

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Implementación del Ensayo Triaxial CU en el Laboratorio
de Materiales De la Universidad San Francisco de Quito**

Proyecto de Investigación

José Ricardo Jaramillo Sandoval

Ingeniería Civil

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de Ingeniero Civil

Quito, 07 de mayo de 2018

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Implementación del Ensayo Triaxial CU en el Laboratorio de Materiales
de la Universidad San Francisco de Quito**

José Ricardo Jaramillo Sandoval

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Juan Pablo Villacreses,

Firma del profesor

Quito, 07 de mayo de 2018

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: José Ricardo Jaramillo Sandoval

Código: 00111567

Cédula de Identidad: 1714556824

Lugar y fecha: Quito, 07 de mayo de 2018

RESUMEN

El laboratorio de materiales de la Universidad San Francisco de Quito está diseñado para que los alumnos puedan aprender y aplicar conceptos teóricos en ensayos para obtener las propiedades de los materiales y entender su comportamiento. Este proyecto de titulación se enfoca en el acondicionamiento e implementación de una máquina triaxial para realizar el ensayo triaxial consolidado no drenado (CU); se incluye un manual de operación de la máquina, detallado paso a paso la realización de dicho ensayo de una muestra inalterada o remoldada, además incluye una hoja de cálculo para el procesamiento de datos obtenidos durante el ensayo para posteriormente analizar los resultados obtenidos y se presenta también los planos de conexión de la máquina para su mantenimiento o reparación. Se realizó el ensayo triaxial CU sobre un tipo de arcilla cuyo compuesto mineralógico principal es la caolinita y los resultados del mismo fueron comparados con estudios realizados en diferentes universidades para verificar que los datos obtenidos en el laboratorio de la Universidad San Francisco de Quito sean veraces. Una vez implementada y verificado que la máquina triaxial está en completo funcionamiento la Universidad San Francisco de Quito puede realizar con certeza un ensayo triaxial CU sobre muestras de suelos inalteradas o remoldadas.

Palabras clave: *Triaxial, consolidación, muestras inalteradas, muestras remoldadas, arcilla Caolín.*

ABSTRACT

The materials laboratory of the San Francisco University of Quito is designed so that students can learn and apply theoretical concepts in tests to obtain the properties of materials and understand their behavior. This project focuses on the conditioning and implementation of a triaxial machine to perform the consolidated triaxial non-drained (CU) test; it includes a manual of operation of the machine, detailed step by step the realization of said test of a sample undisturbed or remolded of soil, also includes a spreadsheet for the processing of data obtained during the test to later analyze the results obtained. It is also included the planes of connection of the machine for its maintenance or repair. The triaxial CU test was carried out on a type of clay whose main mineralogical compound is kaolinite and the results of it were compared with studies carried out in different universities to verify that the data obtained in the laboratory of the San Francisco University of Quito are true. Once implemented and verified that the triaxial machine is in full operation, the San Francisco de Quito University can perform with certainty a triaxial CU test on undisturbed or traileed soil samples.

Key words: *Triaxial, Consolidation, undisturbed samples, remolded samples, Kaolin.*

TABLA DE CONTENIDO

Derechos de Autor	3
RESUMEN	4
ABSTRACT	5
Índice de Figuras	7
Índice de Tablas.....	9
1. Introducción:.....	10
3. Marco Teórico	12
3.1 Triaxial	12
3.2 Tipos de Triaxiales	13
3.3 Triaxial CU	14
3.3.1 Proceso de Saturación	14
3.3.2 Proceso de Consolidación.....	16
3.3.3 Falla de la Muestra	16
3.3.4 Procesamiento de Datos	17
4. Desarrollo	20
5. Discusión	22
6. Conclusiones	24
7. Recomendaciones	24
8. Referencias y Bibliografía	25
Anexo A: Manual Ensayo Triaxial CU.....	26
Equipos:	26
A. Preparación del Espécimen sin Alterar.	31
B. Método de Preparación Seco.....	32
C. Preparación para la saturación.	41
D. Saturación.....	47
E. Medición del parámetro B.	48
F. Consolidación.	49
Uso del marco de carga:.....	51
Anexo B: Planos de Conexiones.....	56

Índice de Figuras

Figura 3. 1 Esquema de una máquina triaxial. (I.N.V.E 153, 2007).	12
Figura 5. 1 Densidad seca vs. Contenido de humedad	22
Figura 5. 2 Círculos de Mohr Caolín.	23
Figura A. 1: Marco de carga Geotest.	26
Figura A. 2: Medidor de poros.	27
Figura A. 3: Celda triaxial.	27
Figura A. 4: Cap.	28
Figura A. 5: Pedestal.	28
Figura A. 6: Horno de temperatura constante.	28
Figura A. 7: Bomba de presión.	29
Figura A. 8: Columna de control.	29
Figura A. 9: Desaireador de agua.	30
Figura A. 10: Membranas, o-rings, piedras porosas, papel filtro y accesorios para colocar la muestra.	30
Figura A. 11 Llaves de paso de agua desaireador.	32
Figura A. 12 Llaves de paso de vacío desaireador.	32
Figura A. 13: Horno a 230° F.	33
Figura A. 14: Piedras porosas.	33
Figura A. 15: Configuración de manecillas de la columna de control superior.	34
Figura A. 16: Configuración de manecillas de la columna de control inferior.	34
Figura A. 17: Posición de las manecillas de la columna triaxial superior para llenar las buretas.	34
Figura A. 18: Posición de las manecillas de la columna triaxial inferior para llenar las buretas.	35
Figura A. 19: Piedra porosa y papel filtro sobre la base.	35
Figura A. 20: Colocación de la muestra de suelo.	35
Figura A. 21: Tubo de PVC con la membrana.	36
Figura A. 22: Tubo de PVC y membrana luego de generar el vacío entre las dos.	36
Figura A. 23: Base de la cámara triaxial con la muestra de suelo y membrana.	37
Figura A. 24: Colocación y posición de los O rings en el pedestal.	37
Figura A. 25: Colocación y posición de los O rings en el cap.	38
Figura A. 26: Configuración de manecillas de la columna de control superior.	38
Figura A. 27: Configuración de manecillas de la columna de control inferior.	39
Figura A. 28: Posición de las varillas para asegurar.	39
Figura A. 29: Llave de paso de agua.	40
Figura A. 30: Llave de paso de agua de la celda triaxial (Cell Water).	40
Figura A. 31 Celda triaxial con llenandose con agua.	40
Figura A. 32: Acople rápido celda triaxial.	41
Figura A. 33: Configuración de manecillas de la columna de control superior para generar vacío en el cap.	41
Figura A. 34: Configuración de manecillas de la columna de control inferior para generar vacío en el cap.	42

Figura A. 35: Posición de las manecillas superior de la comuna triaxial aplicar la presión y que el agua percole hasta llegar al cap.	42
Figura A. 36: Posición de las manecillas inferior de la comuna triaxial aplicar la presión y que el agua percole hasta llegar al cap.	43
Figura A. 37 : Posición de las manecillas de la columna triaxial superior para llenar las buretas.....	43
Figura A. 38: Posición de las manecillas de la columna triaxial inferior para llenar las buretas.....	43
Figura A. 39 Manecillas de la columna triaxial inferior.....	44
Figura A. 40: Cap purge de la base de la celda triaxial.	44
Figura A. 41: Salida de agua del medidor de presión de poros.	44
Figura A. 42: Configuración de manecillas cerradas de la columna de control superior.	45
Figura A. 43 Posición de las manecillas de la columna triaxial superior para llenar las buretas.....	45
Figura A. 44: Posición de las manecillas de la columna triaxial inferior para llenar las buretas.....	46
Figura A. 45: Posición de las manecillas de la columna triaxial superior abiertas las vías de agua del cap y pedestal.	46
Figura A. 46: Posición de las manecillas de la columna triaxial inferior.....	47
Figura A. 47 Posición de las manecillas de la columna triaxial superior abiertas las vías de agua del cap y pedestal.	47
Figura A. 48: Posición de las manecillas de la columna triaxial superior.....	48
Figura A. 49: Manecillas de la columna triaxial inferior.	48
Figura A. 50: Manecillas de la columna triaxial inferior.	49
Figura A. 51: Celda triaxial en el marca de carga.	49
Figura A. 52: Celda triaxial colocada en el marco de celda y deformimetro en su posición.....	50
Figura A. 53: Botón de prendido marco de carga.....	51
Figura A. 54: Selector de unidades.....	51
Figura A. 55: Selección de velocidad.....	52
Figura A. 56: Posicionar a la celda triaxial.	52
Figura A. 57: Menú con antes de comenzar ensayo.	53
Figura A. 58: Menú para colocar en posición a la celda triaxial.	53
Figura A. 59: Menú para guardar configuración.	54
Figura A. 60: Menú principal.	54
Figura A. 61: Menú de ensayo.....	55
Figura A. 62: Dispositivo digital que indica la carga aplicada.....	55

