

Modelo a Escala de Consolidación para la Asignatura Mecánica de Suelos en la Universidad
Industrial de Santander

Anderson Fabián Silva Vargas, Rafael Andrés Valencia Acosta

Hebenly Celis Leguizamo

Msc. en Ingeniería Civil

Trabajo De Grado presentado como requisito para Optar al Título de:

Ingeniero Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2018

Dedicatoria

Dedico primero que todo a Dios y a María santísima por darme la sabiduría y permitirme alcanzar una meta más.

A mi padre por brindarme el coraje y la fortaleza, a mi madre por brindarme su confianza, amor, consejos y dedicación, a mi hermana por ser el motor que me impulsa a ser mejor cada día, a mi padrino Alex Rodríguez por enseñarme a ser una persona luchadora, por sus palabras de vida en los largos viajes que realizamos juntos, a toda mi familia por su apoyo incondicional y sus consejos, al abogado Andrés Villamil por su acompañamiento, motivación y críticas constructivas en mi proceso de formación.

Finalmente agradezco a todos mis amigos que hicieron parte de esta formación, ya que con ellos se logró cumplir una meta más en esta maravillosa universidad que me ofreció grandes momentos y lecciones de vida.

Ánderson Fabián Silva Vargas

A DIOS, diseñador, promotor y sustento de todos mis sueños, quien nunca abandonó incluso cuando quise hacerlo o cuando pensaba que no lo lograría su gracia y sustento siempre estuvieron a mi lado, a EL toda la Gloria por esta meta lograda y por las que vendrán, SIN EL NADA HABRÍA SIDO POSIBLE. “He never gonna let me go.”

A Rafael Antonio Valencia y Deyanira Acosta, mis viejos queridos por cuyas enseñanzas soy quien soy, son una poderosa razón para levantarme cada día y seguir luchando, por quienes quiero seguir creciendo dar todo cuanto esté a mi alcance. A Liz por su exquisito sentido del humor y especial modo de motivarme, a Nathay quien siempre me apoyó a pesar de todo, mil gracias por soportarme. A la familia Acosta Ruiz por su respaldo y motivación constante, por las llamadas y mensajes de apoyo, espero recompensar tan ardua labor. Son mi combustible y las ganas de seguir adelante.

¡A mis amigos! De los regalos más preciados que Dios me haya podido dar, A Carlos Expósito y Yesid Calderón, pilares fundamentales en los momentos difíciles y con quienes compartí innumerables charlas que hicieron de mí alguien mejor, a ellos y sus familias de las cuales tengo el honor de sentirme parte. A Odtman y Paula, los “amillos” de mi alma, a pesar del tiempo y la distancia mi más profundo afecto e incondicionalidad, Angie y David, Anlly, Ismael, Diego, Laura, las Familias Padilla Montes y Zúñiga Ronquillo, las personas de ICC en Socorro y Bucaramanga, quienes son mi familia grande y nunca dejaron de creer en mí, ¡infinitas gracias!

A mi compañero de proyecto Anderson por su trabajo y dedicación, a Luisa Pimiento, Francisco y Danilo Hernández, personas que trascendieron del proceso de formación para convertirse en camaradas de la vida, de quienes aprendí a superar temores y obstáculos.

Rafael Andrés Valencia Acosta

Agradecimientos

A la Universidad industrial de Santander, La escuela de ingeniería civil, todo su cuerpo docente, excelentes profesionales, que con paciencia pasión y entusiasmo supieron depositar sus conocimientos aun por encima de nuestras repentinas resistencias en el camino a la construcción del saber, a los administrativos y todos aquellos miembros que pertenecen a esta destacada institución, y sin los cuales todos los procesos que lleva a cabo la universidad serían infructuosos.

A todo el personal de la sede UIS en el Socorro, excelentes personas que nos supieron acoger y encaminar hasta poder culminar un proceso que se inició lleno de dudas, e incluso temores,

A todos ellos infinitas gracias.

Contenido

| | |
|--|----|
| Introducción..... | 13 |
| 1. Objetivos del proyecto..... | 14 |
| 1.1 Objetivo general..... | 14 |
| 1.2 Objetivos específicos..... | 14 |
| 2. Marco Teórico..... | 15 |
| 2.1 Introducción a la consolidación | 15 |
| 2.2 Teoría de consolidación de suelos: Analogía de Terzaghi..... | 17 |
| 2.3 Hipótesis asumidas por Terzaghi | 18 |
| 2.4 Ensayo de consolidación..... | 19 |
| 2.5 Pre consolidación de suelos | 23 |
| 2.6 Tipos de arcillas | 25 |
| 2.6.1 Arcillas normalmente consolidadas | 25 |
| 2.6.2 Arcillas Pre-consolidadas..... | 26 |
| 2.7 Tipos de asentamientos | 28 |
| 2.7.1 Consolidación unidireccional..... | 29 |
| 2.7.2 Consolidación primaria | 29 |
| 2.7.3 Consolidación secundaria | 30 |
| 2.8 Parámetros de consolidación..... | 30 |
| 2.9 Casos Importantes de Consolidación | 37 |

| | |
|---------------------------------------|----|
| 2.10 Materiales..... | 38 |
| 2.11 Equipos | 39 |
| 2.12 Dimensiones del modelo..... | 39 |
| 2.12.1 Planos en dos dimensiones..... | 40 |
| 2.13 Ensamble..... | 41 |
| 2.13.1 Corte de las láminas | 41 |
| 2.13.2 Proceso de ensamble | 42 |
| 2.14 Prueba del modelo..... | 45 |
| 3. Conclusiones..... | 52 |
| Referencias..... | 53 |

Lista de Figuras

Figura 1. Forma típica de la curva de compresibilidad en suelos compresibles (a) Representación Aritmética (b) Representación Logarítmica16

Figura 2. Esquema de una muestra de suelo y el modelo de sus tres fases;**Error! Marcador no definido.**

Figura 3. Analogía mecánica de Terzaghi y Diagrama de esfuerzos17

Figura 4. Edómetro.....20

Figura 5. Curva típica de consolidación.....21

Figura 6. Forma típica de la curva de compresibilidad en suelos compresibles (a) Representación Aritmética (b) Representación semilogarítmica.....22

Figura 7. Suelos Normalmente Consolidados26

Figura 8. Caso 1 Suelos Pre-consolidadas27

Figura 9 Caso2. Suelos Pre-consolidadas27

Figura 10. Coeficiente de pre- consolidación a_v 31

Figura 11. Índice de compresibilidad C_c 32

Figura 12. C_c para suelos normalmente consolidados33

Figura 13. C_c para suelos Pre-consolidados34

Figura 14. Coeficiente compresibilidad método Casagrande.....35

Figura 15. Coeficiente compresibilidad método de Taylor36

Figura 16. Estratos torre de Pisa **Error! Marcador no definido.**

RESUMEN

TÍTULO: ELABORACIÓN DE UN MODELO A ESCALA PARA LA ASIGNATURA MECANICA DE SUELOS EN LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER*.

AUTORES: RAFAEL ANDRÉS VALENCÍA ACOSTA*

ÁNDERSON FABIÁN SILVA VARGAS**

PALABRAS CLAVE: Consolidación, Esfuerzos efectivos, Arcillas, Modelo a escala, Universidad Industrial de Santander.

DESCRIPCIÓN:

El proceso de formación de los estudiantes de ingeniería civil en la Universidad Industrial de Santander en una línea de gran importancia como lo es la geotecnia, se inicia con el curso de mecánica de suelos, asignatura durante la cual se abordan múltiples conceptos implicando la comprensión de comportamientos que difícilmente pueden ser observados de manera directa o interpretados por completo en el aula de clase.

Un comportamiento de gran importancia que se estudia en el curso de mecánica de suelos, es el proceso de consolidación, durante el cual el suelo se deforma dado que las partículas del mismo presentan un proceso de acomodación causado por un cambio de los esfuerzos efectivos y un aumento en la presión de agua contenida en el suelo, todo esto generado por incrementos de carga aplicados sobre el mismo.

La adquisición de los conceptos que intervienen en el proceso de consolidación puede desarrollarse de manera más palpable y clara si se utilizara un recurso pedagógico que facilite en el aula de clase la observación de las etapas de la consolidación en una muestra de suelo.

El presente proyecto abarca la propuesta, diseño y elaboración de un modelo a escala que represente las diferentes fases que se llevan a cabo durante el proceso de consolidación de un suelo saturado, mostrando los diferentes factores y etapas relevantes en este fenómeno. Este modelo se constituye para los estudiantes del curso de mecánica de suelos como una herramienta de aprendizaje que facilita la adquisición de los

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Hebenly Celis Leguizamo, Msc. en Ingeniería Civil

conceptos y fortalece la conservación de los mismos, teniendo como resultado un aporte significativo al mejoramiento de los procesos de formación adelantados por la escuela de ingeniería civil.

ABSTRACT

TITLE: Scale Model of Consolidation for the Soil Mechanical Subject at the Industrial University of Santander

AUTHORS: RAFAEL ANDRÉS VALENCÍA ACOSTA*

ÁNDERSON FABIÁN SILVA VARGAS**

KEYWORDS: Consolidation, Clays, Scale model, Industrial University of Santander.

DESCRIPTION:

The process of training civil engineering students at the Industrial University of Santander in a line of great importance as it is geotechnical, begins with the course of soil mechanics, a subject during which multiple concepts involving the understanding of behaviors that can hardly be observed directly or interpreted completely in the classroom.

A behavior of great importance that is studied in the course of soil mechanics, is the consolidation process, during which the soil is deformed since the particles of it present a process of rearrangement caused by a change of the effective efforts and a increase in water pressure contained in the soil, all this generated by load increases applied to it.

The acquisition of the concepts that intervene in the consolidation process can be developed in a more palpable and clear way if a pedagogical resource is used that facilitates the observation of the consolidation stages in a soil sample in the classroom.

