

$$S_{T(R)} \approx 0.93 \times 7.00mm + 30.04mm + 30.20mm = 29.04mm$$

Ahora, realizando el mismo cálculo en la hoja electrónica que se ha obtenido como resultado de este trabajo de fin de titulación, se tiene los siguientes valores:

$$S_{T(F)} = 30.97mm$$

$$S_{T(R)} = 30.51mm$$

El asentamiento obtenido mediante la hoja de cálculo es diferente al obtenido manualmente pues algunos factores en el cálculo manual fueron obtenidos mediante interpolaciones, mientras que en la hoja de cálculo todos los parámetros necesarios se los obtuvo mediante funciones.

Este mismo proceso se aplica a las otras zapatas con área de aporte de cargas diferente a la anterior calculada. En la tabla 12 se muestra, para los sectores comprendidos en esta investigación, los valores obtenidos de la hoja de cálculo para las nueve zapatas que soportan la estructura. En la tabla 13, se muestran los asentamientos que se obtienen suponiendo que las zapatas son rígidas.

Tabla 13: Asentamientos totales del caso de ejemplo II para cimentaciones flexibles.

Ubicación	Carga Q (KN)	Dimensión (L x B)	Prouvi	Colinas Lojanas	Ciudad Victoria	Carigan
A1, A3, C1, C3	176.00	1.20 x 1.20	14.53	13.30	27.43	27.34
A2, B1, B3, C2	352.00	2.00 x 1.00	23.56	21.19	43.23	43.13
B2	704.00	2.00 x 2.00	35.27	30.97	61.78	61.90

* S_T Cimentaciones flexibles (mm)

Fuente: El autor.

Elaboración: El Autor

Tabla 14: Asentamientos totales del caso de ejemplo II para cimentaciones rígidas.

Ubicación	Carga Q (KN)	Dimensión (L x B)	Prouvi	Colinas Lojanas	Ciudad Victoria	Carigan
A1, A3, C1, C3	176.00	1.20 x 1.20	14.45	13.09	26.17	26.35
A2, B1, B3, C2	352.00	2.00 x 1.00	23.44	20.87	41.26	41.58
B2	704.00	2.00 x 2.00	35.09	30.51	58.99	59.72

* S_T Cimentaciones rígidas (mm).

Fuente: El autor.

Elaboración: El Autor

En la tabla 15 se presentan los asentamientos diferenciales correspondientes a las columnas B1-B2 cuyo valor permito es 10mm para este caso de ejemplo de cálculo (CASO II).

Tabla 15: Asentamiento diferencial en mm, columnas B1-B2 del caso de ejemplo II

Sector	Cimentación Flexible	Cimentación Rígida
PROURVI	11.71	11.65
Colinas Lojanas	9.78	9.64
Ciudad Victoria	18.55	17.73
Carigan	18.77	18.14

Fuente: El autor.

Elaboración: El Autor

Según la normativa ecuatoriana NEC15 SE-CG se requiere un límite menor de asentamientos diferenciales por lo que se propone alternativas como un sistema de cimentación más sofisticado basado zapatas continuas o una capa de mejoramiento con un espesor tal que mantenga los asentamientos diferenciales dentro de los límites establecidos en la normativa.

CONCLUSIONES

Culminada esta investigación y realizando el respectivo análisis de resultados se ha llegado a las conclusiones detalladas en los siguientes puntos:

- En la zona de estudio se ha establecido que los asentamientos no limitan la carga que se le puede aplicar al terreno de fundición, puesto que las construcciones son consideradas pequeñas y que la carga que éstas transmiten al suelo no producen asentamientos que sean necesarios tomar en cuenta. Más en esta investigación se ha podido determinar que la carga que se le puede aplicar a una zapata queda determinada no solo por la capacidad portante del suelo sino que también por la carga permisible debida a los asentamientos, puesto que en los cuatro sectores analizados se ha visto que aunque la carga aplicada sea menor que la capacidad portante permisible del terreno, esta misma carga produce asentamientos considerados peligrosos y que ponen en riesgo el sistema estructural de la obra.
- Analizados los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio y probando la hoja de cálculo haciendo variaciones del sector de construcción entre los cuatro analizados en este trabajo y manteniendo constantes los parámetros de geometría, carga, profundidad de cimentación y espesor del estrato, se determina que el suelo encontrado en el sector de Carigan es el más desfavorable para la construcción, seguido de Ciudad Victoria, Prouvi y finalmente por el sector de Colinas Lojanas, puesto que este último es el que menor magnitud de asentamientos presenta.
- Los asentamientos son directamente proporcionales al espesor del estrato de arcilla bajo la zapata. Aunque varios factores influyen directa o indirectamente en el asentamiento final, los parámetros cuya variación es muy sensible son el índice de compresión (C_c) y el índice de expansión o recompresión (C_s), estos dos factores son directamente proporcionales a los asentamientos.
- Las arcillas de los cuatro sectores analizados tienen relaciones de sobre consolidación (OCR) mayores a 1 lo que implica que son suelos sobre consolidados que durante su historia geológica se han encontrado sometidos a presiones mayores que las que actualmente soportan.

- Los límites de Atterberg son un indicador de los asentamientos, es así que suelos con mayores límites líquidos y plásticos tienden a sufrir mayores asentamientos que suelos con valores menores de dichos límites, esto debido a que mayores valores de límites de Atterberg corresponden a suelos de elevada compresibilidad.
- El ensayo de fluorescencia de rayos X demuestra que los suelos de los cuatro sectores son químicamente silicatos hidratados de alúmina lo que corresponde a suelos arcillosos cuyos componentes predominantes son el óxido de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3) y el óxido de hierro (Fe_2O_3), los cuales son los elementos que componen los suelos ensayados.