Índice de Tablas

Tabla 5. 1 Resultados del Caolín en diferentes estudios. 23

Tabla A. 1 Carga máxima y unidades de los equipos..... 31

1. Introducción:

En la mecánica de suelos se estudia la combinación de esfuerzos máximos límites con los que se genera la falla en un suelo. Esta falla ocurre siempre y cuando exista la combinación de esfuerzos normales y de cortantes máximos. Los esfuerzos normales son los que actúan de manera perpendicular al plano que se está analizando, mientras que los esfuerzos cortantes son los que actúan de manera paralela al plano. Para obtener esta combinación de esfuerzos máximos existen varias teorías de falla como la de Rankine, Guest, Coulomb o Mohr. Actualmente se utiliza una teoría combinada de los dos últimos, llamada criterio de falla de Mohr-Coulomb, con la que se puede medir el esfuerzo cortante máximo que puede resistir un suelo en función de un esfuerzo normal que actúa en el plano de falla del mismo. La teoría de Mohr-Coulomb es aplicada para describir el comportamiento mecánico del suelo, esta establece que existe una dependencia tipo lineal entre ambos esfuerzos. El ángulo de fricción y cohesión son dos de las características del suelo que se toman en consideración en esta dependencia lineal de la cual habla el criterio de falla de dicha teoría. La combinación de esfuerzos, el ángulo de fricción y la cohesión son algunas de las características más importantes ya que influyen en el diseño y construcción de cimentaciones, muros y en la estabilidad de taludes, es decir la base de toda estructura. (Juarez y Rico, 1974) La relación entre estos dos esfuerzos se puede definir mediante la ecuación (1):

$$\tau = f(\sigma) \tag{1}$$

Donde τ es el esfuerzo cortante de falla y $f(\sigma)$ es el esfuerzo normal de falla en el plano del suelo. (Juarez et. Rico, 1974)

Coulomb definió la ecuación $f(\sigma)$ para los suelos tomando en cuenta la cohesión y el ángulo de fricción del suelo de la siguiente manera:

$$\tau = f(\sigma) = c + \sigma \tan(\phi) \tag{2}$$

Donde c representa la cohesión del suelo y ϕ representa el ángulo de fricción del suelo. (Juarez et. Rico, 1974)

La ecuación (2) fue utilizada por muchos años hasta que se encontró que los resultados obtenidos no se parecían a lo que pasaba en la realidad. Estaba faltando otro factor que no se estaba considerando ya que la ecuación (2) toma en cuenta esfuerzos principales totales. En 1920, Terzaghi realizó varias investigaciones y añadió otro factor dentro de la ecuación (2). Este factor vendría a ser la presión de poros (u), la cual es generada por el agua que se encuentra contenida en el suelo. (Das, 2014) Por lo que la ecuación (2) se modificó a la siguiente expresión:

$$\tau = c + (\sigma - u) \tan(\phi) \quad (3)$$

Con la ecuación (3) modificada ahora los esfuerzos calculados serán efectivos y no totales. Para obtener las propiedades mecánicas de resistencia de una muestra de suelo se pueden realizar varios tipos de ensayos. El primer ensayo que existió fue el ensayo de corte directo, con el que se realizan varias pruebas con diferentes valores de esfuerzos normales para obtener varios puntos dentro de la gráfica de esfuerzos normales versus esfuerzos cortantes. La unión de estos puntos es la recta de la ecuación (2) tomando en cuenta que en este tipo de ensayo no se considera la presión de poros. Este primer ensayo ha sido reemplazado por los ensayos triaxiales. Existen tres tipos de ensayos triaxiales: no consolidado no drenado (UU), consolidado no drenado (CU) y consolidado drenado (CD). (Juarez y Rico, 1974) En este proyecto nos concentraremos en uno de los ensayos triaxiales: ensayo triaxial CU, implementado en el laboratorio de materiales de la Universidad San Francisco.

2. Objetivos

Este proyecto de titulación tiene como objetivo general la implementación del ensayo triaxial consolidado no drenado en el laboratorio de materiales de la Universidad San Francisco de Quito. Además, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Obtener los parámetros que influyen en la resistencia de una muestra de suelo.
- Realizar un manual detallando paso a paso todas las etapas del ensayo CU utilizando los equipos del laboratorio de materiales.
- Realizar una hoja de cálculo para el procesamiento de los datos obtenidos durante el ensayo.

- Realizar los planos de conexiones de la máquina triaxial para su mantenimiento o reparación de alguna pieza.

3. Marco Teórico

3.1 Triaxial

Hoy en día, los ensayos más utilizados en laboratorios, para determinar la ecuación (3) de una muestra de suelo, son los ensayos triaxiales. En este tipo de ensayo se puede controlar los esfuerzos que se aplican en las tres direcciones a la muestra; realizando de esta manera un estudio más completo de la resistencia del suelo. La máquina triaxial esta principalmente conformada por la columna de control triaxial, celda triaxial y un marco de carga. La columna de control triaxial está conectada a un compresor que proporciona agua, presión y vacío a la celda triaxial, confinando de esta manera la muestra de suelo. La muestra de suelo generalmente es cilíndrica y está aislada mediante una membrana impermeable, a la cual se le aplican esfuerzos principales en todas sus direcciones (σ_1, σ_2 y σ_3). La celda triaxial es colocada en un marco de carga para poder aplicar un esfuerzo desviador a la muestra hasta la falla. De los ensayos triaxiales se obtienen los siguientes resultados: gráfica de esfuerzo-deformación unitaria y un círculo de Mohr para cada estado de carga que se aplicó el momento de consolidar a la muestra de suelo. A los círculos de Mohr que se obtienen se traza una recta tangente a los mismos. A partir de la ecuación de esta recta se obtiene el ángulo de fricción, el valor de cohesión y la combinación de esfuerzos normales y cortantes de falla. (Juarez y Rico, 1974) A continuación en la figura 3.1.1 se muestra un esquema básico de una máquina triaxial.

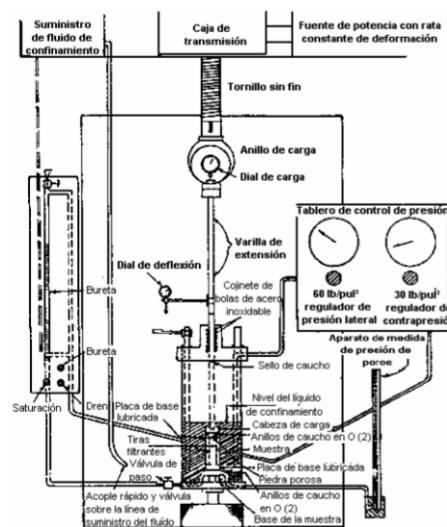


Figura 3.1. Esquema de una máquina triaxial. (I.N.V.E 153, 2007).

3.2 Tipos de Triaxiales

Como se mencionó anteriormente existen tres tipos de ensayos triaxiales. La diferencia entre cada uno de estos tipos de ensayos se basa en las condiciones aplicadas, durante el ensayo, a las muestras de suelo. Las muestras de suelo que se pueden ensayar con estos métodos pueden ser inalteradas o compactadas a las densidades deseadas en el laboratorio para obtener sus propiedades mecánicas, a continuación se presentan los diferentes tipos de triaxial:

Triaxial no consolidado no drenado (UU): En este tipo de ensayo, como su nombre lo dice, no permite la consolidación de la muestra. Tampoco permite la entrada o salida de agua, ya que las válvulas permanecen cerradas en todo momento. Por lo tanto la muestra nunca llegará a pasar por un proceso de saturación. Como no está permitido el paso o salida de agua no se toma en cuenta la presión de poros, solo se aplican esfuerzos de confinamiento y un esfuerzo desviador para llevar la muestra a la falla. Los resultados obtenidos de este tipo de ensayo están en esfuerzos principales totales por lo tanto la ecuación de la recta que corresponde a la ecuación (2). (Das, 2014)

Triaxial consolidado no drenado (CU) o ensayo R (rápido): Este ensayo consta de tres etapas: la primera etapa consiste en la saturación de la muestra; para verificar la saturación de la muestra se utiliza el factor B de Skempton del cual se hablará más adelante. En la segunda etapa la muestra se consolida con esfuerzo de confinamiento constante; como se saturó a la muestra antes de consolidarla existe agua dentro del espécimen de suelo, por lo que se debe tomar en cuenta la presión de poros que ejerce el agua dentro de la misma. En la tercera etapa del ensayo se cierran las válvulas de entrada o salida de agua y se aplica un esfuerzo desviador para llevar a la falla a la muestra. Como se considera la presión de poros en el ensayo CU, los resultados obtenidos están en esfuerzos principales efectivos por lo tanto la ecuación que describe al comportamiento mecánico del suelo corresponde a la ecuación (3). (Das, 2014)