The present project covers the proposal, design and elaboration of a scale model that represents the different phases that are carried out during the consolidation process of a saturated soil, showing the different factors and relevant stages in this phenomenon. This model is constituted for the students of the soil mechanics course as a learning tool that facilitates the acquisition of the concepts and strengthens the conservation of the same, resulting in a significant contribution to the improvement of the training processes advanced by the school. of civil engineering

* Degree work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Hebenly Celis Leguizamo, Msc. in Civil Engineering

Introducción

Una rama de la Ingeniería civil de gran importancia es la geotecnia, entendiéndose esta como la aplicación de los conocimientos de la ingeniería en el estudio, diseño y ejecución de obras de acuerdo con las características de los materiales de la corteza terrestre sobre los cuales se van a ejecutar las mismas. Como toda obra civil está o estará en contacto con el suelo, es evidente la importancia de tener conocimientos sólidos en esta área de la ingeniería, considerando el estudio de la mecánica de suelos que se constituye como una de las asignaturas de gran importancia para abordar los diferentes aspectos relevantes de la geotecnia.

Dentro de los comportamientos que estudia la geotecnia y que afecta de manera muy significativa el desempeño de los suelos bajo las cargas aplicadas por una estructura es la consolidación de los suelos, proceso mediante el cual las partículas de un suelo sufren deformaciones y re ajuste en la posición relativa de las mismas que lo conforman y que si no se estudia y comprende de forma plena, podría incurrir en errores de cálculo y determinación de los cimientos de una estructura, lo que se traduce en un riesgo inminente para la estabilidad de esta.

El curso de mecánica de suelos aborda el estudio de este importante tema empezando con un acercamiento a los conceptos característicos de la consolidación de los suelos, incluyendo factores que marcan la diferencia en los comportamientos de los suelos de acuerdo con su composición. Con el fin de aportar a esta enseñanza mediante una estrategia pedagógica se realizó un modelo real y virtual sobre la consolidación que respalde los procesos de enseñanza-aprendizaje que permitan observar de forma más clara las características y los factores importantes, logrando al mismo tiempo que estos modelos se conviertan en aliados del docente para explicar los conceptos y del estudiante para visualizarlos y asimilarlos como menciona Tristancho “2017”.

1. Objetivos del proyecto

1.1 Objetivo general

Elaborar un modelo a escala por medio del cual se represente una importante propiedad mecánica del suelo como lo es la consolidación, abordada durante el curso de mecánica de suelos.

1.2 Objetivos específicos

-) Establecer el modelo que se realizara de acuerdo a la temática de la asignatura.
-) Diseñar el modelo escogido de manera que permitan explicar fácilmente la temática.
-) Construir el modelo propuesto teniendo en cuenta todos los detalles técnicos pertinentes tales como escala, materiales a emplear, y aspectos relevantes del comportamiento del suelo estudiado.

2. Marco Teórico

2.1 Introducción a la consolidación

Todo material sometido a una carga ya sea impuesta por la construcción de algún tipo de estructura o por la disminución del nivel freático como puede ser el caso en que se requiera extraer agua para el consumo, experimenta una deformación debido a los cambios de esfuerzo en el suelo, estas deformaciones usualmente se desarrollan en diferentes intervalos de tiempo, un ejemplo es cuando un estrato de suelo que está soportando una estructura para la cual se necesitara de varios años para que la deformación de este se complete, es debido a que en el proceso de consolidación este tiempo es dependiente de aspectos como el tipo de suelo y la permeabilidad del mismo, como es el caso de las arcillas que cuando tienen valores de coeficiente de permeabilidad bajo, se presentan asentamientos a largo plazo y el suelo sigue asentándose durante años después de la construcción, por lo que el calculista tiene que calcular el tiempo de asentamiento total; caso contrario a las arenas en donde el asentamiento es instantáneo a la aplicación de la carga ya que estas cuentan con un coeficiente de permeabilidad alto; otros factores que intervienen en el tiempo de consolidación son el estado de consistencia que desarrolla la resistencia del suelo a la deformación, la forma en que el suelo es cargado, ya sea mediante cargas puntuales o cargas distribuidas en un área específica y la ubicación estratigráfica del suelo que a partir de los espesores y composición de cada estrato de suelo, hacen que el proceso de consolidación sea diferente en cada tipo suelo. Terzaghi define este comportamiento en el caso de los suelos finos (arcillas, limos) como la relación entre el esfuerzo efectivo y la relación de vacíos e , graficadas en una escala aritmética y logarítmica como se ilustra en la figura 1.

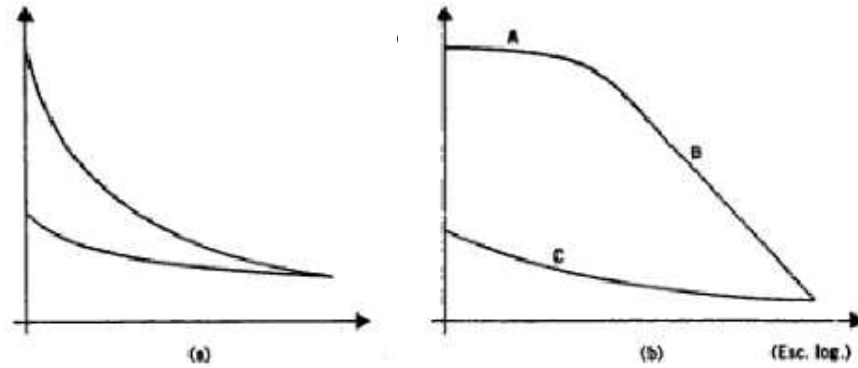


Figura 1. Forma típica de la curva de compresibilidad en suelos compresibles
 (a) Representación Aritmética
 (b) Representación Logarítmica

Fuente: Mecánica de suelos, J. Badillo y R. Rodriguez

Rodríguez y Badillo “2005” establecen que el efecto de estas deformaciones genera que los estratos del suelo disminuyan el volumen total de la masa, esto es debido a que el volumen de vacíos comienza a disminuir donde el aumento de esfuerzo efectivo reduce la relación de vacíos, consolidando el suelo y evitando que este pueda absorberse fácilmente en él. Poliotti y Sierra “2007” concluyen que durante el proceso de consolidación lo que ocurre con mayor frecuencia es que debido a la posición relativa de las partículas del suelo ubicadas sobre un mismo plano horizontal permanece constante considerando que los estratos depositados tienen una gran extensión horizontal en comparación con su espesor, de ahí que las partículas puedan desplazarse solo en dirección vertical ya que en dirección horizontal los desplazamientos son tan pequeños que pueden considerarse nulos, a esto se le llama consolidación unidimensional. Basada principalmente en la teoría lineal de Terzaghi [1923]

2.2 Teoría de consolidación de suelos: Analogía de Terzaghi

Terzaghi propone un modelo mecánico, a partir de un modelo sugerido por Lord Kelvin con el fin de explicar la consolidación de suelos finos, este modelo está compuesto por un cilindro de área de sección recta A , provisto de un disco sin fricción con un orificio por donde se espera el fluido incompresible salga al ser aplicada una carga sobre el disco, el cual está apoyado sobre un resorte que se une al fondo del cilindro, y además se encuentra totalmente lleno de un fluido incompresible, tal como se ilustra en la figura 3.

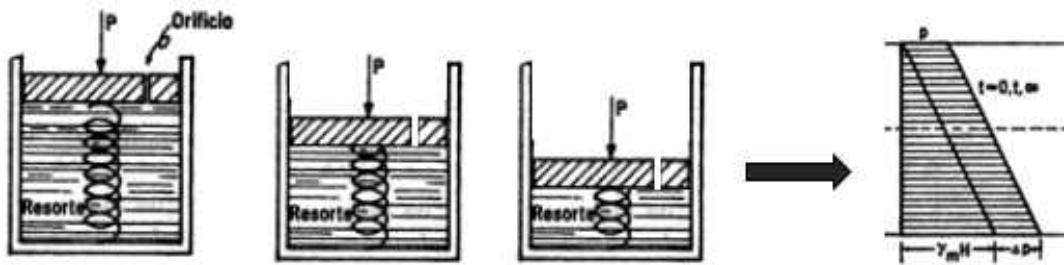


Figura 2. Analogía mecánica de Terzaghi y Diagrama de esfuerzos

Fuente: Editado de mecánica de suelos, J. Badillo y R. Rodriguez

El proceso consiste en aplicar una carga P en el cilindro de sección recta A , generando una diferencia de presión que obliga al fluido salir por el orificio y desarrollándose una deformación en el resorte quien se encarga de tomar la mayor parte de la carga, aunque esto también dependa del tamaño del orificio ya que entre más grande sea este, el fluido tenderá a salir más rápido y la viscosidad del fluido, entre menor sea la viscosidad, menor carga soportará el fluido y el proceso de deformación será más rápido. Ahora si se considera que el resorte tiene una constante de elasticidad baja este será más fácil de deformarse, logrando que la totalidad de la carga P quede soportada por él, ya que el fluido incompresible habrá sido expulsado por el orificio, esto sería el caso de suelos arcillosos blandos, con material orgánico y porcentajes de humedad altos.

Con este modelo Terzaghi buscaba interpretar la relación entre el esfuerzo efectivo y la deformación cuando estando el suelo saturado son sometidos a un incremento de carga, en este modelo el resorte representa las partículas sólidas, el fluido incompresible representa el agua intersticial y el orificio del disco representa los conductos capilares como describe Rodríguez y Badillo “2005”.

2.3 Hipótesis asumidas por Terzaghi

Rodríguez y Badillo “2005”; García “2016 y Giovanni “2007” mencionan que debido a la complejidad de encontrar una fórmula que ligue las condiciones de esfuerzo y la relación de vacíos en cualquier punto de un suelo saturado en un tiempo determinado y para cualquier espesor en el cual el suelo se encuentra sometido a una carga sostenida Terzaghi llevo a cabo las siguientes hipótesis:

- ✓ El suelo es homogéneo e isotrópico.
- ✓ Las partículas de suelo y el agua son incompresibles.
- ✓ Para el movimiento del fluido en el medio poroso se asume la ley de Darcy.
- ✓ El suelo esta lateralmente confinado y el drenaje tiene lugar sólo en sentido vertical.
- ✓ El suelo está totalmente saturado.
- ✓ El coeficiente de permeabilidad es constante
- ✓ Se cumple el principio de esfuerzos efectivos.
- ✓ Compresión y flujo unidimensional

A pesar de que la teoría de Terzaghi es uno de los métodos más utilizados en la solución de problemas de ingeniería geotécnica, aplicada para estimar magnitud y velocidad de asentamientos en diversos proyectos de ingeniería, presenta problemas reales debidos a las hipótesis planteadas

ya que son fuentes potenciales de error por lo que en la actualidad se requiere de métodos más avanzados indican García “2016” y Giovanni “2007”.