RECOMENDACIONES

- La hoja de cálculo para la determinación de los asentamientos se encuentra programada y funcional, más no es una limitante para no ampliar su uso y sus aplicaciones, siendo así, se invita a realizar posteriores investigaciones en otros sectores de la localidad y realizar una extensión de esta hoja, permitiendo así una mayor cobertura de la zona y ayudando a la construcción local a aumentar la calidad de las obras, pues como se mencionó en el capítulo I de este trabajo, el problema que motivó a esta investigación es suponer que los asentamientos son despreciables, más si se dispone de una base técnica, como esta hoja de cálculo, que corrobore esta afirmación o en su defecto que demuestre que estos asentamientos no son despreciables, sería de lo más útil.
- En caso que se quiera aplicar un proceso inverso y determinar la carga que produce un asentamiento máximo permitido por la normativa ecuatoriana, se recomienda aplicar un factor de seguridad FS mínimo de 3 para la carga que produce el asentamiento máximo permitido.
- Los resultados de asentamientos que de esta hoja de cálculo se obtengan, no deben ser tomados como completamente verídicos, esto a su vez no quiere decir que exista dudas sobre la fidelidad de este trabajo, sino que como ya se mencionó anteriormente no es posible describir completa y exactamente los suelos, por ende se recomienda ir del lado de la seguridad y aplicar un factor de mayoración de los asentamientos, pues los que se obtienen son asentamientos teóricos; así mismo cabe aclarar que la hoja de cálculo es de uso investigativo aunque esto no impide que se le dé una aplicación práctica, si esto sucede es responsabilidad del constructor la aceptación o no de los resultados de los asentamientos obtenidos.
- Para una estimación superficial de los asentamientos se recomienda usar tablas y gráficas, más para una determinación de los asentamientos que posteriormente servirá para un diseño estructural se aconseja usar las funciones propuestas en los métodos descritos en el capítulo II, pues aunque las tablas y gráficas para una estimación rápida de los asentamientos son basadas en las funciones, sus valores dependen de la apreciación de quien calcula.

BIBLIOGRAFÍA

- Beckhoff, B., Kanngießer, B., Langhoff, N., Wedell, R., & Wolff, H. (2006). Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis. *Springer*, 1-4.
- Boussinesq, J. V. (1883). *Application des Potentials á L'Étude de L'équilibre et du Mouvement des Solides Élastiques*. París: Gauthier-Villars.
- Bowles, J. E. (1987). Elastic foundation settlements on sand deposits. *ASCE*, 850.
- Braja Madison, D. (2012). *Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones*. México D.F.: Cengage Learning.
- Braja Madison, D. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México D.F.: Cengage Learning.
- Charles Janbu, N. O., Bjerrum, L., & Kjaernsli, B. (1956). Veiledning ved losning av fundamenteringsoppgaver. *Norwegian Geotechnical Institute*, 30-32.
- Crespo Villalaz, C. (2016). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. México D.F.: Limusa.
- Duncan, J. M., & Buchignani, A. L. (1976). *An Engineering Manual For Settlements Studies*. University of California: Berkeley.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.
- Hara, A., Ohata, T., & Niwa, M. (1971). Shear Modulus and Shear Strength of Cohesive Soils. *Soils and Foundations*, 1-12.
- Jhon Tyler, C., & Carrier III, D. (1978). Janbu, Bjerrum and Kjaernsli's chart reinterpreted. *Canadian Geotechnical Journal*, 123-128.
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2015). *Mecánica de suelos, Tomo 1*. México D.F.: Limusa.
- Kulhawy, F. H., & Mayne, P. W. (1990). Manual of Estimating Soil Properties for Foundation Design. *Electric Power Research Institute*, 3-16.
- Ladd, C. C., Foote, R., Ishihara, K., & Schlosser, F. (1977). Stress Deformation and Strength Characteristics. *Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, (págs. 421-494). Tokio.
- Leoni, A. J. (2010). *Parametrización de los suelos*. La Plata: U.N.L.P.
- Nagaraj, T. S., & Murthy, B. S. (1985). Prediction of the Preconsolidation Pressure and Recompression. *Geotechnical Testing Journal, American Society for Testing and Materials*, 199-202.
- Ortiz Berrocal, L. (1998). *Elasticidad*. Madrid: McGraw Hill.
- Pytel, A., & Singer, F. (2012). *Resistencia de materiales*. México D.F.: Alfaomega.
- Stas, C., & Kulhawy, F. H. (1984). Critical Evaluation of Design Methods for Foundations Under Axial. *Electric Power Research Institute*.

ANEXOS

Anexo 1: Ensayos de clasificación de suelos



DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA Y MINAS E INGENIERÍA CIVIL

LABORATORIOS UCG_UTPL

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

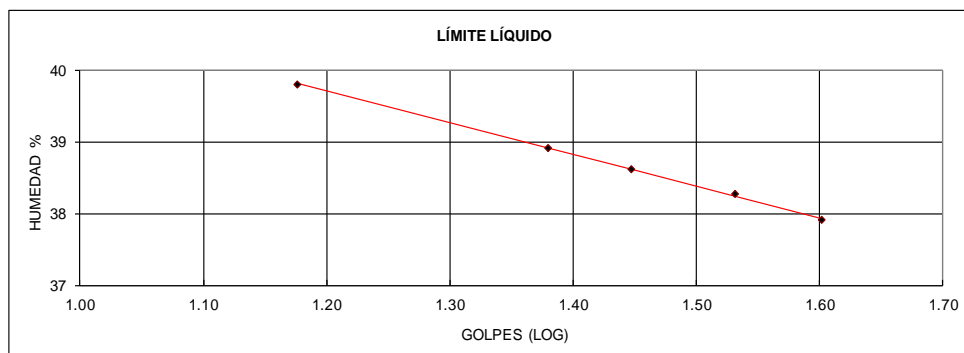
INF-LAB-UCG-012-2016

PROYECTO : ESTUDIO DE ASENTAMIENTOS INSTANTÁNEOS, POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIA Y SECUNDARIA EN SUELOS ARCILLOSOS DE LA CIUDAD DE LOJA