Triaxial consolidado drenado (CD) o ensayo lento (L). El ensayo CD está compuesto de tres etapas. Las dos primeras etapas se realizan de la misma manera que la del ensayo CU, la diferencia entre estos dos ensayos radica en la última etapa. Durante la última etapa se deja abierta la válvula de drenaje; es decir, una vez finalizada la etapa de consolidación de la muestra no se cierran las válvulas de drenaje de la máquina triaxial. Al dejar las válvulas abiertas se permite que se consolide aún más a medida de que se aumenta la carga axial hasta la ruptura. En todo momento se toman datos de la presión

de poros de la muestra, por lo tanto la ecuación que describe el comportamiento mecánico del suelo es la ecuación (3). La velocidad de carga utilizada en este ensayo es muy baja, toma bastante tiempo en completarlo, por lo que no se justifica realizarlo a menos de que sea un proyecto de obra civil muy grande. (Das, 2014)

A pesar de que los ensayos CU y CD toman más tiempo que un ensayo UU, estos ensayos proporcionan al constructor y diseñador de obras civil datos más probables de las propiedades mecánicas del suelo donde se va a construir, los cuales están presentes en todas las ecuaciones de resistencia, diseño de zapatas y losas entre otras. Los ensayos CU y CD toman en cuenta la presión de poros con los cuales se llegan a determinar los esfuerzos efectivos que soporta el suelo. Con estos esfuerzos efectivos se puede determinar la envolvente de falla utilizando el criterio de falla de Mohr-Coulomb y finalmente obtener los valores de ángulo de fricción interna y cohesión de una muestra de suelo. (Das, 2014)

3.3 Triaxial CU

Para poder realizar el ensayo triaxial CU se siguió la norma ASTM D 4767. Esta norma provee de ciertas especificaciones en cuanto al espécimen y al proceso del ensayo. Con la ayuda de esta norma ASTM se logra determinar la resistencia y relación esfuerzo-deformación de una muestra de suelo, también se obtienen los esfuerzos efectivos y totales que fueron aplicados al espécimen por medio de la medición de presión de poros, carga axial y deformación. Todos los datos obtenidos durante el ensayo triaxial sirven para obtener las propiedades mecánicas fundamentales del suelo, siendo el principal resultado los círculos de Mohr, que representan las envolventes de falla en el plano de la muestra. (ASTM D 4767, 2011) La norma ASTM D 4767 detalla las tres etapas que conforman el ensayo triaxial CU, las cuales serán descritas a continuación.

3.3.1 Proceso de Saturación

Para la etapa de saturación se debe tener claro el concepto de los coeficientes A y B de Skempton. Estos coeficientes se obtienen experimentalmente durante el ensayo triaxial no drenado. Durante esta etapa se debe medir la variación de presión de poros (Δu) para poder obtener los valores de los dos coeficientes mencionados anteriormente. Esta variación es producida por esfuerzos principales aplicados al espécimen de suelo $\Delta\sigma_1$ y $\Delta\sigma_3$. (Skempton, 1954) Skempton utiliza la siguiente ecuación para la variación de presión de poros:

$$\Delta u = B [\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)] \quad (4)$$

Donde A y B son los coeficientes de la presión de poros.

Durante la primera etapa del ensayo triaxial CU se aplica un esfuerzo a toda la muestra tanto axial como lateralmente $\Delta\sigma_1$. Luego se aumenta el esfuerzo $\Delta\sigma_3$ con lo cual se genera un esfuerzo desviador $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$ produciendo un cambio en la presión de poros. (Skempton, 1954) Es de aquí de donde se obtiene el coeficiente B y su ecuación es la siguiente:

$$B = \frac{\Delta u_a}{\Delta\sigma_3} = \frac{1}{1 + \frac{n C_v}{C_c}} \quad (5)$$

El coeficiente B se va a calcular durante el ensayo para la confirmación del porcentaje de saturación que tiene la muestra de suelo. La norma ASTM 4767 menciona que el porcentaje de saturación mínimo debe ser del 95 por ciento o si el valor de B se mantiene constante a pesar de que se aumente la presión de celda. Para suelos que están completamente saturados el valor de B debe ser igual a uno, ya que la relación entre la compresibilidad de vacío y la compresibilidad de la estructura de suelo $\frac{C_v}{C_c}$ tiende a cero, esto se da porque los espacios de vacío fueron llenados completamente por agua y su compresibilidad es nula en comparación a la de la estructura del suelo. Si el suelo se encuentra completamente seco los espacios vacíos dentro de la muestra de suelo estarán llenos de aire, ya que la compresibilidad del aire es mucho mayor que la compresibilidad de la estructura del suelo la relación $\frac{C_v}{C_c}$ tiende al infinito, por lo tanto el valor del coeficiente B va a ser cero. Esto quiere decir que los valores para el coeficiente B de presión de poros van a variar entre 0 y 1; el valor de 0 representa que el suelo no posee de ningún contenido de humedad mientras que el valor de 1 representa una muestra de suelo completamente saturada. (Skempton, 1954)

Para obtener los valores del coeficiente A se utiliza la ecuación (1) ya que se conocen los valores de la variación de poros, los esfuerzos principales aplicados y el valor del coeficiente B. El valor del coeficiente A va a variar dependiendo de los esfuerzos a la que fue sometida la muestra de suelo. (Skempton, 1954) Si la muestra de suelo está

completamente saturada la ecuación (1) se puede reducir a la siguiente expresión matemática:

$$\Delta u = \Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \quad (6)$$

3.3.2 Proceso de Consolidación

Una vez terminada la primera etapa se procede a la etapa de consolidación del ensayo triaxial. Para el ensayo triaxial CU se da la carga de consolidación mediante el incremento de la presión de la celda triaxial hasta que la diferencia entre la presión de la celda y la de contrapresión sea la carga deseada. Con dicha carga se procede a abrir las válvulas de salida de agua. Al aplicar la carga de consolidación la muestra de suelo comenzará a experimentar cambios en la presión de poro ya que el agua dentro de la muestra comenzará a salir, se debe tomar los datos de las lecturas de la presión de poros y el cambio de volumen de las buretas de la columna triaxial cada 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 4, 8, 15, 30 minutos y cada 1, 2, 9, 16 y 24 horas. Una vez que la presión de poro se haya estabilizado o bien el cambio de volumen de las buretas sea mínimo se puede proceder a fallar a la muestra. (ASTM D 4767, 2011)

3.3.3 Falla de la Muestra

La última etapa de este ensayo consiste en llevar a la muestra de suelo a la falla. Una vez saturada y consolidada se coloca la celda triaxial en un marco de carga y se cierran las válvulas de salida de agua momento en el que se debe tomar el dato de la presión de poros. Esta presión de poros se debe estabilizar para cargar a la muestra. Una vez estabilizada se calcula la velocidad con la que se va a aplicar la carga. (ASTM D 4767, 2011) Mediante la siguiente ecuación:

$$\epsilon = 4\% (10t_{50}) \quad (7)$$

Donde t_{50} es el tiempo del 50 por ciento de la consolidación primaria. Una vez que se establece dicha velocidad se aplica la carga axial mediante un marco de carga. En este momento se deben tomar los datos de deformación, carga axial y presión de poros. Mientras más datos se tomen mejor va a ser la curva de esfuerzo-deformación que se obtendrá al final. Se considera que la muestra ha fallado cuando se alcanza el quince por ciento de deformación.