Algunos supuestos de los que frecuentemente no se cumplen en suelos reales y limitan la aplicación de esta teoría son:

-) La velocidad con la que ocurren los asentamientos varía debido a que durante la consolidación se produce una variación de esfuerzos de la presión efectiva lo cual implica también que el coeficiente de consolidación sea variable especialmente con la profundidad del estrato.
-) El esqueleto mineral de los suelos no presenta deformaciones estrictamente proporcionales al esfuerzo aplicado, esto es debido a que los suelos no tienen un comportamiento lineal o elástico.
-) La relación entre el asentamiento y el factor de tiempo no siempre se cumplen en suelos reales debido a que las deformaciones son variables en profundidad [6]; [7].

2.4 Ensayo de consolidación

En escenarios donde se desea resolver problemas reales de consolidación de suelos, es necesario identificar la magnitud del asentamiento y el tiempo que le tomará desarrollarlo al momento de ser cargado, para esto resulta necesario aplicar un ensayo de consolidación a una muestra de suelo inalterada mediante un edómetro o consolidómetro como lo especifica la norma ASTM D 2345, la cual mediante la teoría de consolidación unidimensional tiene como objeto determinar la reducción en el volumen de la muestra y la velocidad con la que este se reduce, considerando que el suelo está confinado lateralmente y sujeto únicamente a una carga axial.

Estos equipos están constituidos básicamente de un anillo fijo dentro del cual se coloca y confina la muestra entre dos placas o piedras porosas, luego un pistón de carga se encarga de transmitir la fuerza impuesta al anillo fijo mediante una placa que reparte la carga uniformemente en toda el área de la muestra, también incluye un deformímetro de carga movible apoyado sobre el pistón de carga el cual muestra las deformación que presenta la muestra conforme se aplican los incrementos de carga a intervalos de tiempo lo suficientemente necesarios para que la velocidad de deformación sea aproximadamente cero de acuerdo a Rodríguez y Badillo “2005”.

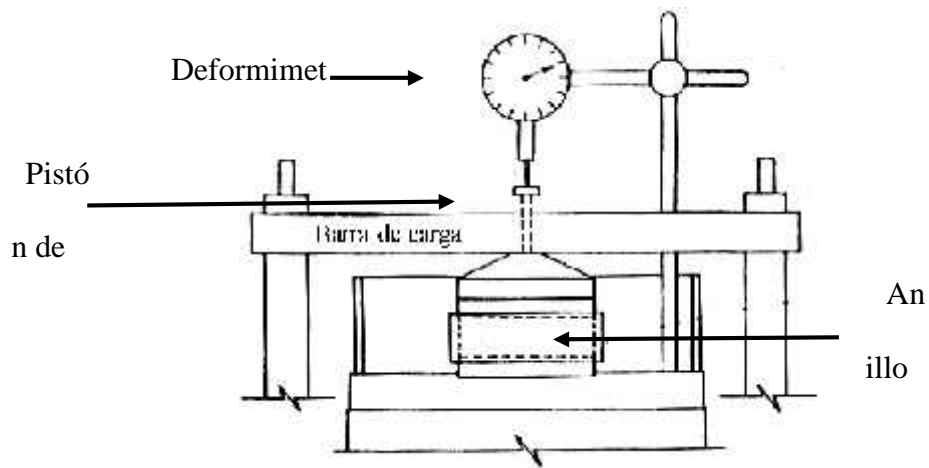


Figura 3. Edómetro

Recuperado de:

http://icc.ucv.cl/geotecnia/11_nuestro_laboratorio/laboratorio/consolidacion/consolidacion.htm

Durante el proceso de consolidación y a partir de la información recopilada por el deformímetro se pueden construir dos curvas, una de estas es la curva de consolidación donde las abscisas representan el tiempo y las ordenadas las deformaciones respectivas para cada instante de tiempo, a continuación, se ilustra una curva típica de consolidación con sus diferentes etapas.

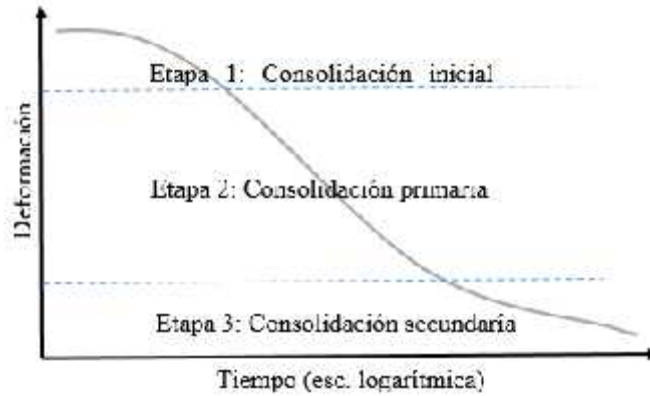


Figura 4. Curva típica de consolidación

Mediante el ajuste en el eje de la abscisa a una escala logarítmica se logra que la curva de consolidación se asemeje fácilmente a la curva teórica y aunque la variedad en suelos arcillosos con alta plasticidad es bastante amplia en la mayoría de ellos existe una concordancia de hasta un 60% ó 70% de consolidación, luego de esto la curva se vuelve asintótica a una recta inclinada respecto a la línea horizontal por el valor del 100% de consolidación de la curva teórica, esta desviación es correspondiente a la consolidación secundaria indican Rodríguez y Badillo “2005”.

La segunda curva que se obtiene es la curva de compresibilidad donde las ordenadas representan la relación de vacíos y las abscisas representan el esfuerzo aplicado correspondiente actuante sobre el espécimen, a continuación, se ilustra una curva típica de consolidación con sus diferentes etapas.

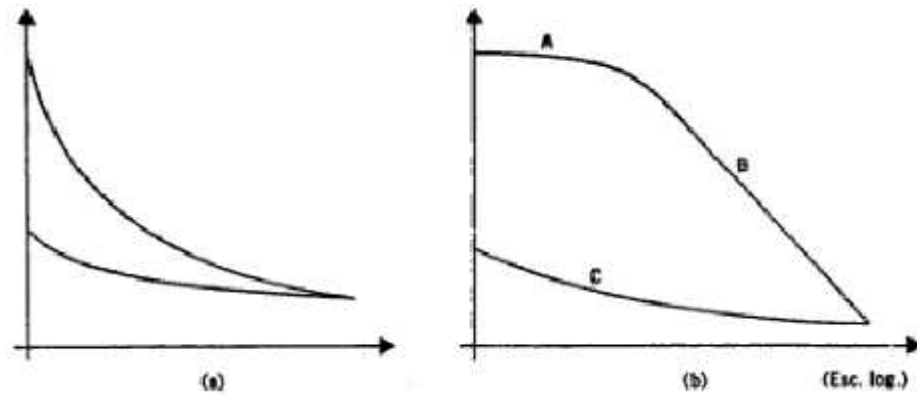


Figura 5. Forma típica de la curva de compresibilidad en suelos compresibles
 (a) Representación Aritmética
 (b) Representación semilogarítmica

Fuente: Editado de mecánica de suelos, J. Badillo y R. Rodriguez

Cuando el suelo extraído a una cierta profundidad es ensayado en el laboratorio los resultados obtenidos de esfuerzo Vs deformación se obtiene la gráficamente la figura 6a, pero luego de aplicar el logaritmo al esfuerzo en el eje de las abscisas, se puede obtener una gráfica más sencilla de interpretar (figura 6b), la cual esta seccionada en los tramos A, B, C, el tramo A denominado como tramo de Re-compresión tiene un comportamiento curvo, que inicia casi horizontal y con una curvatura progresiva hasta unirse con el tramo B, denominado como tramo virgen que es aproximadamente recto en la mayoría de los casos y con el cual se concluye el proceso de carga de la prueba en donde se aplica el máximo incremento de carga correspondiente a la máxima presión de sobre carga de la muestra, es muy común que luego de este punto la muestra sea sometida a un proceso de descarga, este corresponde al tramo C denominado como tramo de descarga, durante el proceso se realizan decrementos de carga en intervalos de tiempos adecuados para que la velocidad con la que el suelo tiende a recuperarse sea aproximadamente cero. Los nombres asignados a estos tramos son debido a que durante el ensayo suceden dos casos particulares, uno de estos resulta de aplicar a la muestra presiones menores a la presión de

sobrecarga efectiva máxima que el suelo ya ha soportado en su historia geológica, generando una pequeña cantidad de compresión en lo que corresponde al tramo A y el segundo caso es cuando las presiones aplicadas a la muestra son mayores que la presión de sobrecarga efectiva máxima, indicando que nunca antes el suelo las había soportado en su historia geológica y generando que el cambio en la relación de vacíos sea mayor, este caso corresponde al tramo recto con una pendiente inclinada B indican Rodríguez y Badillo “2005”.

A partir de la curva de consolidación se obtiene un coeficiente consolidación (c_v), que expresa la velocidad de consolidación y de la curva de compresibilidad de obtienen el coeficiente de compresibilidad (a_v) que es la pendiente de la recta tangente a la curva, el coeficiente de compresibilidad volumétrico (m_v) obtenido a partir de (a_v) y el índice de compresión (cc).

2.5 Pre consolidación de suelos

“La superficie terrestre cambia continuamente. La roca se desintegra y se descompone, es desplazada a zonas de menor elevación por la gravedad y es transportada por el agua, el viento o el hielo. De este modo se esculpe el paisaje físico de la Tierra.” Mencionan Tarbuck y Frederick “2005”.