OBRA: TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN
 LOCALIZAC: URB. COLEGIO DE INGENIEROS CIVILES
 SOLICITADO: TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN
 FECHA: 31-10-2016

NORMA: ASTM D 4318 & AASHTO T-27
 POZO: 2
 MUESTRA: 1
 PROFUNDIDAD: 2.0 m
 REALIZA: CRISTHIAN ANDRÉS ENCALADA CORREA

	GOLPES	PESO HUM.	PESO SECO	CÁPSULA	w %	RESULTADO
1.- CONTENIDO DE HÚMEDAD		455.32	411.42	55.09	12.32	12.44
		455.80	412.83	70.76	12.56	
2.- LÍMITE LÍQUIDO	15	78.42	74.83	65.81	39.80	38.83
	24	81.00	78.49	72.04	38.91	
	28	73.06	69.82	61.43	38.62	
	34	78.79	75.56	67.12	38.27	
	40	79.80	77.12	70.05	37.91	
3.- LÍMITE PLÁSTICO		63.09	62.28	58.66	22.38	22.16
		58.99	58.22	54.71	21.94	
4.- GRANULOMETRÍA			5.- CLASIFICACIÓN			
PESO IN= 572.04 (H/S)		S		GRAVA	0.00	
PESO INICIAL DE CÁLCULO:		572.04		ARENA	8.06	
				FINOS	91.94	
TAMIZ	PESO RT.	% RET	% PASA	LL = 39.00 LP = 22.00 IP = 17.00		
1"	0.00	0	100			
3/4"	0.00	0	100	CLASIFICACIÓN SUCS : CL AASHTO: A-6 IG(86): 17 IG(45): 11		
1/2"	0.00	0	100			
3/8"	0.00	0	100			
No. 4	0.00	0	100			
No. 10	0.22	0	100			
No. 40	6.14	1	99			
No. 200	46.10	8	92			



CLASIFICACIÓN SUCS: Arcilla inorgánica de baja plasticidad (CL)

OBSERVACIONES: La toma de muestras y los ensayos son realizados por el tesista

Ing. Diego Mata
RESPONSABLE DEL LABORATORIO

Anexo 2: Ensayos de consolidación (ASTM D – 2435)



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN

Proyecto: <u>TESIS ASENTAMIENTOS</u>	Calicata N°: <u>1</u>
Localización del proyecto: <u>URB. COLEGIO DE ING. CIVILES</u>	Muestra N°: <u>1</u>
Descripción del Suelo: <u>CL (Arcilla color ploma)</u>	Profundidad de la Muestra: <u>2.00m</u>
Realizado por: <u>ENCALADA CORREA Cristhian</u>	Fecha de inicio del Ensayo: <u>14/01/2017</u>
Consolidómetro tipo: <u>Fijo</u>	Anillo N°: <u>1</u>

Relación de amplificación del sistema de carga:

Dimensiones del anillo:

Diámetro: 6.37 cm Área: 31.8690 cm² Altura: 2.51 cm Volumen: 79.99 cm³

Altura inicial del suelo, H_i = 2.51 cm
 Gravedad específica del suelo, G_s = 2.147 g/cm³
 Peso del anillo + muestra al comienzo del ensayo = 672.23 g
 Peso del anillo = 500.52 g
 Peso del suelo húmedo, W_t = 171.71 g
 Peso del suelo seco al horno, W_s = 152.82 g
 Altura de los sólidos, H_s = 1.59 cm
 Altura inicial de vacíos, $H_v = H_i - H_s$ = 0.92 cm
 Relación de vacíos inicial, $e_i = H_v/H_s$ = 0.582
 Grado de saturación inicial, $S_i = (W_t - W_s) / (H_v \times A)$ = 64.21%

Determinación del contenido de humedad inicial

Peso de lata + suelo húmedo =	430.96 g
Peso de lata + suelo seco =	385.94 g
Peso de la lata =	64.17 g
Peso del suelo seco =	321.78 g
Peso del agua =	45.02 g
Contenido de humedad (inicial) =	13.99%

Datos finales del ensayo (obtenidos al final del ensayo)

Lectura inicial del deformímetro = 0+000.0
 Lectura final del deformímetro = 4+009.0
 Cambio en altura de la muestra = 0.21 cm
 Altura final de vacíos, H_v_f = 0.72 cm
 Relación de vacíos final, $e_f = H_v_f/H_s$ = 0.452

Determinación del contenido de humedad final

Peso final del anillo + Muestra humedad =	676.21 g
Peso final del anillo + Muestra seca =	653.34 g
Peso o Volumen de agua =	22.87 g
Peso del suelo seco al horno, W_s =	152.82 g
Contenido de humedad final, W_f =	14.97%
Grado de saturación final, S_f =	82.60%



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN

Proyecto: TESIS ASENTAMIENTOS
 Localización del proyecto: URB. COLEGIO DE ING. CIVILES
 Descripción del Suelo: CL (Arcilla color ploma)
 Realizado por: ENCALADA CORREA Cristhian
 Consolidómetro tipo: Fijo

Calicata N°: 1
 Muestra N°: 1
 Profundidad de la Muestra: 2.00m
 Fecha de inicio del Ensayo: 14/01/2017
 Anillo N°: 1

DATOS DEL ENSAYO (CARGA):

Carga: 0 - 1 kg
 Fecha de aplicación: 14/01/2017
 Aplicado por: ENCALADA Cristhian

Carga: 1 - 2 kg
 Fecha de aplicación: 15/01/2017
 Aplicado por: ENCALADA Cristhian