3.3.4 Procesamiento de Datos

Una vez que se obtienen todos los datos de saturación, consolidación, presión de poros, deformación y carga axial se procede al procesamiento de los mismos, con lo que se obtendrán los esfuerzos principales efectivos máximos, las curvas de esfuerzo-deformación y el círculo de Mohr para cada estado de carga de consolidación. Se debe realizar este procedimiento para al menos tres diferentes estados, por lo que finalmente se tendrán tres curvas esfuerzo-deformación y tres círculos de Mohr. Para obtener los esfuerzos principales efectivos se utilizó el procedimiento de cálculo de la norma ASTM D 4767. El esfuerzo efectivo de confinamiento (σ'_3) se calcula con la ecuación (8):

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u \quad (8)$$

Donde σ_3 es el esfuerzo de confinamiento y u es la presión de poros. Antes del cálculo de los esfuerzos principales efectivos desviadores (σ'_1) se debe calcular primero el área corregida después de la consolidación. Para poder calcular dicha área corregida se aplica la ecuación (9):

$$A_c = \frac{(\Delta V_o - \Delta V_{sat} - \Delta V_c)}{H_c} \quad (9)$$

Donde A_c es el área corregida después de la consolidación, V_o es el volumen inicial del espécimen, ΔV_{sat} es el cambio de volumen del espécimen durante la saturación que se calcula con la ecuación (10), ΔV_c es el cambio del volumen del espécimen durante la consolidación como indican las buretas y H_c la altura de la muestra después de la consolidación que se calcula a partir de la ecuación (11).

$$\Delta V_{sat} = 3V_o \frac{\Delta H_s}{H_o} \quad (10)$$

Donde ΔH_s es el cambio de altura del espécimen después de la etapa de saturación y H_o es la altura inicial del espécimen antes de comenzar el ensayo.

$$H_c = H_o - \Delta H_o \quad (11)$$

Una vez calculada el área corregida después de la consolidación se puede calcular el esfuerzo principal efectivo desviador (σ'_1) y se utiliza la ecuación (12):

$$\sigma'_1 = \left(\sigma_3 + \frac{P}{A_{Corr.}} \right) - u \quad (12)$$

Donde P es la carga axial aplicada sobre el espécimen y $A_{Corr.}$ es el área corregida de la muestra para cada una de la carga axial aplicada. Para calcular $A_{Corr.}$ se debe utilizar la ecuación (13):

$$A_{Corr.} = \frac{A_c}{1 - \varepsilon_i} \quad (13)$$

Donde ε_i es la deformación unitaria del espécimen para una carga axial dada. ε_i se calcula con la ecuación (14):

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta H}{H_c} \quad (14)$$

Donde ΔH es el cambio de altura medido por un deformímetro al momento de cargar al espécimen. Una vez obtenido los valores de los esfuerzos máximos efectivos σ'_1 y σ'_3 se trazan los círculos de Mohr correspondientes a dichos esfuerzos. Los círculos de Mohr son la representación gráfica de la combinación de esfuerzos cortantes y normales de falla de un material. (Juarez et. Rico, 1974) La ecuación del círculo está representado por la ecuación (15):

$$(\sigma_{x1} - \sigma_{avg})^2 + \tau_{x1}^2 = R^2 \quad (15)$$

Donde σ_{avg} es el valor del centro del círculo. Por lo tanto la coordenada del centro del círculo será $(\sigma_{avg}, 0)$. Para el cálculo del centro del círculo se utiliza la ecuación (16):

$$\sigma_{avg} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$
(16)

Para obtener el valor del radio del círculo de Mohr se utiliza la ecuación (17):

$$R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$
(17)

Una vez obtenido el centro y el radio del círculo de Mohr se puede calcular los valores de las diferentes coordenadas que lo conforman (σ_i, τ_i) y de esta manera dibujarlo. Para esto se aplican las ecuaciones (18) y (19):

$$\sigma_i = \sigma_{avg} - R \cos 2\theta$$
(18)

$$\tau_i = R \sin 2\theta$$
(19)

Una vez dibujados los tres círculos de Mohr se procede a trazar una recta tangente. La ecuación que resulta de la recta tangente a los círculos es la que caracteriza al material ensayado. La ecuación de esta recta es la ecuación (3), por lo tanto de esta ecuación se obtienen los datos de cohesión y la pendiente de la recta. (Juarez et. Rico, 1974) La pendiente de la recta es muy importante ya que mediante la siguiente ecuación se obtiene el ángulo de fricción de la muestra ensayada:

$$\phi = \tan^{-1} m$$
(12)

Para que el informe del ensayo triaxial este completo se debe reportar los siguientes datos: el 50 por ciento del tiempo de consolidación primaria, los esfuerzos máximos para cada estado de carga de consolidación, ángulo de fricción y cohesión de la muestra de suelo y se deben proporcionar las siguientes gráficas: esfuerzo-deformación y los círculos de Mohr con la recta tangente. Todos estos datos serán utilizados posteriormente para el diseño de estructuras civiles. (ASTM D 4767, 2011)

4. Desarrollo

Las normas ASTM International son utilizadas mundialmente en laboratorios para realizar distintos tipos de ensayos, estas normas detallan los procedimientos de manera rigurosa y aseguran de esta manera la obtención de resultados confiables, es por esto que el ensayo triaxial CU, realizado en el laboratorio de materiales de la Universidad San Francisco de Quito, se basó en dicha norma, la cual se leyó detenidamente y se procedió a la realización del manual; como un complemento se utilizó un manual de uso del marco de carga proporcionado por Geotest. El manual de uso de la columna y celda triaxial y el marco de carga de la Universidad San Francisco de Quito se encuentra en el anexo A de este documento. Este manual tiene el procedimiento completo y detallado de todas las etapas descritas anteriormente.

La norma ASTM D 4767 estipula que luego de realizar un ensayo triaxial se debe realizar un procesamiento de datos para tener el reporte final; para esto se realizó un documento en Excel que consta de seis hojas de cálculo cada una con una función distinta. La primera hoja de cálculo sirve para verificar las dimensiones de la muestra de suelo cilíndrica que especifica la norma, la segunda hoja de cálculo es aplicable para el procesamiento de los datos obtenidos de un ensayo de compactación proctor estándar con el que se obtiene la densidad seca y el contenido de humedad óptima de una muestra de suelo, las siguientes tres hojas de cálculo sirven para la recolección de datos durante las diferentes etapas del ensayo CU y la última hoja de cálculo tiene el resumen de los resultados obtenidos del ensayo, es decir las gráficas esfuerzo-deformación y los círculos de Mohr, ángulo de fricción, valor de cohesión y datos generales de la muestra.

La máquina triaxial se compone por: compresor de aire, bomba de vacío, desaireador, columna triaxial, celda triaxial, medidor de presión de poros y marco de carga. Para que la máquina triaxial del laboratorio de materiales este completa faltaba conectar la celda triaxial al medidor de presión de poros y la columna triaxial al desaireador, por lo que se procedió a completar la implementación de la maquina triaxial en el laboratorio de materiales. Se conectó la columna triaxial a un desaireador para poder quitar todo el aire que está presente en el agua y también se conectó la celda triaxial al medidor de presión de poros; una vez realizados estos cambios se probó el funcionamiento de la máquina y se decidió cambiar a un compresor más grande para tener suficiente presión para saturar las muestras de suelo. Al completarse las conexiones de entrada y salida de agua y vacío se realizó un esquema de conexiones de la columna triaxial, celda triaxial y desaireador.

En este documento se encuentra anexo (Anexo B) dicho esquema, realizado en AutoCad, que contiene todas las conexiones de la maquina triaxial para el ensamblaje de la máquina y si es necesario el mantenimiento de la maquina o cambio de piezas.

Al terminar la implementación del ensayo triaxial CU en el laboratorio se verificó la veracidad de los datos que se obtuvieron; para esto se utilizó el Caolín. El caolín es una arcilla que tiene varias aplicaciones en la construcción, se puede utilizar como componente de estuco y en especial el mejoramiento de suelos. Se obtuvieron sus propiedades entre ellos: el límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, densidad seca y contenido de humedad óptimo, para de esta manera ensayar probetas hechas en el laboratorio compactadas a una densidad seca determinada, obtener el reporte de este tipo de arcilla y comparar los resultados de cohesión y ángulo de fricción con estudios realizados en investigación sobre este tipo de material. Los resultados obtenidos en esos estudios deben ser casi exactos con los obtenidos en el laboratorio de la Universidad San Francisco de Quito.

5. Discusión

Para la validación de los datos obtenidos del ensayo triaxial CU de la máquina triaxial implementada en el laboratorio de materiales se ensayó un tipo de arcilla llamada Caolín y se comparó con estudios realizados anteriormente con este tipo de arcilla. Antes de realizar el ensayo triaxial CU se realizó un ensayo de compactación proctor estándar para obtener el contenido de humedad óptima y densidad seca del Caolín. , también se obtuvo el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad del mismo. En la figura 5.1 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de compactación proctor estándar, del cual se puede hallar gráficamente la densidad seca y contenido de humedad óptimo. La densidad óptima del Caolín es de 1.49 gr./cm³ con un contenido de humedad del 24 por ciento. El límite líquido es de 55.99 por ciento, el límite plástico es de 30.42 por ciento y el índice de plasticidad del caolín es de 25.56 por ciento.