Estos ciclos geológicos generan procesos de carga y descarga de las capas de suelo; el transporte, acumulación y desplazamiento de capas del mismo por los efectos mencionados hacen que se presente un esfuerzo máximo al que haya sido sometido un estrato de suelo en toda su historia geológica. Este esfuerzo es conocido como esfuerzo de preconsolidación y tiene gran importancia especialmente en el caso de suelos sedimentarios. Cuando un suelo se encuentra

actualmente sometido a un esfuerzo inferior al máximo presentado en su historia, se dice que este suelo está pre consolidado o sobre consolidado.

Este esfuerzo de pre consolidación, asociado a una carga máxima de pre consolidación, juega un papel fundamental en la mecánica de suelos ya que marca un límite en el comportamiento de las gráficas esfuerzo-deformación y esfuerzo-relación de vacíos, al igual que en la determinación del coeficiente lateral de presión de tierras (K_0) de gran importancia al momento de calcular los esfuerzos laterales cuando se pretende diseñar y construir estructuras con cimentaciones profundas indican Rodríguez y Badillo “2005”

Los más significativos procesos geológicos que causan estos ciclos de carga y descarga son asociados con trayectorias de cargas iniciales y descargas por efecto de procesos erosivos (remoción de material por algún agente geológico), desecación (procesos de pérdida de humedad) con profundizaciones del nivel freático y descargas antrópicas realizadas por el hombre (excavaciones), para el caso de construcción de cimentaciones Relación de sobre consolidación menciona Hebenly “2001”.

Rodríguez y Badillo “2005”; Hebenly “2001” muestran que la relación de sobre consolidación (RSC) es el cociente entre el esfuerzo de pre consolidación (el máximo en su historia geológica) de un suelo y el esfuerzo horizontal efectivo en el momento de realizar el estudio.

Los valores que toma este consiente varían de la siguiente manera:

RSC: 1; significa que el suelo actualmente se encuentra sometido a un esfuerzo equivalente al máximo que haya sufrido históricamente.

RSC>1, el valor del esfuerzo efectivo horizontal actual es inferior al máximo soportado hasta ahora en su historia geológica.

RSC<1, este caso no se presenta comúnmente y cuando lo hace implica la existencia de depósitos recientes en los cuales el suelo no ha llegado a un equilibrio, el suelo está en proceso de sobre consolidación

2.6 Tipos de arcillas

Debido a que todos los suelos tienen una historia geológica diferente, estos, al ser analizados a una determinada profundidad se encontrará que están sometidos a cierta presión efectiva, la cual puede ser igual o mayor que la presión de sobrecarga existente en el tiempo de muestreo, por lo que en un ensayo de consolidación se presentan dos casos relacionados con la presión efectiva y la relación de vacíos, como se explicó en el numeral 2.4 mediante las gráficas que se obtienen de un ensayo de consolidación, razón por la cual es necesario realizar ensayos de carga y sobrecarga en el laboratorio con el fin de exceder la presión de sobrecarga efectiva máxima, y de esta manera obtener el estado de carga al cual ha estado sometido el suelo en su historial geológico, con el fin de identificar si el suelo es normalmente consolidado o pre-consolidado.

2.6.1 Arcillas normalmente consolidadas

Cuando se habla de arcillas normalmente consolidadas se interpreta que el suelo en su historia geológica ha estado únicamente en un proceso carga, esto quiere decir que las alteraciones en las condiciones del terreno no han disminuido la carga a la cual ha estado sometido la arcilla, pero estas alteraciones si han aumentad las cargas con el tiempo, de ahí que las presiones efectivas existentes sean menores a la presión máxima efectiva a la cual la arcilla ha estado sometida, en términos matemáticos la relación de pre consolidación tiene que ser mayor a 1 (RSC>1), donde RSC es la relación entre el esfuerzo de pre-consolidación de un espécimen (σ'_p) y el esfuerzo efectivo horizontal presente (σ_o). Esto caso se da principalmente en arcillas blandas compresibles como indican Hebenly “2001” y Torrado; Rondón “2013”.

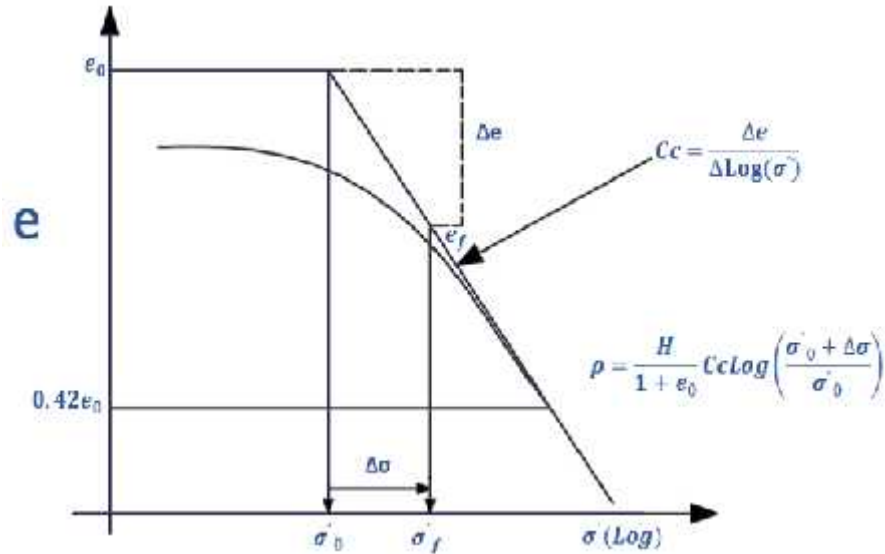


Figura 6. Suelos Normalmente Consolidados

Fuente: Diapositivas clase mecánica de suelos, C. Hebenly

2.6.2 Arcillas Pre-consolidadas

Rodríguez y Badillo “2005” mencionan que cuando se habla de arcillas pre-consolidadas se interpreta que el suelo en su historia geológica ha estado sometido a ciclos de cargas, por lo que las presiones efectivas existentes son mayores a la presión máxima efectiva a la cual la arcilla ha estado sujeta, en términos matemáticos la relación de pre consolidación tiene que ser igual a 1 (RSC=1), este se evidencia en arcillas duras poco compresibles, por ejemplo cuando el suelo es afectado por la erosión, descenso del nivel freático o desecación, en este caso se pueden obtener dos casos en la curva de consolidación que se relacionan con los esfuerzo aplicados.

Caso 1: $\Delta\sigma < \sigma'_p - \sigma'_0$

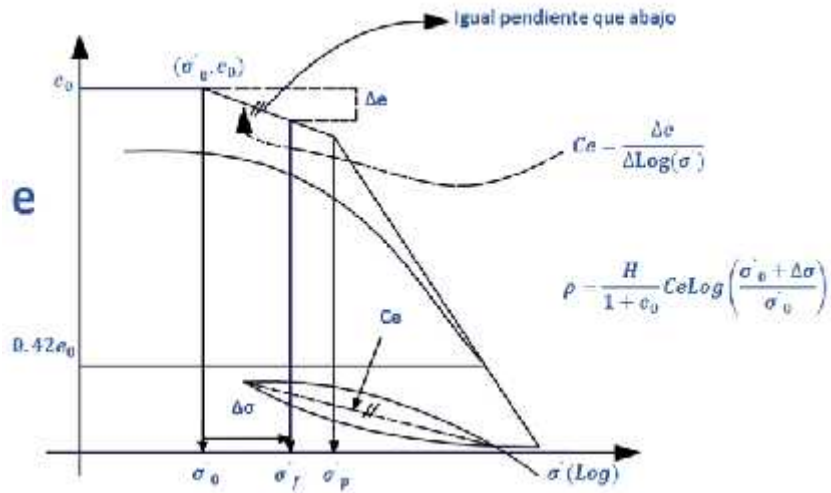


Figura 7. Caso 1 Suelos Pre-consolidadas

Fuente: Diapositivas clase mecánica de suelos, C. Hebenly

Caso 2: $\Delta\sigma > \sigma'_p - \sigma'_0$

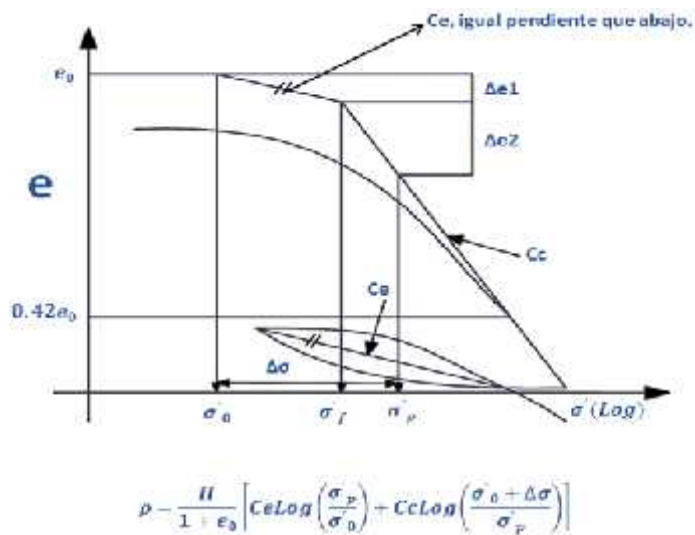


Figura 8 Caso2. Suelos Pre-consolidadas

Fuente: Diapositivas clase mecánica de suelos, C. Hebenly

2.7 Tipos de asentamientos

Una vez estudiada la definición y teoría de la consolidación es importante entender que esta no se presenta de igual forma en todos los tipos de suelos, así por ejemplo los asentamientos que se presentan en los materiales estructurales, en los cuales las relaciones esfuerzo deformación han sido ampliamente estudiadas y definidas en laboratorios con considerables grados de confianza y en cuyos casos, la deformación no implica cambios de volumen; caso contrario ocurre en los suelos, en los cuales el proceso de consolidación puede tomar tiempos muy variados, y pueden presentarse asentamientos mucho tiempo después de haberse construido la estructura, asentamientos que de no ser considerados durante el proceso de diseño y construcción pueden llegar a generar daños severos a las estructuras sobre ellos erguidas.