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Deformación 0.00254 mm	
		Original	Ajustada
08:25:00	0	0+000.0	0.000000
08:25:06	0.1	0+095.0	0.241300
08:25:15	0.25	0+097.5	0.247650
08:25:30	0.5	0+100.0	0.253873
08:26:00	1	0+102.8	0.261112
08:27:00	2	0+106.5	0.270510
08:29:00	4	0+110.5	0.280670
08:33:00	8	0+114.6	0.291084
08:40:00	15	0+118.5	0.300990
08:55:00	30	0+122.5	0.311150
09:25:00	60	0+125.7	0.319151
10:25:00	120	0+128.4	0.326009
12:25:00	240	0+130.5	0.331343
16:25:00	480	0+131.8	0.334645
18:25:00	600	0+132.1	0.335407
08:25:00	1440	0+133.1	0.337947

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Deformación 0.00254 mm	
		Original	Ajustada
08:25:00	0	0+133.1	0.337947
08:25:06	0.1	0+171.0	0.434340
08:25:15	0.25	0+174.0	0.441960
08:25:30	0.5	0+176.6	0.448564
08:26:00	1	0+179.9	0.456946
08:27:00	2	0+183.6	0.466344
08:29:00	4	0+187.6	0.476504
08:33:00	8	0+191.6	0.486664
08:40:00	15	0+195.1	0.495554
08:55:00	30	0+198.6	0.504444
09:25:00	60	0+201.6	0.512064
10:25:00	120	1+003.9	0.517906
12:25:00	240	1+005.8	0.522732
16:25:00	480	1+007.3	0.526542
18:25:00	600	1+007.7	0.527558
08:25:00	1440	1+009.1	0.531114



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN

Proyecto: TESIS ASENTAMIENTOS
 Localización del proyecto: URB. COLEGIO DE ING. CIVILES
 Descripción del Suelo: CL (Arcilla color ploma)
 Realizado por: ENCALADA CORREA Cristhian
 Consolidómetro tipo: Fijo

Calicata N°: 1
 Muestra N°: 1
 Profundidad de la Muestra: 2.00m
 Fecha de inicio del Ensayo: 14/01/2017
 Anillo N°: 1

DATOS DEL ENSAYO (CARGA):

Carga: 2 - 4 kg
 Fecha de aplicación: 16/01/2017
 Aplicado por: ENCALADA Cristhian

Carga: 4 - 8 kg
 Fecha de aplicación: 17/01/2017
 Aplicado por: ENCALADA Cristhian

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Deformación 0.00254 mm	
		Original	Ajustada
08:25:00	0	1+009.1	0.531114
08:25:06	0.1	1+060.5	0.661670
08:25:15	0.25	1+064.1	0.670814
08:25:30	0.5	1+067.7	0.679958
08:26:00	1	1+072.0	0.690880
08:27:00	2	1+076.6	0.702564
08:29:00	4	1+081.5	0.715010
08:33:00	8	1+086.3	0.727202
08:40:00	15	1+090.5	0.737870
08:55:00	30	1+094.5	0.748030
09:25:00	60	1+098.0	0.756920
10:25:00	120	1+100.8	0.764032
12:25:00	240	1+103.1	0.769874
16:25:00	480	1+104.9	0.774446
18:25:00	600	1+105.5	0.775970
08:25:00	1440	1+107.3	0.780542

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Deformación 0.00254 mm	
		Original	Ajustada
08:25:00	0	1+107.3	0.780542
08:25:06	0.1	1+165.0	0.927100
08:25:15	0.25	1+170.5	0.941070
08:25:30	0.5	1+175.6	0.954024
08:26:00	1	1+181.4	0.968756
08:27:00	2	1+187.6	0.984504
08:29:00	4	1+194.0	1.000760
08:33:00	8	1+200.4	1.017016
08:40:00	15	2+005.8	1.030732
08:55:00	30	2+011.0	1.043940
09:25:00	60	2+015.5	1.055370
10:25:00	120	2+019.1	1.064514
12:25:00	240	2+022.2	1.072388
16:25:00	480	2+024.6	1.078484
18:25:00	600	2+025.5	1.080770
08:25:00	1440	2+028.2	1.087628



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN

Proyecto: TESIS ASENTAMIENTOS
 Localización del proyecto: URB. COLEGIO DE ING. CIVILES
 Descripción del Suelo: CL (Arcilla color ploma)
 Realizado por: ENCALADA CORREA Cristhian
 Consolidómetro tipo: Fijo

Calicata N°: 1
 Muestra N°: 1
 Profundidad de la Muestra: 2.00m
 Fecha de inicio del Ensayo: 14/01/2017
 Anillo N°: 1

DATOS DEL ENSAYO (CARGA):

Carga: 8 - 16 kg
 Fecha de aplicación: 18/01/2017
 Aplicado por: ENCALADA Cristhian

Carga: 16 - 32 kg
 Fecha de aplicación: 19/01/2017
 Aplicado por: ENCALADA Cristhian

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Deformación 0.00254 mm	
		Original	Ajustada
08:25:00	0	2+028.2	1.087628
08:25:06	0.1	2+100.0	1.270000
08:25:15	0.25	2+109.4	1.293876
08:25:30	0.5	2+118.2	1.316228
08:26:00	1	2+127.8	1.340612
08:27:00	2	2+137.6	1.365504
08:29:00	4	2+147.5	1.390650
08:33:00	8	2+156.9	1.414526
08:40:00	15	2+164.8	1.434592
08:55:00	30	2+172.3	1.453642
09:25:00	60	2+178.9	1.470406
10:25:00	120	2+184.4	1.484376
12:25:00	240	2+188.9	1.495806
16:25:00	480	2+192.6	1.505204
18:25:00	600	2+193.9	1.508506
08:25:00	1440	2+197.8	1.518412