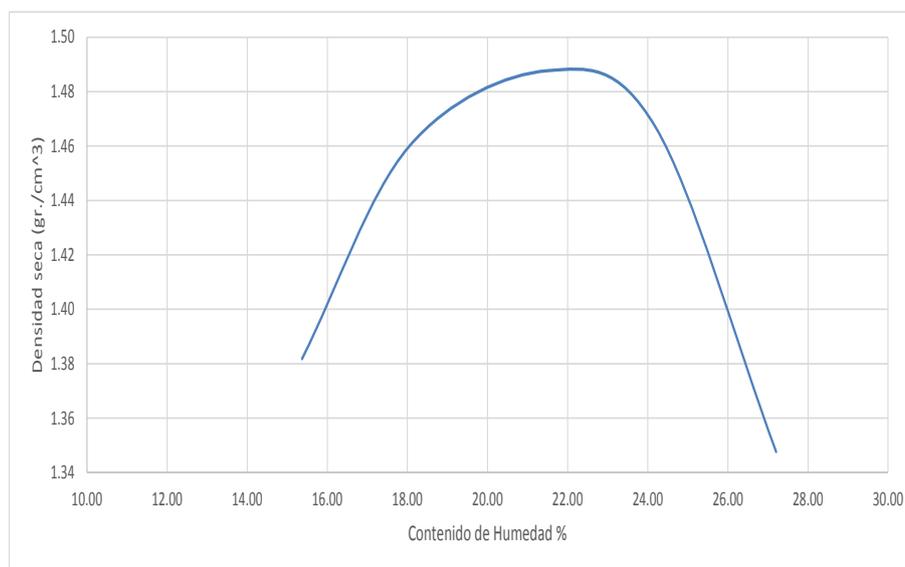


Figura 5. 1 Densidad seca vs. Contenido de humedad

Al obtenerse las propiedades básicas del material se procedió a preparar el espécimen. La probeta fue compactada con la ayuda del proctor estándar a la densidad seca y contenido de humedad óptima del material. Una vez que se compactó el Caolín se extrajo una probeta de suelo cilíndrica de 15 cm. de altura y 7 cm. de diámetro. Proceso que se repitió tres veces para obtener tres probetas con las mismas propiedades, a las cuales se les ensayó en la máquina triaxial de la Universidad San Francisco de Quito y se les aplicó tres cargas de consolidación diferentes. Las cargas aplicadas fueron de 7.5, 14.6 y 29.1 psi que corresponden a la carga de consolidación 1, 2 y 3 respectivamente en la figura 5.2, en la cual se encuentran los círculos de Mohr y la recta tangente.

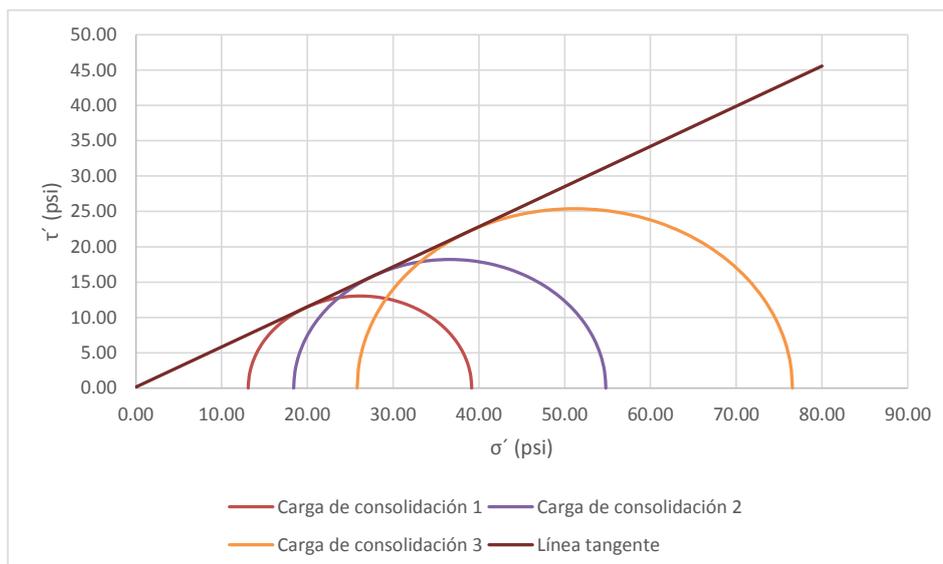


Figura 5. 2 Círculos de Mohr Caolín.

La línea tangente de dicha figura es la que representa el comportamiento del Caolín, cuya pendiente es de 0.57 y la cohesión es de 0.1 psi. Utilizando la ecuación (12) hallamos que el ángulo de fricción interno del Caolín es de 29.65° . Este ángulo de fricción fue comparado con los resultados obtenidos de varias investigaciones sobre este material. La tabla 5.1 contiene los resultados de dichas investigaciones.

LL %	LP %	\emptyset	Gravedad Específica	Referencia
57	32	29.2	2.68	Broms y Casbarian
65	30	29.9	2.6	Sachan (2011)
62	30	29.3	2.63	Prashant (2004)

Tabla 5. 1 Resultados del Caolín en diferentes estudios.

Como se puede observar en la tabla 5.1 el límite líquido y plástico y la gravedad específica de cada Caolín utilizado en las investigaciones son muy similares entre sí y también a las propiedades antes descritas del Caolín que existe en Ecuador. Basándonos en esta recopilación bibliográfica el ángulo de fricción interna varía entre 29.2° y 29.9° y la cohesión es prácticamente nula ya que los valores varían entre 0 y 0.2 psi.

6. Conclusiones

El manual que se encuentra anexado en este documento es detallado y completo y fue realizado siguiendo la norma ASTM D 4767; este fue realizado con el propósito de que cualquier persona puede realizar un ensayo triaxial CU siguiendo los pasos de dicho manual. En cuanto al ensayo realizado en este estudio podemos llegar a validar la veracidad de los datos que se obtuvieron de la máquina triaxial del laboratorio de materiales de la Universidad San Francisco de Quito, ya que el ángulo de fricción del Caolín ensayado es de 29.65° y se encuentra dentro del rango de los valores de la bibliografía consultada, dicho rango esta entre 29.2° y 29.9° . La hoja de cálculo que se realizó proporciona un reporte completo del ensayo triaxial consolidado no drenado.

7. Recomendaciones

Se debe tomar en cuenta que la toma de datos durante el proceso de consolidación y saturación no son críticos ya que los intervalos de tiempo no son tan seguidos, mientras que para la etapa de falla de la muestra es más difícil y se debe tomar la mayor cantidad de datos que se pueda para tener una gráfica de esfuerzo-deformación más exacta. Para lograr mayor precisión en la toma de datos durante esta etapa del ensayo se recomienda implementar un aparato, conectado con el marco de carga que automatice la obtención de los datos y los guarde a medida que se lleva a la falla a la muestra de suelo. La hoja de cálculo realizada funciona para obtener la densidad seca y humedad óptima utilizando el ensayo de proctor estándar y para procesar los datos obtenidos del ensayo triaxial CU satisfactoriamente, sin embargo al adicionar una clasificación del suelo ensayo se obtiene un informe más detallado. Para probetas remoldadas se recomienda generar un molde con volumen confinado para su realización. El ensayo triaxial CU toma al menos dos días en su realización por lo que se debe tomar en cuenta que la máquina triaxial no estará disponible para los alumnos. Por lo cual es importante tener un cronograma de utilización para que los estudiantes puedan hacer uso de la máquina.

8. Referencias y Bibliografía

- ASTM. (2011) Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils.
- Broms, B. y Casbarian A. Effects of Rotation of the Principal Stress Axes and of the Intermediate Principal Stress on the Shear Strength. Recuperado el 6 de mayo del 2018 desde https://www.issmge.org/uploads/publications/1/39/1965_01_0040.pdf
- Das, B. (2014) *Advanced Soil Mechanics*. Boca Raton, Estados Unidos: CRC Press.
- I.N.V.E 153 (2007) Parámetros de Resistencia del Suelo mediante Compresión Triaxial.
- Juarez, E. y Rico, A. (1974) *Mecánica de los Suelos*. México D.F., México: Limusa.
- Prashant, A. (2004) *Three-Dimensional Mechanical Behavior of Kaolin Clay with Controlled Microfabric Using True Triaxial Testing* (PhD diss). University of Tennessee, Knoxville.
- Sachan, A. (2011) Shear Testing Data of Soil: A function of Boundary Friction in Triaxial Setup. *Indian Geotechnique Journal*, 41, 168-176.
- Skempton, A. (1954) The Pore-Pressure Coefficients A and B. *Geotechnique*, 4, 143-147.

Anexo A: Manual Ensayo Triaxial CU.

Ensayo triaxial consolidado no drenado (CU).

Para realizar este ensayo se tomó como referencia a la norma ASTM D 4767. Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils. El ensayo triaxial CU se utiliza para determinar las propiedades de resistencia y deformación de los suelos. Se pueden realizar en muestras de suelo inalteradas o remoldadas. A continuación se presenta el procedimiento para poder realizar el ensayo triaxial CU en la máquina de la Universidad San Francisco de Quito.