Cuando una muestra de suelo sufre deformaciones en las cuales existe un cambio en la posición de las partículas, pero el volumen de la misma permanece constante, se dice que la muestra está experimentando una distorsión o deformación desviadora. Los procesos reales de deformación de una muestra de suelo sometidos a esfuerzos pueden dividirse en una componente volumétrica de la deformación y otra de tipo desviadora, de esta manera el fenómeno real se genera a partir de la suma de las dos componentes Rodríguez y Badillo “2005”.

La concepción de estos fenómenos en mecánica de suelos se fundamenta en la explicación de una realidad observada, que se ajuste matemáticamente a una teoría previamente elaborada y en la cual las teorías dudosas o de poca credibilidad no tienen lugar. Pero en este caso, las relaciones esfuerzo deformación no se deben ajustar a modelos matemáticos elaborados, puesto que no hay uno que sea lo suficientemente infalible como para confiarle una verdad absoluta, pero lo que sí se espera es la reproducción fiel de una realidad y que, aunque esta no se cumpla en su totalidad si permanezca “lo sano del criterio”.

2.7.1 Consolidación unidireccional

Cuando la consolidación de un suelo se da de forma que las partículas sufren un cambio en su posición relativa en el sentido vertical pero no horizontal, se dice que este es un asentamiento unidireccional, como en el caso de un depósito de materiales suaves depositados en el lecho de una masa de agua como por ejemplo un lago, en la cual se puede notar una reducción en el volumen del suelo por causa de las cargas que se van incrementando sobre este. En este caso se puede evidenciar fácilmente que, aunque la muestra de suelo ha sufrido una deformación vertical, es decir un reacomodo de sus partículas en este sentido, horizontalmente no se notan cambios significativos en la posición de las mismas, tanto así que este tipo de deformaciones puede tomarse como nulo.

Que se llegue a dar este comportamiento depende de varios factores, como por ejemplo que la capa de arcilla sea considerablemente delgada con respecto a su dimensión horizontal, o si es de espesor considerable, que contenga varias capas delgadas de arena dentro de sí. En este caso los desplazamientos laterales de las partículas de la muestra se consideran despreciables en comparación con los desplazamientos verticales. Las características de la consolidación pueden estimarse con un mayor grado de confiabilidad en el laboratorio siempre y cuando se altere lo menos posible la toma de muestras Rodríguez y Badillo “2005”.

2.7.2 Consolidación primaria

El proceso se debe a la reducción gradual del volumen de vacíos por eliminación de agua, bajo esfuerzos efectivos variables generados cuando es cargado el suelo, es un cambio lento provocado por los esfuerzos de compresión bajo la influencia de las presiones de poro que resisten una reducción más rápida de volumen, en donde se transfiere la carga soportada por el agua al esqueleto mineral, durante este proceso aumenta la superficie de contacto entre las partículas lo que implica un aumento en la densidad del suelo como mencionan Poliotti y Sierra “2007” ; Hebenly “2001” .

2.7.3 Consolidación secundaria

Poliotti y Sierra “2005” ; Rodríguez y Badillo “2001” mencionan que este proceso se da por reajuste del esqueleto mineral que se produce por la acción de una carga permanente, la causa, es la reducción gradual de volumen del suelo que se va generando lentamente bajo esfuerzos efectivos constantes, tendiendo a estados más compactos y que suelen ser deformaciones (diferidas en el tiempo) irrecuperables, debido a que la estructura interna ha absorbido gran parte del agua del suelo en donde la carga está casi toda soportada por este y no por el agua, esta fase no necesariamente comienza cuando las presiones de poro se vuelven aproximadamente cero sino que se puede dar de manera simultánea, pero suele ser menos importante que la primaria en función de los cambios de volumen que genera.

2.8 Parámetros de consolidación

Rodríguez y Badillo “2005”; Poliotti y Sierra “2007”; Torrado y Rondón “2013; Hebenly “2001” destacan en sus textos que los parámetros de consolidación más importante que se obtienen de un ensayo de consolidación permiten analizar y determinar las condiciones en las que se encuentra el suelo, estos coeficientes son:

) Coeficiente de pre-consolidación (av)

Esta dada como la pendiente de la recta tangente a la curva de compresibilidad, midiendo la razón de variación de la relación de vacíos con la presión en escala aritmética, como se ilustra a continuación:

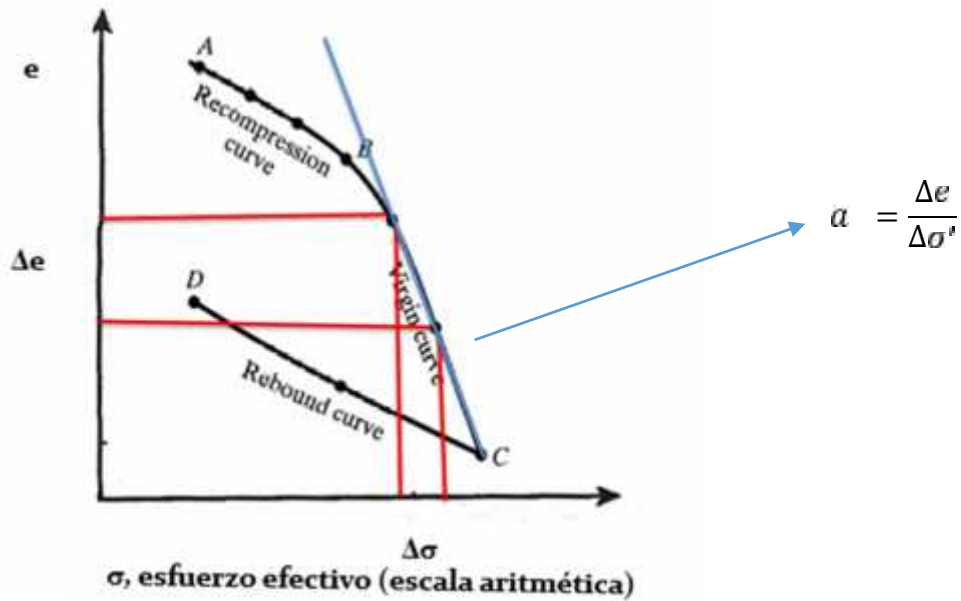


Figura 9. Coeficiente de pre-consolidación a_v

Fuente: Diapositivas clase mecánica de suelos, C. Hebenly

Este valor muestra que tan susceptible es el suelo que se está estudiando, en el caso de obtener valores altos de a_v , se entiende que las presiones actuantes sobre el suelo generaran cambios de volumen altos, lo que lo convierten en un suelo muy compresible, pero si se obtienen valores bajos se entiende que el suelo tendrá cambios de volumen muy bajos, cuando se hace variar la presión a la que ha estado sometido.

) **Coeficiente de consolidación volumétrica (m_v)**

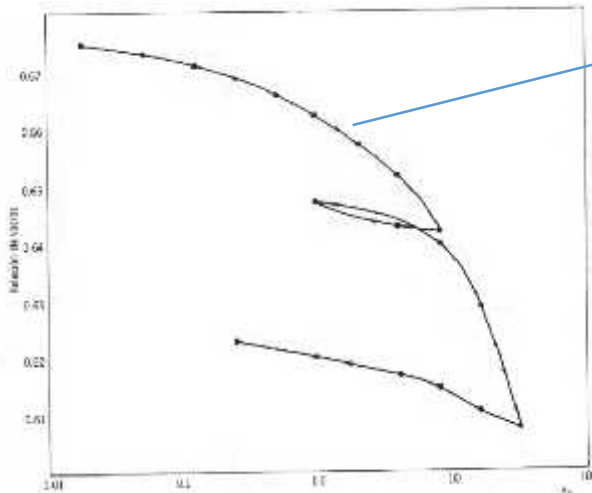
También conocido como módulo edométrico, el cual físicamente expresa la compresibilidad del suelo (a_v) por el proceso de carga, relacionándola con su volumen inicial e_c que se da antes de que el suelo este sometido al proceso de consolidación mediante la aplicación del incremento de carga, cuando se utiliza la curva de esfuerzo-deformación unitaria. la pendiente de la secante es igual a:

$$M_v = -\frac{a}{1 + e_c}$$

) **Índice de compresibilidad o compresión (Cc)**

Es un valor dependiente de la estructura del suelo y de su historia de esfuerzos, el cual se obtiene a partir de la curva de compresibilidad en escala semi-logaritmica y define las características de esfuerzo-deformación del suelo, relacionando cuanta consolidación o asentamiento tendrá lugar el suelo, que puede ser la pendiente de la recta de la curva de carga o descarga y se calcula mediante la siguiente formula.

$$C_c = \frac{e_i - e_{i+1}}{L \left(\frac{\sigma'_{i+1}}{\sigma'_i} \right)}$$



Donde cada una de las variables representa:

ei= relación de vacíos para un estado.

i= Esfuerzo transmitido al suelo para un estado.

Figura 10. Índice de compresibilidad Cc

Fuente: Diapositivas clase mecánica de suelos, C. Hebenly

Debido a que el valor del índice de compresibilidad (Cc) varía de acuerdo con las características del suelo, se destacan dos casos en particular descritos a continuación:

) **Calculo de C_c para suelos normalmente consolidados**

Para suelos normalmente consolidados la variación entre las deformaciones y las presiones transmitidas al suelo se conoce generalmente como curva virgen de compresibilidad como se ilustra en la figura 12, la cual intercepta la curva de consolidación en laboratorio cuando la relación de vacíos es de 0.42 de la relación de vacíos de un suelo en el campo ($0.42e_u$).