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Deformación 0.00254 mm	
		Original	Ajustada
08:25:00	0	2+197.8	1.518412
08:25:06	0.1	3+091.0	1.755140
08:25:15	0.25	3+107.0	1.795780
08:25:30	0.5	3+120.8	1.830832
08:26:00	1	3+135.4	1.867916
08:27:00	2	3+149.1	1.902714
08:29:00	4	3+161.0	1.932940
08:33:00	8	3+170.7	1.957578
08:40:00	15	3+177.6	1.975104
08:55:00	30	3+184.1	1.991614
09:25:00	60	3+189.1	2.004314
10:25:00	120	3+193.9	2.016506
12:25:00	240	3+199.0	2.029460
16:25:00	480	4+003.1	2.039874
18:25:00	600	4+004.5	2.043430
08:25:00	1440	4+009.0	2.054860



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN

Proyecto:	TESIS ASENTAMIENTOS	Calicata N°:	1
Localización del proyecto:	URB. COLEGIO DE ING. CIVILES	Muestra N°:	1
Descripción del Suelo:	CL (Arcilla color ploma)	Profundidad de la Muestra:	2.00m
Realizado por:	ENCALADA CORREA Cristhian	Fecha de inicio del Ensayo:	14/01/2017
Consolidómetro tipo:	Fijo	Anillo N°:	1

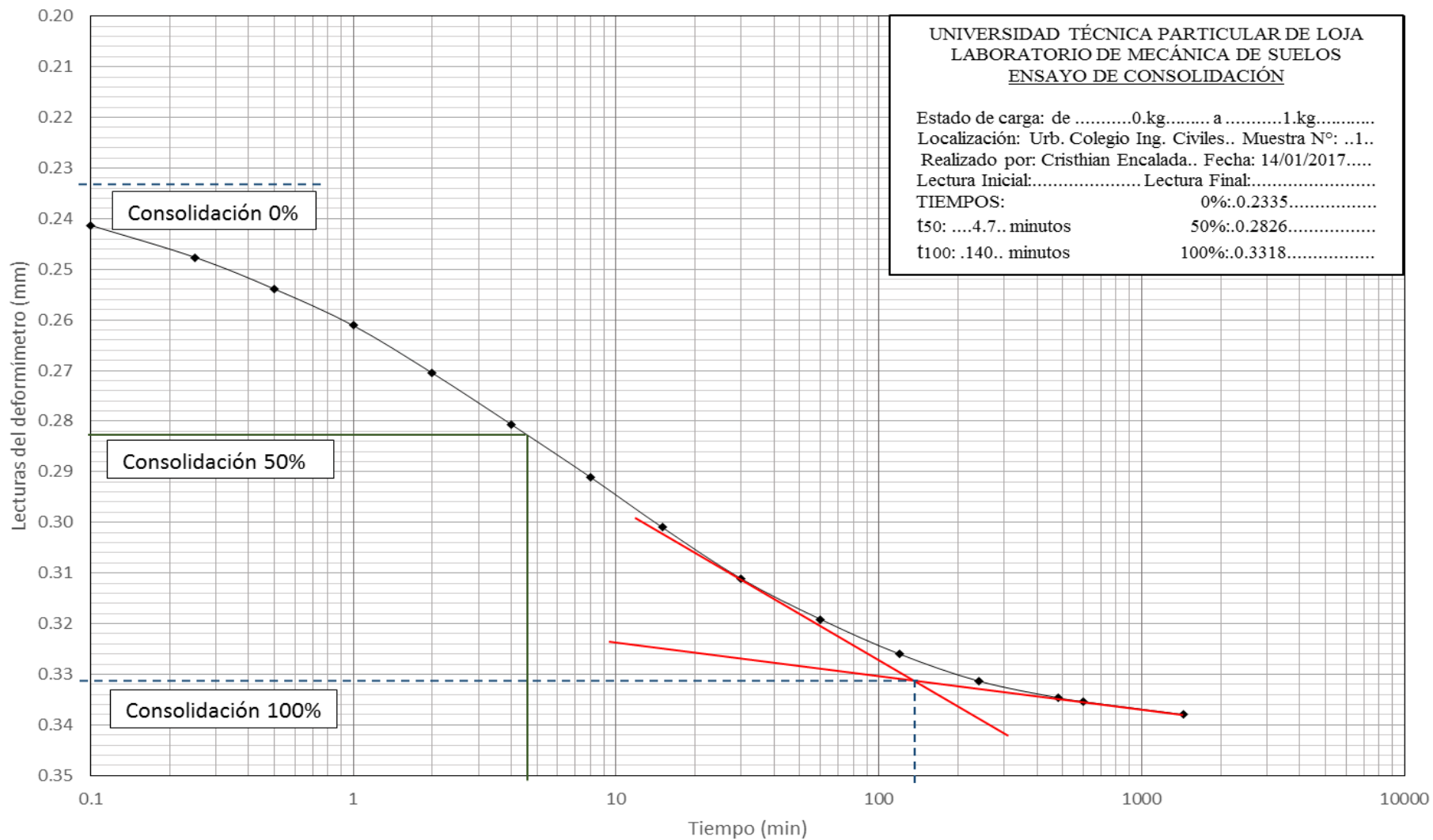
ETAPA DE DESCARGA Y RECARGA

DATOS DEL ENSAYO:

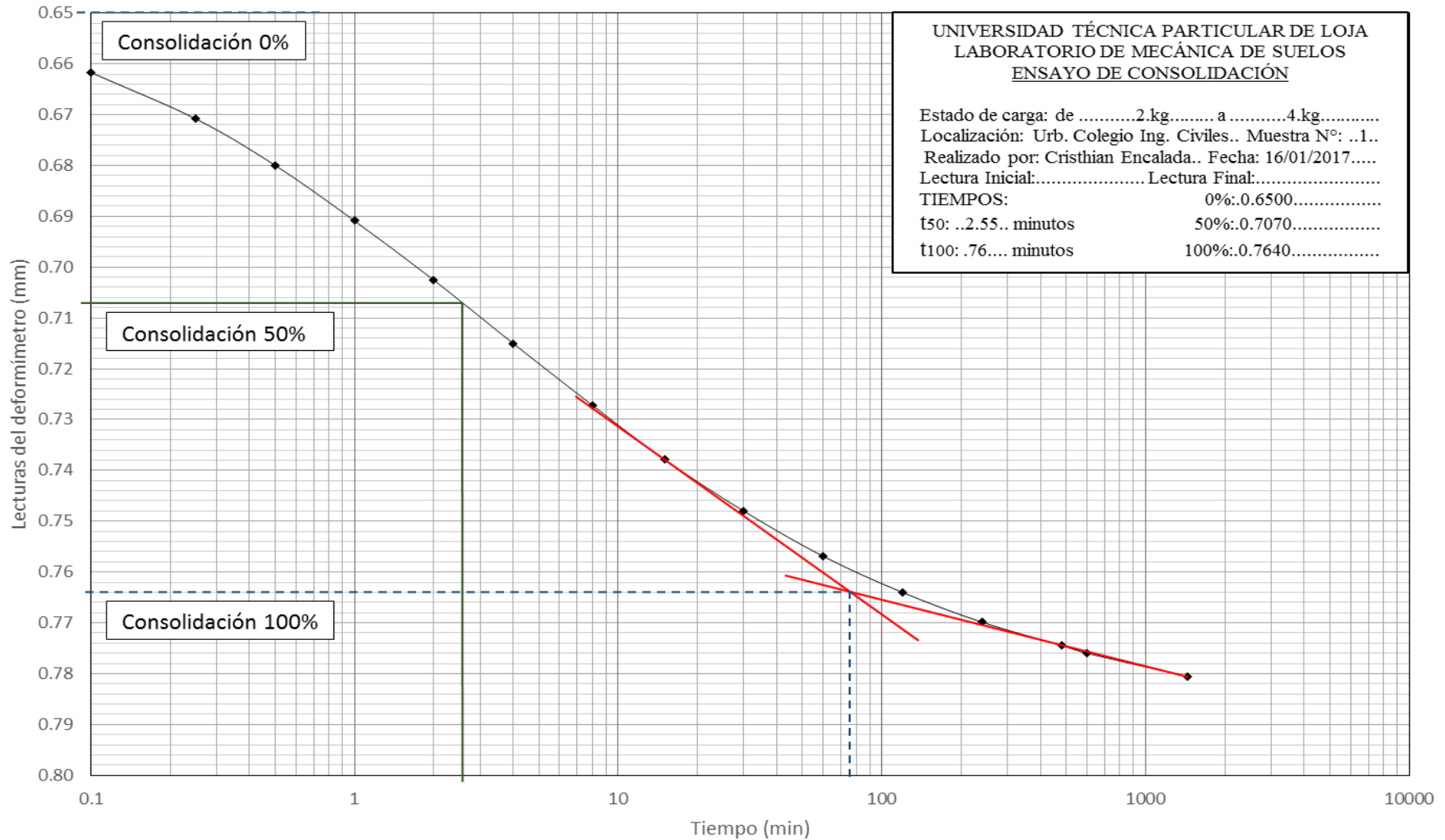
Volumen inicial de la muestra	79.99 cm ³	Peso del suelo seco al horno, W _s =	152.82 g
Gravedad específica del suelo, G _s =	2.147 g/cm ³	Altura de los sólidos, H _s =	1.59 cm
Altura inicial de vacíos, H _v = H _i - H _s =	0.92 cm	Relación de vacíos inicial, e _i = H _v /H _s =	0.58
Altura inicial del suelo, H _i =	2.51 cm	Área de la muestra	31.87 cm ²

Carga (Kg)	Lectura al final del incremento de carga	Cambio en la altura de la muestra (cm)	$\epsilon = \Delta H/H_s$	Relación de vacíos instantáneos	H _m para el incremento de carga (cm)	t (min) para el 50% de la consolidación	C _v (cm ² /min)	Presión (kg/cm ²)
Descarga	32	4+009.0	0.2055	0.1295	0.4522			10.0411
	16	3+164.0	0.1941	0.1223	0.4594			5.0205
	8	3+099.2	0.1776	0.1119	0.4698			2.5103
	4	3+035.0	0.1613	0.1016	0.4801			1.2551
	2	2+169.9	0.1448	0.0912	0.4905			0.6276
	1	2+107.7	0.1290	0.0813	0.5004			0.3138
	0	1+141.1	0.0866	0.0546	0.5271			0.0314
Recarga	1	2+000.1	0.1016	0.0640	0.5177			0.3138
	2	2+035.8	0.1107	0.0698	0.5120			0.6276
	4	2+088.8	0.1242	0.0782	0.5035			1.2551
	8	2+173.0	0.1455	0.0917	0.4900			2.5103
	16	3+084.9	0.1740	0.1096	0.4721			5.0205
	32	4+021.1	0.2086	0.1314	0.4503			10.0411