Equipos:



Figura A. 1: Marco de carga Geotest.



Figura A. 2: Medidor de poros.



Figura A. 3: Celda triaxial.



Figura A. 4: Cap.



Figura A. 5: Pedestal.



Figura A. 6: Horno de temperatura constante.



Figura A. 7: Bomba de presión.



Figura A. 8: Columna de control.



Figura A. 9: Desaireador de agua.

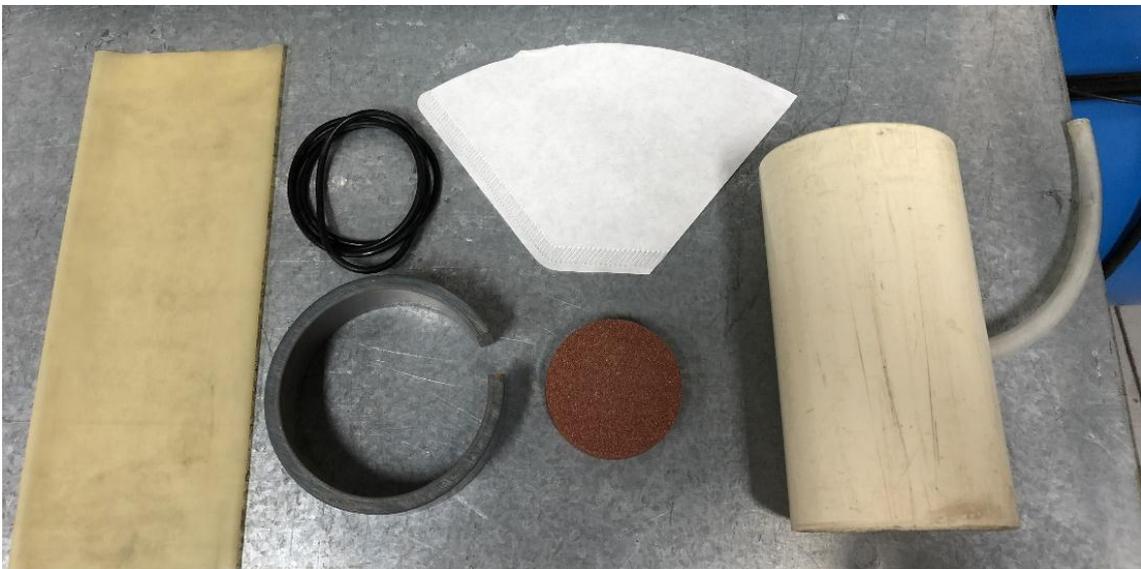


Figura A. 10: Membranas, o-rings, piedras porosas, papel filtro y accesorios para colocar la muestra.

Para poder utilizar los equipos descritos anteriormente se debe tomar en consideración los rangos máximos de presión que soporta cada equipo y las unidades de los datos que proporcionan los aparatos. A continuaciones se presenta la tabla A.1 que contiene las especificaciones de cada equipo:

Equipo	Carga Máxima	Unidades
Celda de carga	2 Klb.	
Marco de carga	-	El menú permite seleccionar las unidades a las que se desea trabajar. Si se elige: SI estará en Sistema Internacional las unidades serán Newtons o Sistema Ingles las unidades serán 1/10 de lbf.
Manómetro de la columna triaxial	200 psi	Los datos que proporciona están en psi.
Medidor de presión de poros	200 psi	Los datos que proporciona están en psi.
Celda triaxial	200 psi	-
Columna triaxial	200 psi	-

Tabla A. 1 Carga máxima y unidades de los equipos.

A. Preparación del Espécimen sin Alterar.

1. Se debe tomar en cuenta las siguientes especificaciones el momento de tallar el cilindro de la muestra de suelo sin alterar:
 - Radio mínimo debe ser de 33 mm.
 - La relación altura-diámetro debe estar entre 2 y 2,5.
 - Se debe saber la profundidad de donde se obtuvo la calicata.
 - Caracterización de la muestra como: el tipo de suelo, contenido de humedad y densidad óptima, granulometría y gravedad específica.
2. Se debe tallar la probeta con mucho cuidado y sin manipular mucho la muestra de suelo. Al tallar la muestra se debe recordar cual es la cara que va hacia arriba ya que es la parte donde primero sentirá la presión que se ejerza en campo.
3. Una vez tallada la muestra debe cumplir con las siguientes especificaciones:
 - Se deben tomar tres medidas del diámetro del cilindro y tres medidas de la altura. El diámetro debe ser aproximadamente el mismo que el de los discos porosos que se utilizaran en el ensayo. El promedio de las tres será el valor que se utilizará para calcular el área.
 - La relación diámetro y altura que se sacaron anteriormente debe estar entre 2 y 2,5. Por lo que el diámetro debe ser de 7 cm. aproximadamente y la altura esta entre 14 cm y 17.5 cm.
 - Llenar la hoja de cálculo 1 y comprobar que el espécimen cumpla con las condiciones.
4. Llenar el desaireador con agua abriendo la llave de paso que se muestra a continuación:

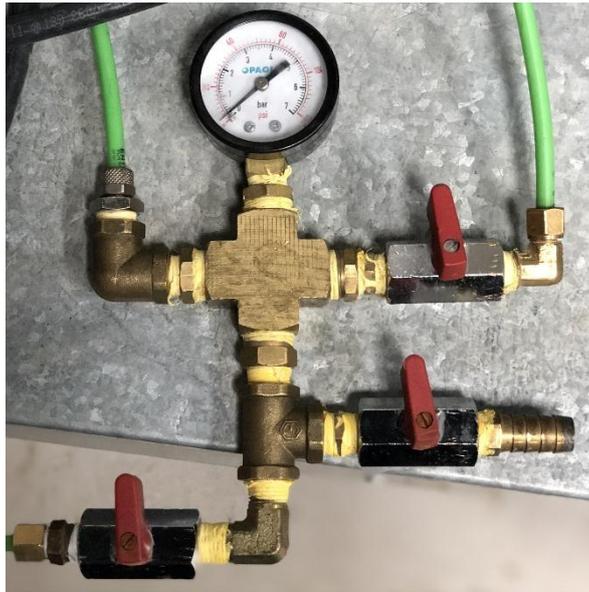


Figura A. 11 Llaves de paso de agua desaireador.

Una vez lleno el desaireador conectar el vacío para sacar el aire del agua. Para abrir el vacío se debe tener la siguiente configuración en las llaves de paso como se muestra a continuación en la foto:

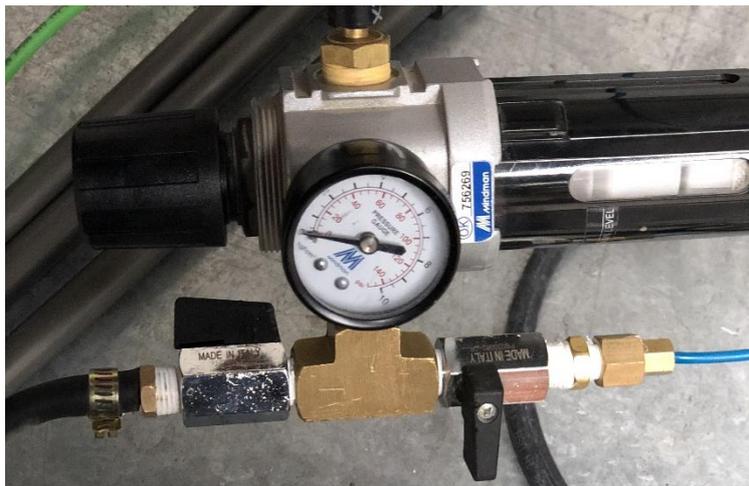


Figura A. 12 Llaves de paso de vacío desaireador.

B. Método de Preparación Seco.

1. Secar completamente las piedras porosas en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$. El horno del laboratorio está en fahrenheit por lo que la temperatura que se debe colocar es de $230 \pm 41^\circ \text{F}$. Una vez que las piedras están completamente secas se las debe colocar en el desecador para bajar la temperatura de las mismas. Una vez que estén a temperatura ambiente se las podrá colocar en la muestra.



Figura A. 13: Horno a 230° F.



Figura A. 14: Piedras porosas.

2. Seque las mangueras de drenaje del cap y del pedestal aplicando un poco de presión baja a cada uno, con una presión de 1 o 2 psi será suficiente. Se debe tener la siguiente configuración la columna de control:



Figura A. 15: Configuración de manecillas de la columna de control superior.



Figura A. 16: Configuración de manecillas de la columna de control inferior.