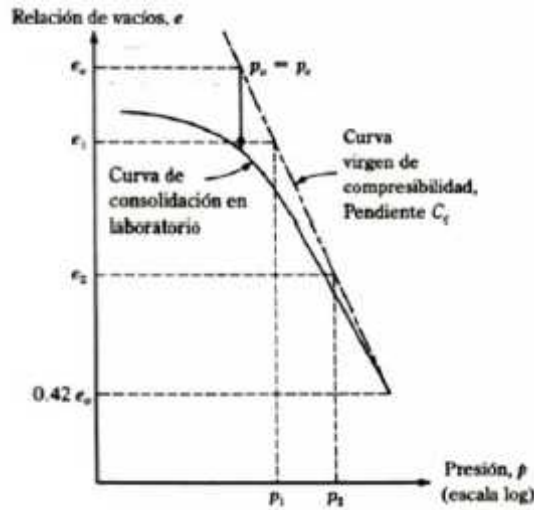


Figura 11. C_c para suelos normalmente consolidados

Fuente: Diapositivas clase mecánica de suelos, C. Hebenly

Otros autores han obtenido diferentes maneras de calcular el índice de compresibilidad, uno de estos fue Skempton quien planteo la siguiente correlación empírica para arcillas inalteradas normalmente consolidadas conociendo únicamente el limite liquido de la arcilla analizada.

$$C_c = 0.009(L - 10)$$

) **Calculo de C_c para Suelos pre-consolidados**

En el caso de los suelos pre-consolidados para obtener el índice de compresibilidad resulta necesario seguir unos pasos ya definidos que consisten en obtener una línea aproximadamente paralela a la curva de descarga obtenida en el laboratorio, como se ilustra en la figura 13 en donde la pendiente de la línea ab tiende a ser la pendiente de la línea dc.

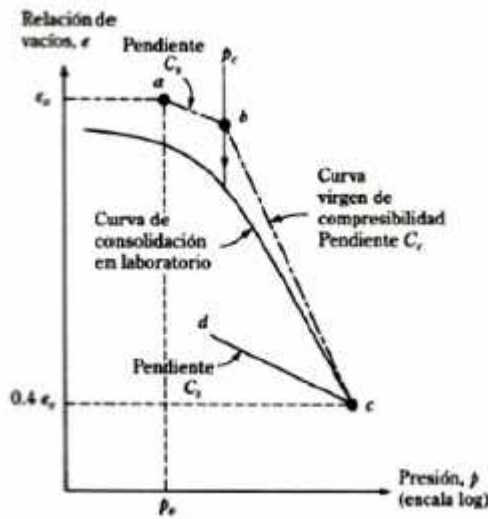


Figura 12. C_c para suelos Pre-consolidados

Fuente: Diapositivas clase mecánica de suelos, C. Hebenly

Otras correlaciones empíricas que se han obtenido para calcular el índice de compresibilidad para el caso de las arcillas sobre consolidadas conociendo únicamente el porcentaje contenido de agua (w) o la relación de vacíos (e_0) presentes en el suelo son:

$$C_c = 0.0054 (2.6w - 35)$$

$$C_c = 0.54(e_0 - 0.35)$$

) **Coefficiente de consolidación (c_v)**

El coeficiente de consolidación vertical indica la velocidad a la cual el estrato se está deformando respecto a un área cuando es sometido a presión. Es decir, es un indicador de

la forma como el suelo se está comportando bajo la aplicación de cargas respecto a un tiempo, además de que no es constante durante la consolidación y depende de la sobrecarga y conductividad hidráulica del suelo, dos de los métodos más utilizados para determinar este coeficiente son:

✓ Método de Casagrande

Casagrande presento un método gráfico, que es obtenido de un ensayo de consolidación, del cual se hace uso del grado de consolidación U_v (%) en función del tiempo en escala logarítmica, que es representada como la curva teórica de consolidación, de la cual se calcula la deformación correspondiente al 0% y al 100% de la consolidación primaria (d_0 y d_{100}), seguido de esto se determina la deformación correspondiente al 50% (d_{50}) de la consolidación y el tiempo en el que esta se desarrolla, así de esa manera se podrá hallar el factor de tiempo T (T_{50}) obtenido de la curva teórica y de acuerdo a las condiciones de drenado utilizadas durante el ensayo.

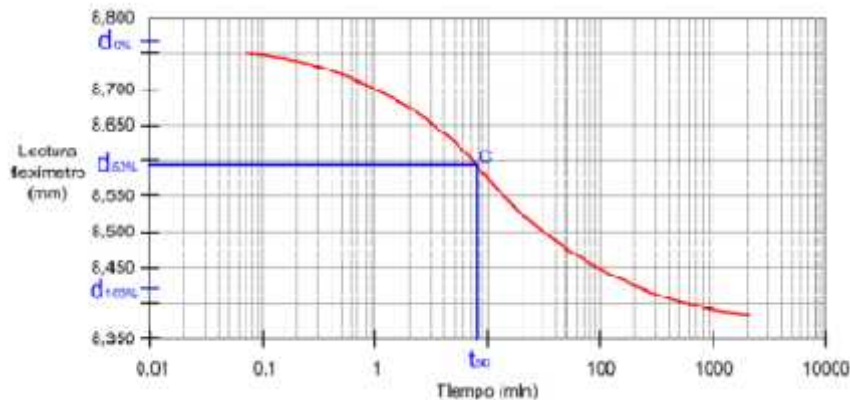


Figura 13. Coeficiente compresibilidad método Casagrande

✓ Método de Taylor

Taylor presento un método gráfico para obtener el coeficiente de consolidación a partir del tiempo requerido para el 90% de la consolidación, que se halla a partir de la curva de deformación en función de la raíz cuadrada del tiempo \sqrt{t} .

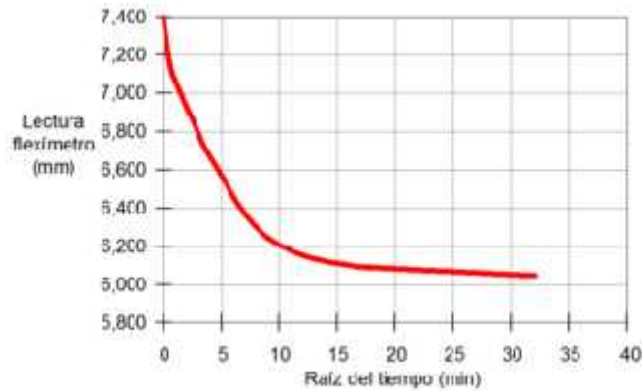


Figura 14. Coeficiente compresibilidad método de Taylor

Ambos autores hacen uso de la siguiente ecuación con la diferencia que cada uno aplica un tiempo de consolidación distinto como ya se mencionó en sus métodos de acuerdo a los textos de Poliotti y Sierra “2007”; Torrado y Rondón “2013”.

$$C_v = \frac{T * H^2}{t}$$

Donde cada una de las variables representa:

T = Es el factor tiempo, cuyo valor es 0,197 para un tiempo de consolidación del 50%, y 0,848 para un t=90%.

H = Longitud para el máximo camino de drenaje durante un incremento de carga dado. Si la muestra es doblemente drenada, el valor de H será la mitad de la altura de la misma.

t = Tiempo para el correspondiente factor de tiempo, obtenido de la curva de consolidación.

2.9 Casos Importantes de Consolidación

La inclinación de la torre de Pisa, en Italia es un muy conocido ejemplo de lo que puede pasar si no se tienen en cuenta los efectos que puede traer el no tener en cuenta un fenómeno tan importante como lo es la consolidación, es la torre inclinada de Pisa, emblemático icono de Italia y cuyo proceso de construcción debió interrumpirse en varias ocasiones debido a la inclinación progresiva que ha sufrido.

Otro conocido caso en el que la consolidación evidencia su gran importancia es en la Basílica de Guadalupe, Ciudad de México, en donde hay partes que han sido construidas con hasta casi 100 años de diferencia entre sí, y por condiciones diferentes en el sub suelo, roca y depósitos de arcilla de 18m de espesor, que han generado asentamientos diferenciales de más de 2.10m; estos fenómenos han provocado procesos de reconstrucción de la cimentación.

Por último, pero no menos importante se tiene la torre de Suurhusen, la torre más inclinada del mundo, por encima de las creencias que se tengan de que ese puesto lo ostentara la torre de pisa, con 3.97° de inclinación en la actualidad. La torre de Suurhusen cuenta con una inclinación de 5.07° recibiendo en noviembre de 2007 un certificado Guinness por esto.

Elaboración del modelo

Este modelo busca representar las fases de consolidación que presenta un suelo al ser cargado, en su primera fase se podrá evidenciar la consolidación primaria en la cual el modelo al ser cargado expulsará el agua contenida en el mismo. En este caso por un orificio ubicado en la parte inferior del modelo y seguido de esto, con un aumento en la carga se podrá evidenciar la consolidación secundaria en donde se reacomodarán las partículas.

2.10 Materiales

Los materiales requeridos para la construcción del modelo a escala que permite representar la consolidación de un suelo con el fin de exponerse en clase y que ofrece al estudiante una observación tridimensional del comportamiento que tienen los suelos al estar sometidos bajo incrementos de carga son:

Lamina de vidrio: Una lámina de vidrio de 6mm de grosor que viene en una presentación con dimensiones de (1.83m X 1.20 m) con la cual se armará la caja rectangular de dimensiones de 30x10x20 cm, y con la que se permitirá ver desde cualquier perspectiva el comportamiento del material al ser consolidado.

Silicona: Para el ensamble de 5 láminas de vidrio que van a formar la caja de acuerdo con el diseño rectangular se utilizará silicona para vidrios lo que permite una mejor adherencia entre las láminas y evita filtraciones en los bordes.

Esferas de poli-estireno: Esferas de poli-estireno con un diámetro de 3 mm, este material simula de manera efectiva el comportamiento de los suelos gracias a su similitud con los materiales que presentan adecuadamente el proceso de consolidación.

Conexión tipo Tee: Conexión tipo Tee de ½” tubería en PVC para agua caliente, que permita el drenaje del fluido y dirigirlo hacia la manguera.

Manguera: Conducto transparente de 15 cm de largo por el cual se medirá la variación del nivel freático al cargar el suelo.

Placa de madera: Placa de madera de 28.8 X 9.8 Cm sobre la cual se aplicará el incremento de carga que consolidará la muestra de suelo uniformemente.

Pesas metálicas: Láminas de acero que se irán colocando sobre la placa de madera ejerciendo un aumento de peso que va a generar el incremento de carga sobre el material.