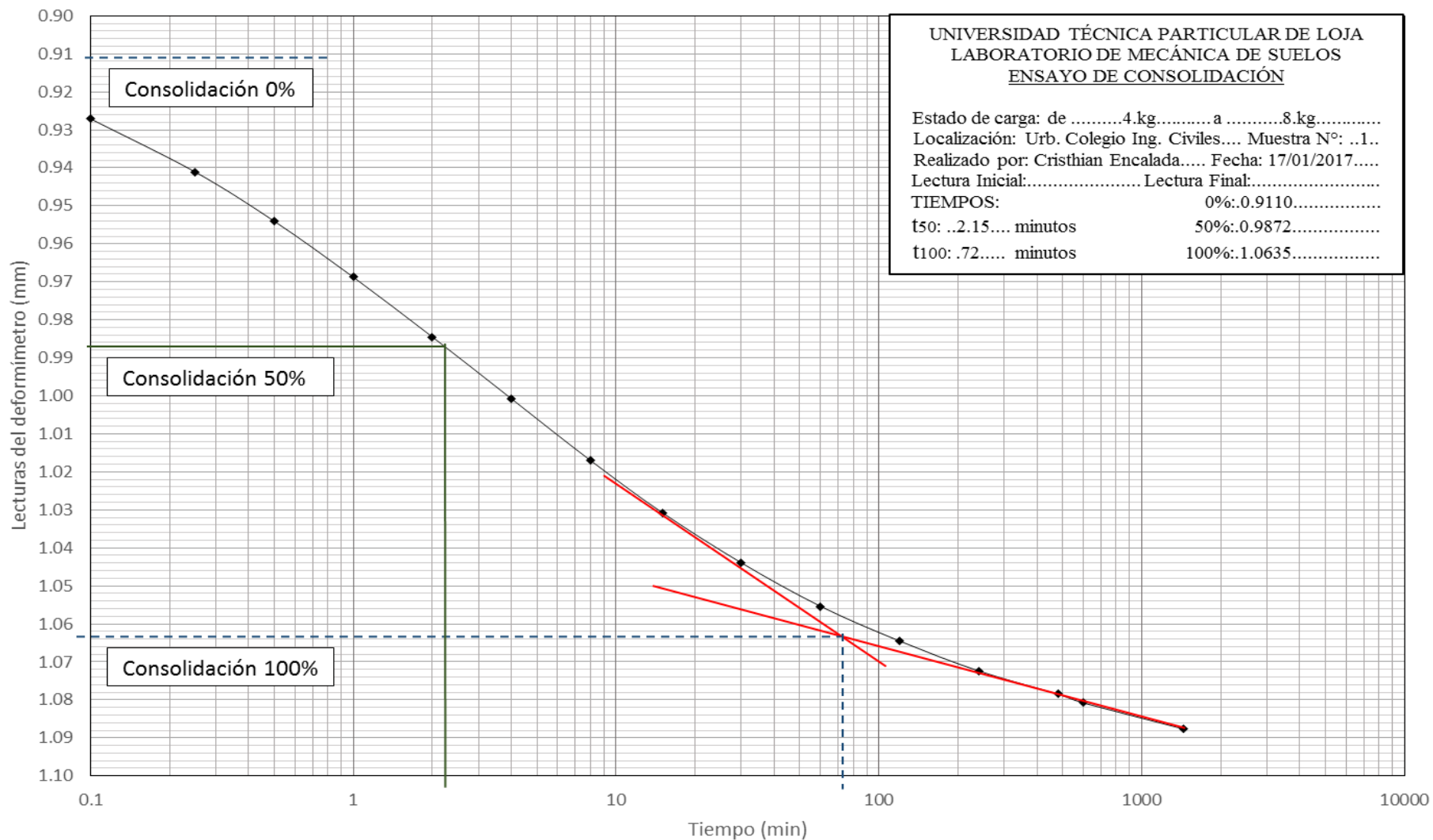
ENSAYO CONSOLIDACIÓN URB. COLEGIO DE ING. CIVILES - CARGA: 0 - 1 Kg



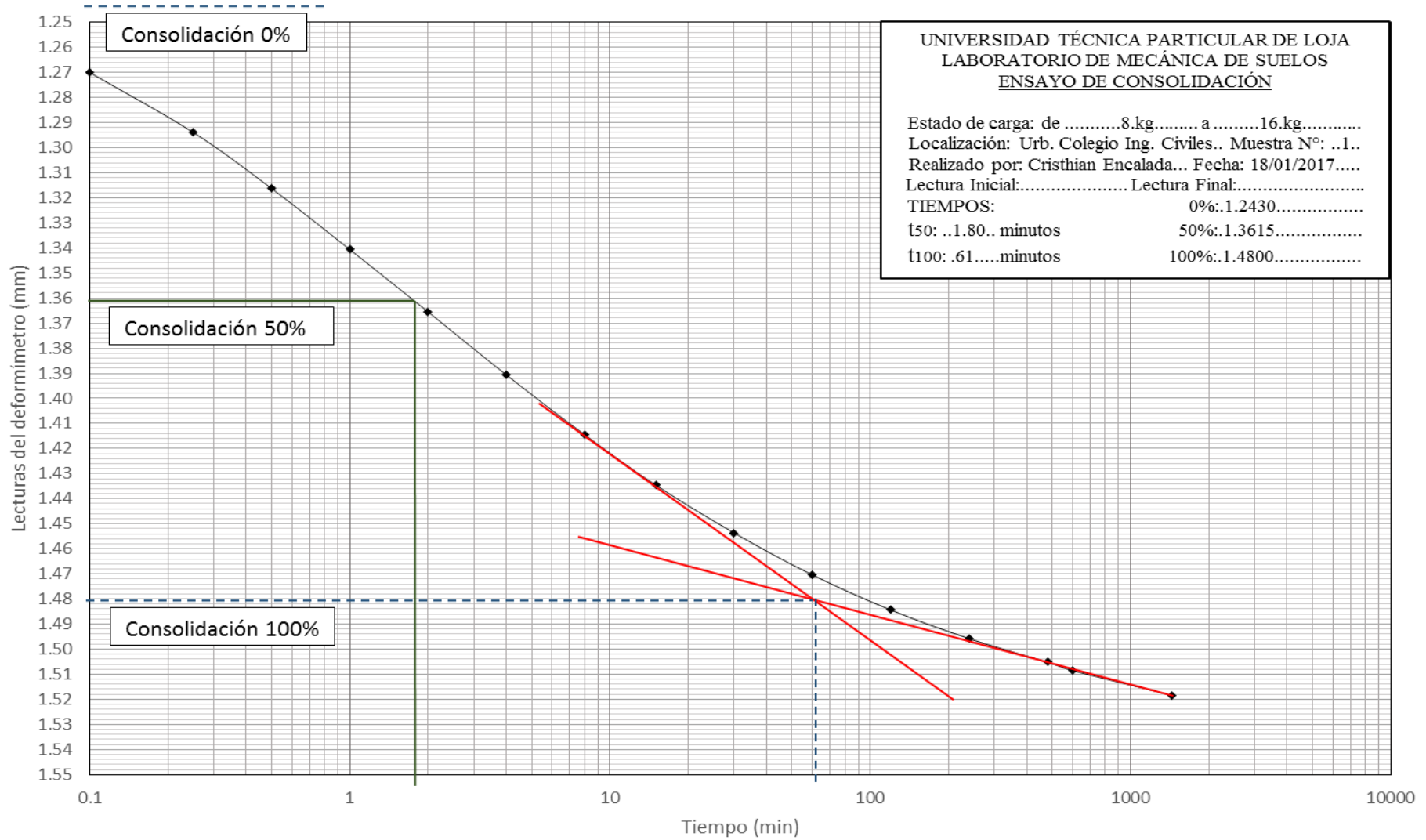
ENSAYO CONSOLIDACIÓN URB. COLEGIO DE ING. CIVILES - CARGA: 2 - 4 Kg