Para dar presión al sistema se debe girar en sentido horario la manecilla que dice cell pressure en la figura de la columna de control inferior. Asegurarse que no estén tapadas ninguna de las mangueras. Debe circular aire por las mangueras hasta que el aire salga seco. Este paso toma entre 3 a 5 minutos. Una vez que sale el aire completamente seco por el cap y pedestal se descarga el sistema bajando la presión que se aumentó anteriormente.

3. Llenar las buretas pequeñas y grandes del pedestal con agua desairada. Para llenar las buretas se debe tener la siguiente configuración de las manecillas como se muestra a continuación:



Figura A. 17: Posición de las manecillas de la columna triaxial superior para llenar las buretas.



Figura A. 18: Posición de las manecillas de la columna triaxial inferior para llenar las buretas.

Una vez que las manecillas están en esa posición girar en sentido anti horario la manecilla número 7 para permitir el flujo de agua hacia la bureta.

4. Colocar una de las piedras porosas y un papel filtro en la base de la cámara triaxial.



Figura A. 19: Piedra porosa y papel filtro sobre la base.

5. Colocar la muestra de suelo encima del papel filtro de la base. Luego colocar otro papel filtro y piedra porosa en la parte superior del espécimen.



Figura A. 20: Colocación de la muestra de suelo.

- Colocar la membrana dentro del tubo de PVC que contiene una manguera en un costado. Doblar la membrana como se muestra en la siguiente figura:



Figura A. 21: Tubo de PVC con la membrana.

Para que la membrana se expanda y pueda ingresar la muestra de suelo fácilmente dentro de la membrana se debe generar vacío absorbiendo el aire que existe entre la membrana y el tubo de PVC a través de la manguera. Una vez que la membrana se pegue al tubo se dobla la manguera para impedir el ingreso de aire nuevamente como se muestra en la siguiente figura:



Figura A. 22: Tubo de PVC y membrana luego de generar el vacío entre las dos.

La norma ASTM establece que una capa delgada de grasa de silicón puede ser útil para sellar la membrana con el cap y pedestal. Una vez colocada la membrana la muestra queda de la siguiente manera:



Figura A. 23: Base de la cámara triaxial con la muestra de suelo y membrana.

Una vez que la membrana está lista se procede a colocar los o rings. Los o rings son anillos de caucho que ayudan a sujetar la membrana con el pedestal y cap. En el pedestal y cap se tiene una ranura donde se deben colocar los o rings. Para que los o rings pasen hasta el pedestal se debe utilizar la pieza gris de PVC, que hay en el laboratorio para expandir los o rings y pasen sin ningún problema. Los o rings deben quedar en la posición que se muestra a continuación:



Figura A. 24: Colocación y posición de los O rings en el pedestal.



Figura A. 25: Colocación y posición de los O rings en el cap.

Una vez que los o rings están colocados la membrana estará completamente aislada la muestra de suelo.

7. Antes de armar la celda triaxial se debe chequear la lineación del pedestal, muestra de suelo y el cap. Luego se debe aplicar un vacío, menor a 5 psi (35kPa) al cap, para fijar la probeta. Si no están alineados se debe retirar y volver a centrar.



Figura A. 26: Configuración de manecillas de la columna de control superior.



Figura A. 27: Configuración de manecillas de la columna de control inferior.

8. Una vez alineada y fijada la probeta se procede a armar la celda triaxial. Verificar que el pistón de carga este alineado con el cap sin aplicar carga a la muestra de suelo. Una vez alineado el pistón se debe asegurar las tres varillas exteriores de la celda triaxial, recordar que cada una de las varillas calza únicamente en uno de los lugares específicamente.



Figura A. 28: Posición de las varillas para asegurar.

9. Llenar la celda triaxial con agua, sin ejercer presión en la celda. Para esto asegurarse de llenar la celda dejando que el aire salga para que no genere presiones. Arriba de la celda triaxial se encuentra una manguera con un acople rápido que se debe sacar antes de llenar la celda con agua. Para llenar la celda triaxial se abre la llave de paso de agua y la llave de la celda triaxial como se muestra a continuación:



Figura A. 29: Llave de paso de agua.



Figura A. 30: Llave de paso de agua de la celda triaxial (Cell Water).



Figura A. 31 Celda triaxial con llenandose con agua.



Figura A. 32: Acople rápido celda triaxial.

C. Preparación para la saturación.

1. Aplicar todo el vacío en el cap durante 10 minutos aproximadamente. Para aplicar el vacío en el cap las manecillas de la columna de control deben estar en la siguiente configuración:



Figura A. 33: Configuración de manecillas de la columna de control superior para generar vacío en el cap.



Figura A. 34: Configuración de manecillas de la columna de control inferior para generar vacío en el cap.

2. Luego de los diez minutos, permita que el agua percole hasta que llegue el agua al cap. Para dejar que percole el agua hasta llegar al cap las manecillas de la columna de control deben estar en la siguiente configuración:



Figura A. 35: Posición de las manecillas superior de la comuna triaxial aplicar la presión y que el agua percole hasta llegar al cap.



Figura A. 36: Posición de las manecillas inferior de la comuna triaxial aplicar la presión y que el agua percole hasta llegar al cap.

Se debe controlar todo el tiempo la cantidad de agua que hay dentro de la bureta del pedestal. Si se está acabando se debe llenar dicha bureta otra vez, con la configuración de las manecillas del paso B3.

- Una vez que llegue el agua a la bureta del cap. Se deben llenar las buretas tanto del cap como del pedestal. Para esto se debe tener la siguiente configuración de las manecillas:



Figura A. 37 : Posición de las manecillas de la columna triaxial superior para llenar las buretas.



Figura A. 38: Posición de las manecillas de la columna triaxial inferior para llenar las buretas.

Para que el agua fluya a través de las buretas se debe girar en sentido anti horario las perillas 7 y 14. Las perillas 7 y 14 son las llaves de paso de agua para las buretas. 7 es la llave de paso para el pedestal y 14 para el cap.

- Conectar la manguera de la celda triaxial en el acople rápido. Y aumentar la presión en celda a 5 psi. Para aumentar la presión en celda girar en sentido horario la manecilla del medio de la siguiente figura:



Figura A. 39 Manecillas de la columna triaxial inferior.

5. Una vez que la bureta del cap esta con suficiente agua y la presión en celda sea de 5 psi se procede a saturar la manguera de la máquina que mide la presión de poros. Abriendo la manecilla que está en la base de la celda triaxial llamada cap purge.



Figura A. 40: Cap purge de la base de la celda triaxial.

Para asegurarse que las líneas están saturadas se debe abrir el perno que está en la parte de atrás del medidor de presión de poros con una llave número 10.

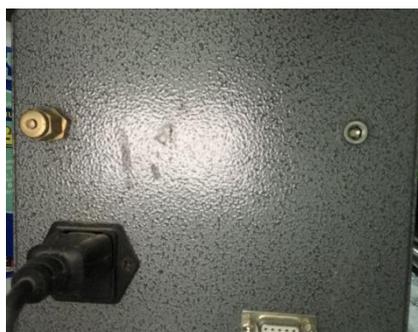


Figura A. 41: Salida de agua del medidor de presión de poros.

6. Una vez que el agua ha llegado a la bureta del cap se debe cerrar la válvula del pedestal. Luego se debe ir quitando lentamente el vacío que hay en el cap.
7. Una vez retirado el vacío del cap se procede a cerrar todas las válvulas de la columna de control triaxial.



Figura A. 42: Configuración de manecillas cerradas de la columna de control superior.

8. Llenar las buretas del cap y pedestal. Para poder llenar las buretas las manecillas de la columna de control deben estar en la siguiente posición:



Figura A. 43 Posición de las manecillas de la columna triaxial superior para llenar las buretas.



Figura A. 44: Posición de las manecillas de la columna triaxial inferior para llenar las buretas.

Para que el agua fluya y llegue a las buretas se debe girar la manecilla 7 y 14 de la figura en sentido horario. Una vez que estén llenas si pasarse el nivel 0 de las buretas cerrar estas manecillas.

9. Abrir las vías de agua del cap y pedestal. Esperar a que se establezca la presión de poros.



Figura A. 45: Posición de las manecillas de la columna triaxial superior abiertas las vías de agua del cap y pedestal.

10. Para asegurarse que esta equilibrada la presión de poros cerrar las vías de drenaje para verificar que la presión de poros este equilibrada; esperar hasta que se establezca la presión de poros. Si existe un cambio de la presión de celda 5 psi (35kPa) menor al cinco por ciento entonces el sistema está estabilizado. Si existe un cambio mayor al 5 por ciento se debe abrir las vías de agua y espere unos minutos y vuelva a verificar.