2.11 Equipos

Para realizar un ensamblaje adecuado del modelo se requieren de los siguientes equipos:

Cortador fletcher: Cortador de vidrios de una buena precisión para cortar vidrios desde 3 mm hasta 20 mm con la cual se realizarán los cortes necesarios a la lámina de vidrio para tener las 5 láminas que conforman la caja rectangular, esta herramienta permite tener unos bordes uniformes y así poder evitar filtraciones de agua por las aristas al no tener una superficie plana.

Taladro: Taladro con una broca que permitirá hacer los orificios en las láminas laterales de la caja con el fin de evacuar el agua al exterior de la caja al momento de que la carga es aplicada al material.

Cinta métrica: Una cinta métrica convencional para realizar las medidas adecuadas en el ensamble del modelo.

2.12 Dimensiones del modelo

Con el fin de obtener una perspectiva visual del modelo inicial se diseñaron los planos bidimensionales y una representación tridimensional del modelo con el cual se pudiera definir el diseño final que tendría, facilitando así el procedimiento de ensamblaje.

2.12.1 Planos en dos dimensiones

En la figura 7 se observan las dimensiones de la caja rectangular que contendrá el material, en donde únicamente las láminas laterales presentan 2 orificios en la parte inferior para la expulsión del agua y las dimensiones de la placa sobre la cual se pondrá la carga que consolide el material uniformemente en toda el área.

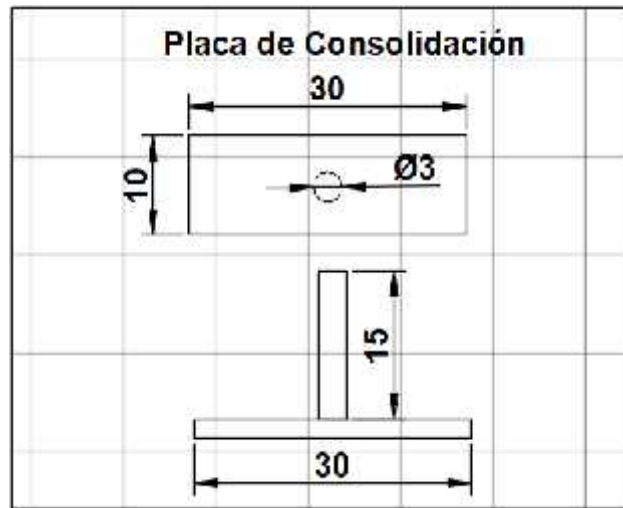


Figura 15. Planos para placa de consolidación, dimensiones en [cm]

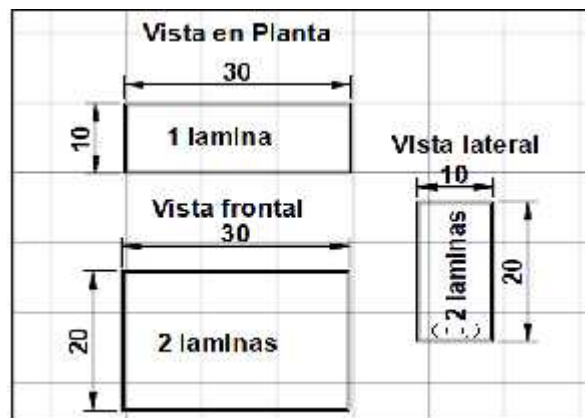


Figura 16. Planos para caja rectangular, dimensiones en [cm]

2.13 Ensamble

2.13.1 Corte de las láminas

Después de haber determinado las dimensiones del modelo se procede a realizar los cortes de las diferentes caras del cubo que va a ser formado, para esto se hace uso del cortador de fletcher. Es necesario seguir las indicaciones de seguridad industrial y salud ocupacional mientras se realizan procedimientos de cuidado como son los cortes.



Figura 17. Corte de lámina de vidrio

A una de las láminas laterales se le realiza una perforación circular en la parte inferior de la lámina, en la cual se añadirá una manguera transparente que indicará la presión a la altura de la perforación, de igual forma este orificio servirá como medio de drenaje.

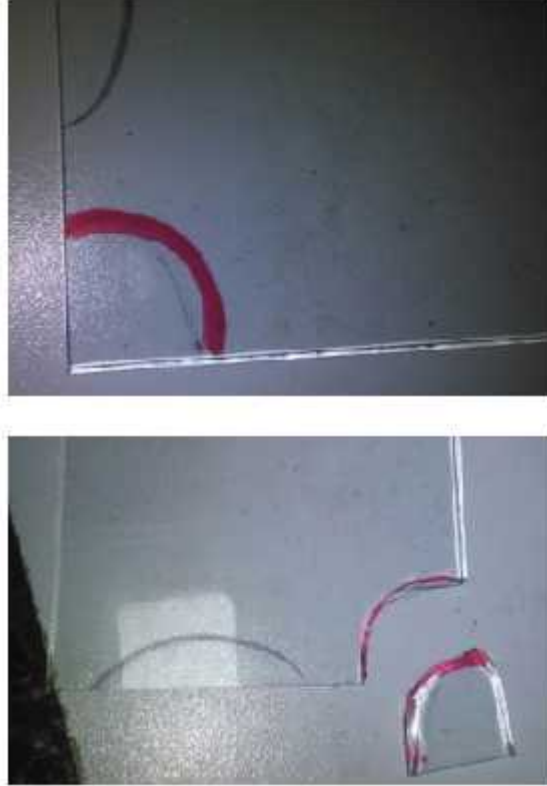


Figura 18. Perforación lamina lateral

2.13.2 Proceso de ensamble

Las superficies de corte deben estar pulidas, limpias y libres de residuos para facilitar el proceso de adherencia entre sí con el uso de silicona; la pulida garantiza un borde uniforme que sumado a una limpieza usando paños humedecidos con thinner, garantiza una superficie libre de impurezas.



Figura 19. Limpieza de las láminas

Deben seguirse rigurosamente las especificaciones establecidas en los diseños en cuanto a las dimensiones y posiciones de las diferentes piezas de manera que el resultado del ensamble final corresponda con el modelo plasmado en los planos garantizando la funcionalidad del mismo.

En el proceso de adherencia de las piezas debe llevarse a cabo usando la silicona, añadiendo la cantidad necesaria para realizar el pegue de forma efectiva por la parte exterior e interior de las aristas de las láminas, lo que garantiza una mejor adherencia y reduce la posibilidad de filtración, teniendo cuidado de no dejar residuos en la superficie de las piezas para mantener estas con una apariencia limpia y uniforme.



Figura 20. Proceso de adherencia

Una vez terminado el proceso de ensamble de la caja, se deja secar un tiempo prudencial al sol que permita que la silicona haga su efecto.

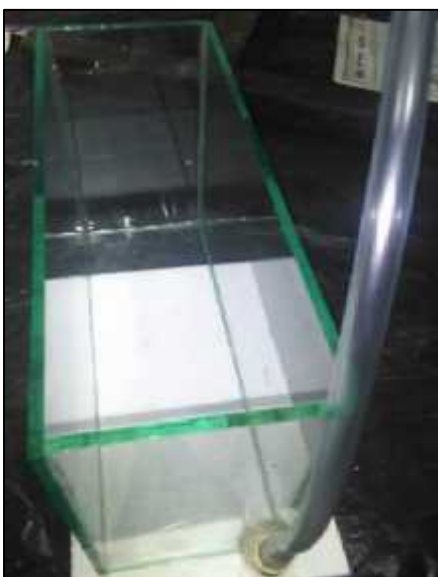


Figura 21. Modelo final

2.14 Prueba del modelo

Para la prueba del modelo se escogió como muestra de suelo esferas de poliestireno, estas serán consolidadas uniformemente por una placa rectangular de madera e inicialmente se generará una carga inicial de 1.2 Kg con el fin de aumentar el nivel freático a una altura visible en la tubería, (ver figuras 12, 13), debido a que las esferas de poliestireno no cuentan con el peso suficiente para aumentar el nivel freático a una altura adecuada.



Figura 22. Condiciones iniciales modelo



Figura 23. Nivel freático condiciones iniciales

Se adicionan las 6 pesas restantes a lado y lado de la placa con el fin de equilibrar las cargas, evitando que uno de los lados quede más cargado que el otro, lo que puede generar un volcamiento de la placa y hacer fallar el proceso, cada una de estas pesas tienen una masa de 650 gramos, de manera que al finalizar el proceso de sobrecarga se adicionaron 5.2 Kg, con un total de 8 pesas.



Figura 24. Modelo con sobrecarga

Debido a que en las condiciones iniciales el fluido no tiene ningún medio para ser drenado, la sobrecarga genera un aumento en el nivel freático, que para el caso ilustrado es de 6 cm (ver figura 15).

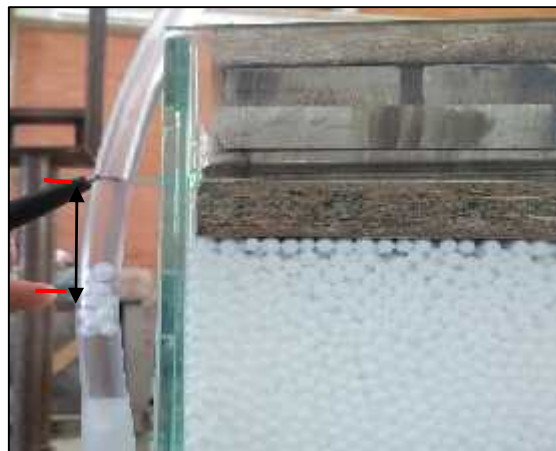


Figura 25. Nivel Freático con la sobrecarga

Para comprobar la funcionalidad del modelo se retiran las cargas y se verifica que el nivel freático vuelva a las condiciones iniciales, esto da un indicio que el modelo se comporta adecuadamente.



Figura 26. Retiro de las cargas



Figura 27. Nivel freático luego de quitar la sobrecarga

Luego de verificar la funcionalidad del modelo se vuelve a sobrecargar el suelo y seguido de esto se abre la válvula para drenar el agua contenida en la caja, haciendo que las esferas de

poliestireno soporten ahora los esfuerzos generados por la sobrecarga más los esfuerzos iniciales a los cuales se sometió.