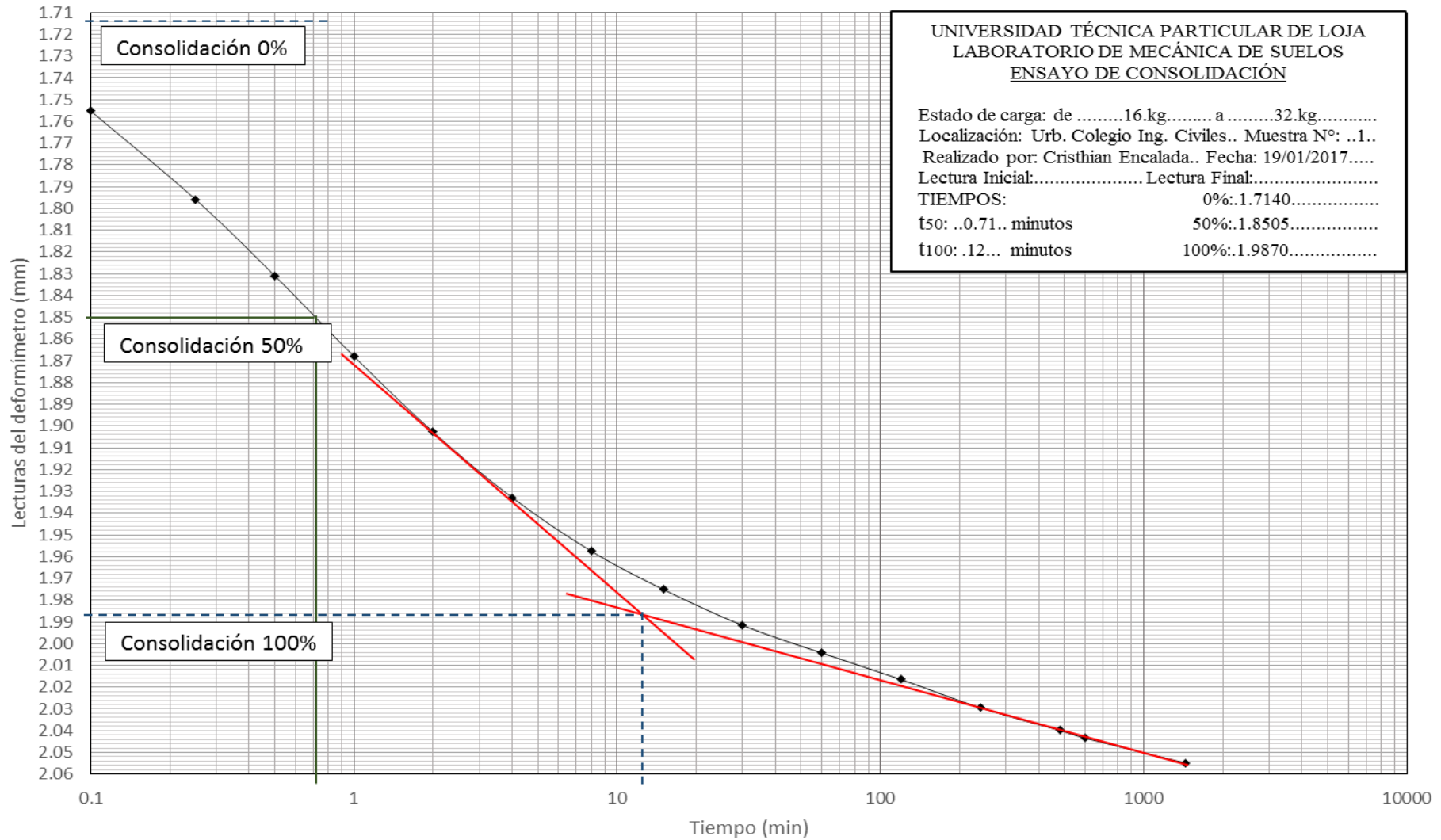
ENSAYO CONSOLIDACIÓN URB. COLEGIO DE ING. CIVILES - CARGA: 4 - 8 Kg



ENSAYO CONSOLIDACIÓN URB. COLEGIO DE ING. CIVILES - CARGA: 8 - 16 Kg



ENSAYO CONSOLIDACIÓN URB. COLEGIO DE ING. CIVILES - CARGA: 16 - 32 Kg



ENSAYO CONSOLIDACIÓN URB. COLEGIO DE ING. CIVILES - CARGA, DESCARGA Y RECARGA