Figura 28. Drenaje del modelo

ELABORACIÓN DE UNA ANIMACIÓN ILUSTRADA

Para la representación tridimensional, se hizo uso de herramientas computacionales con los cuales se logró generar la animación del proceso de consolidación de una muestra de suelos. A continuación, se ilustran dos vistas el modelo digital (ver figura 19).



Figura 29. Representación tridimensional del modelo

Para la animación de este modelo luego de haber depositado la muestra del suelo en el modelo y el fluido incompresible, en este caso agua, se modelan las condiciones de un terreno natural.

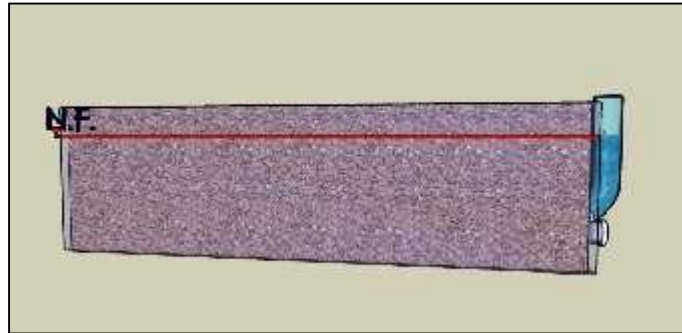


Figura 30. Depósito de la muestra y fluido incompresible

Al aplicar una carga uniforme en la (ver Figura 21), se logra evidenciar un incremento en el nivel del agua de la tubería (ζ_{Hi}), el cual es asociado a un incremento de esfuerzo generado por la aplicación de la carga en una misma cuantía.

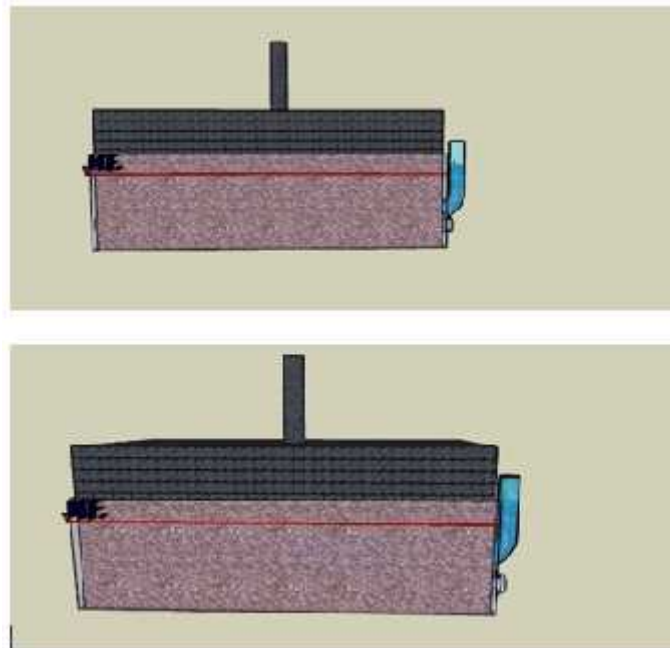


Figura 31. Aplicación de carga

Al momento de retirar los corchos de los orificios, permitiendo salir al fluido incompresible, que simula en el caso de un ensayo de consolidación el drenaje de agua por la cara más porosa, durante este instante de tiempo se evidencia el descenso del agua en la tubería, al mismo tiempo que se va generando un asentamiento o consolidación de la muestra, debido a la reacomodación de las partículas y la expulsión de agua.

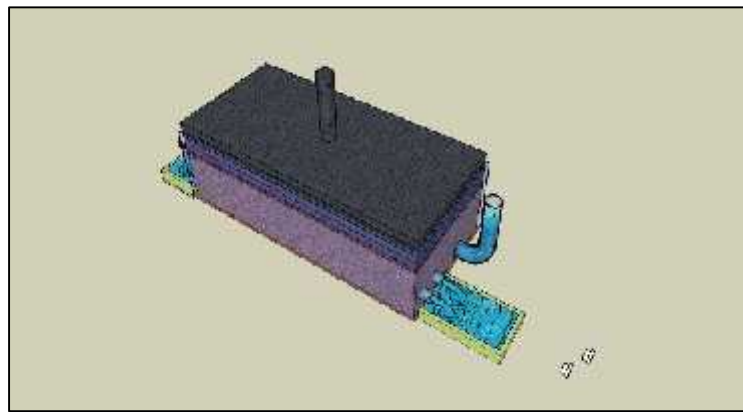


Figura 32. Drenaje del agua

Finalmente, el fluido incompresible es drenado y la muestra de suelo es consolidada, dando como resultado que el esfuerzo total al cual está sometido ahora el suelo está dado por el esfuerzo inicial del suelo más el esfuerzo generado por la sobrecarga aplicada.

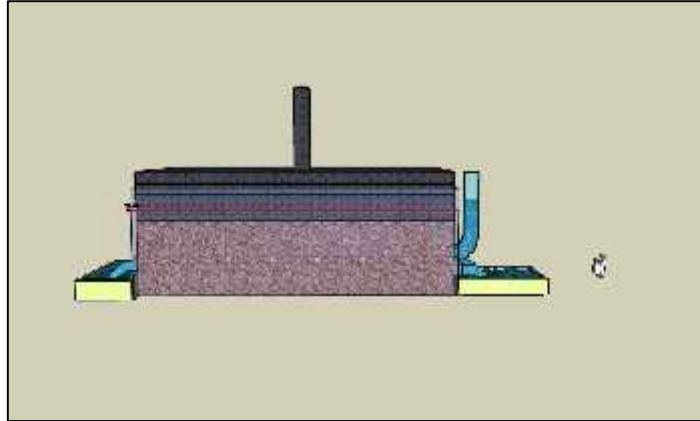


Figura 33. Consolidación de la muestra

3. Conclusiones

La elaboración de un modelo como el abordado durante este proyecto se constituye como un adelanto en la metodología de enseñanza que permite facilitar la adquisición de conceptos propios de asignaturas en las cuales los fenómenos estudiados presenten cierta dificultad de comprensión.

Contar con más modelos de este tipo para las diferentes asignaturas ya sean de la escuela de ingeniería civil o de otras escuelas en la Universidad Industrial de Santander, se constituiría como una oportunidad para que los estudiantes de las diferentes carreras fortalecieran sus capacidades creativas y conceptuales tanto al utilizar este tipo de modelos durante su proceso de formación como en el eventual proceso de creación de uno.

Un modelo a escala facilita la adquisición de conceptos de una manera práctica y dinámica ya que permite observar de una manera más palpable diferentes fenómenos que se presentan en campo y que no son tan sencillos de explicar por medio de una clase magistral o un dibujo en un tablero de clase tradicional.

Implementar más frecuentemente el uso de modelos físicos y/o digitales como los abordados y elaborados durante el desarrollo del presente proyecto es una alternativa eficaz de enseñanza que impulsa el proceso de enseñanza-aprendizaje que se lleva a cabo no solo en el curso de mecánica de suelos, sino también en las diferentes escuelas de las carreras ofrecidas por la Universidad Industrial de Santander.

Citas Bibliográficas

- 1) J. A. Tristancho, "Modelamiento físico en geotecnia aplicado a la docencia", ACOFI, vol. 12, no. 23, pp.109-114, Feb.2017
- 1) Tristancho-Ortiz, J. A. Modelamiento físico en geotecnia aplicado a la docencia. Revista Educación en Ingeniería 12 (23) 109-114, febrero, 2017.

LIBRO

- 2) M. Poliotti, P. Sierra, "Consolidación unidimensional de suelos", Universidad Nacional del Rosario FCEIA, 2007.
- 3) L. M. Torrado, J.A. Rondón, "consolidación unidimensional", INGEAS S.A.S, mayo, 2013.
- 4) E. J. Tarbuck, F. K. Lutgens. "Ciencias de la Tierra Una introducción a la geología física", Universidad Autónoma de Madrid: Pearson, 2005.

Tesis

- 1) E. G. Pinzón, "COMPORTAMIENTO VISCO-PLÁSTICO DEL SUELO EN PRUEBAS DE CONSOLIDACIÓN A VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO CONSTANTE, APLICADAS A LA DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD", disertación en Maestro en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, 2007.
- 2) G. García, "Caracterización Adimensional y Simulación Numérica de Procesos Lineales y No Lineales de Consolidación de Suelos" Disertación en doctor, Universidad Politécnica de Cartagena, DEPARTAMENTO DE Ingeniería Civil, Cartagena, Colombia, 2016.

Referencias

- B. Fernanda, C. Hugo, “Estudio de las Propiedades de Consolidación de Algunos Suelos de Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 2012.
- E. Giovanni, “Comportamiento Visco-Plástico del Suelo en Pruebas de Consolidación a Velocidad de Desplazamiento Constante, Aplicadas a la Determinación de la Permeabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, 2007.
- G. García, “Caracterización Adimensional y Simulación Numérica de Procesos Lineales y No Lineales de Consolidación de Suelos”, Universidad Politécnica de Cartagena. Colombia, Cartagena, septiembre (2016).
- H. Leguizamo, “Consolidación de suelos 1”, Material de clase, 2000.
- H. Leguizamo, “Consolidación de suelos 3”, Material de clase, 2001.
- J. A. Trisancho, “Modelamiento físico en geotecnia aplicado a la docencia”, ACOFI, vol. 12, no. 23, pp.109-114, Feb.2017.
- L. M. Torrado, J.A. Rondón, “consolidación unidimensional”, INGEAS S.A.S, mayo, 2013.
Recuperado de <http://ingeassas.com/docencia.php>
- M. Poliotti, P. Sierra, “Consolidación unidimensional de suelos”, Universidad Nacional del Rosario FCEIA, 2007.
- Rodríguez, R., & Badillo, J. (2005). Fundamentos de la mecánica de suelos. México: Limusa.
- Tarback, E, & Lutgens, F, (2005). Earth: an introduction to physical geology. Madrid: Pearson.