D. Saturación.

1. Primero se debe abrir la válvula de contrapresión para aplicar un incremento de 5 a 20 psi (35 a 140 kPa). Se recomienda utilizar un incremento de 10 psi para cada ciclo de saturación. Girando la manecilla de la derecha, en sentido horario, de la siguiente figura se aumenta esta contrapresión.



Figura A. 46: Posición de las manecillas de la columna triaxial inferior.

2. Permitir que entre agua de las buretas por el cap y pedestal. Una vez que el agua de las buretas ha dejado de descender durante al menos un minuto proceda a verificar que se haya estabilizado la presión de poros. Para que el agua fluya a través de la muestra o salga se debe tener la siguiente configuración en la columna de control triaxial:



Figura A. 47 Posición de las manecillas de la columna triaxial superior abiertas las vías de agua del cap y pedestal.

E. Medición del parámetro B.

1. Cerrar las válvulas de cap y pedestal.



Figura A. 48: Posición de las manecillas de la columna triaxial superior.

2. Anotar el valor de presión en celda y el de presión de poros.
3. Aplicar un incremento en la presión de celda en 10 psi (70KPa) girando la manecilla del centro de la siguiente figura:



Figura A. 49: Manecillas de la columna triaxial inferior.

Una vez estabilizado la presión de poros tomar los valores de la presión de celda y presión de poros. Si la presión de poro está variando bastante ver paso 4, de caso contrario ir al paso 5.

4. Luego de dos a tres minutos lea la presión de poros. Si existe un incremento significativo en el tiempo de la presión de poro o la presión de poro es más alta que el incremento de presión en la celda que se aplicó significa que existe una filtración de agua de la celda hacia el espécimen. Si la presión de poros disminuye con el tiempo significa que existe una filtración en el sistema de medición de presión de poros.
5. Para calcular el parámetro B se deben tomar 4 valores. La presión de poros antes de aplicar el incremento de 10 psi y después de aplicarlo. Los otros dos datos es la presión de la celda antes y después del incremento de presión. La fórmula del parámetro B es la siguiente:

$$B = \frac{P. Poros_i - P. Poros_f}{P. Celda_i - P. Celda_f}$$

- Retirar en la misma cantidad el incremento de presión aplicado en el paso 3. Girando la manecilla, en sentido anti horario, del medio de la siguiente figura:



Figura A. 50: Manecillas de la columna triaxial inferior.

- Calcular el valor del coeficiente B colocando los datos de presión de poros y de presión de celda en la hoja de cálculo adjunto. Si el valor es mayor a 0.95 proceda a la consolidación, Si el valor de B es menor al 0.95 vuelva a aplicar otra contrapresión a la muestra y repetir el proceso E hasta llegar al menos al 95%.

F. Consolidación.

- Colocar la celda triaxial en el marco de carga.



Figura A. 51: Celda triaxial en el marco de carga.

- Poner en contacto el pistón con la muestra y la celda de carga sin aplicar ninguna presión a la misma. Colocar en posición al deformímetro como se muestra a continuación:



Figura A. 52: Celda triaxial colocada en el marco de celda y deformímetro en su posición.

3. Anotar la lectura inicial del deformímetro. Levántelo un poco y asegúrelo para que no se mueva.
4. Cierre las válvulas del pedestal y cap. Incremente la presión de la celda hasta que la diferencia entre la presión de la celda y la contrapresión sea la presión de consolidación requerida para el ensayo. Tomar en cuenta que siempre se mantiene un diferencial de presión entre la presión en celda y contrapresión. Este diferencial ya forma parte del total de carga a la que se va a consolidar la muestra.
5. Anotar una lectura inicial de las buretas. Luego abra las válvulas para que la muestra drene del cap y pedestal.
6. Anotar las lecturas de cambio de volumen de agua en las buretas a 0.09, 0.25, 0.49, 1, 4, 9, 25, 49 minutos y luego a 1, 4, 9, 25 horas. Bajar el deformímetro hasta que esté en contacto y listo para tomar las medidas a partir de los 9 minutos de comenzada la consolidación. Al consolidarse la muestra de suelo la altura del espécimen disminuirá con el paso del tiempo. Por lo que se debe poner en contacto a la muestra sin cargarla en el marco de carga cada vez que se tome un dato.
7. Continúe hasta al menos toda una noche luego de terminada la consolidación primaria.
8. Luego de terminada la consolidación, verificar que estén equilibradas las presiones de poros o la variación del volumen de agua en las buretas sea nulo o casi nulo. En ese momento significa que la consolidación ha terminado.
9. Una vez terminada la etapa de consolidación se comienza el ensayo de carga no drenado. Se deben tomar los datos de presión de poros, carga y deformación hasta que se dé la falla de la muestra de suelo.

Uso del marco de carga:

El marco debe estar prendido y como se muestra en la siguiente foto:

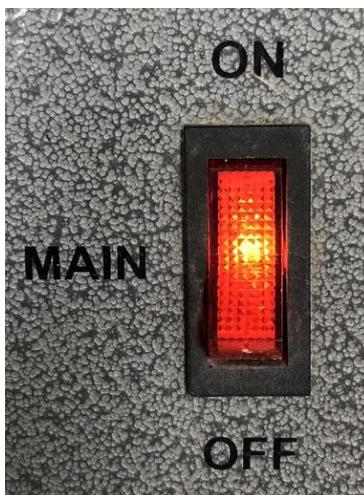


Figura A. 53: Botón de prendido marco de carga.

El menú presenta las siguientes opciones para poder seleccionar las unidades en las que se va a ensayar:



Figura A. 54: Selector de unidades.

SI: Sistema internacional (N.) y English: sistema inglés (lbf.).

Una vez que se seleccionó las unidades se procede a seleccionar la velocidad de carga que será aplicada a la muestra de suelo.



Figura A. 55: Selección de velocidad.

Una vez seleccionada la velocidad de carga y presionar ENTER aparece el siguiente mensaje:



Figura A. 56: Posicionar a la celda triaxial.

Seleccione la opción No y aparecerá el siguiente menú:



Figura A. 57: Menú con antes de comenzar ensayo.

La opción Reset sirve para regresar a la primera pantalla de selección de unidades.

La opción Jog sirve para ubicar la celda triaxial y acomodarla lo más cercano posible a la celda de carga.

La opción Test sirve para comenzar a carga la muestra de suelo.

Si se selecciona la opción Jog aparecerá el siguiente mensaje:



Figura A. 58: Menú para colocar en posición a la celda triaxial.

La opción JogUp sirve para levantar el plato donde está apoyada la celda triaxial hacia la celda de carga.

La opción Home lleva al plato donde está apoyada la celda triaxial a su posición inicial originalmente.

La opción JogDn sirve para bajar el plato donde está apoyada la celda triaxial.

Una vez que está muy cerca el pistón de la celda triaxial con la celda de carga será la posición para comenzar a carga la muestra de suelo. Se presiona Enter y aparecerá el siguiente menú de opciones:



Figura A. 59: Menú para guardar configuración.

Donde se debe elegir la opción Yes, de lo contrario la maquina regresará a la posición inicial. Después de elegir la opción Yes sale el siguiente menú de opciones:



Figura A. 60: Menú principal.

Para comenzar el ensayo se debe seleccionar la opción Test. Y aparecerá el siguiente menú:



Figura A. 61: Menú de ensayo.

Para comenzar a ensayar la muestra de suelo seleccionar la opción Start. Una vez terminado el ensayo seleccionar la opción STOP.

Las lecturas de carga que se aplican a la muestra se muestran en la siguiente pantalla:

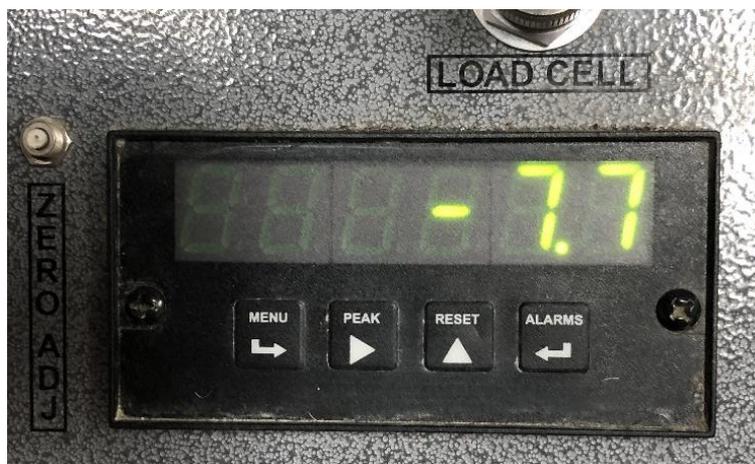


Figura A. 62: Dispositivo digital que indica la carga aplicada.

Anexo B: Planos de Conexiones.

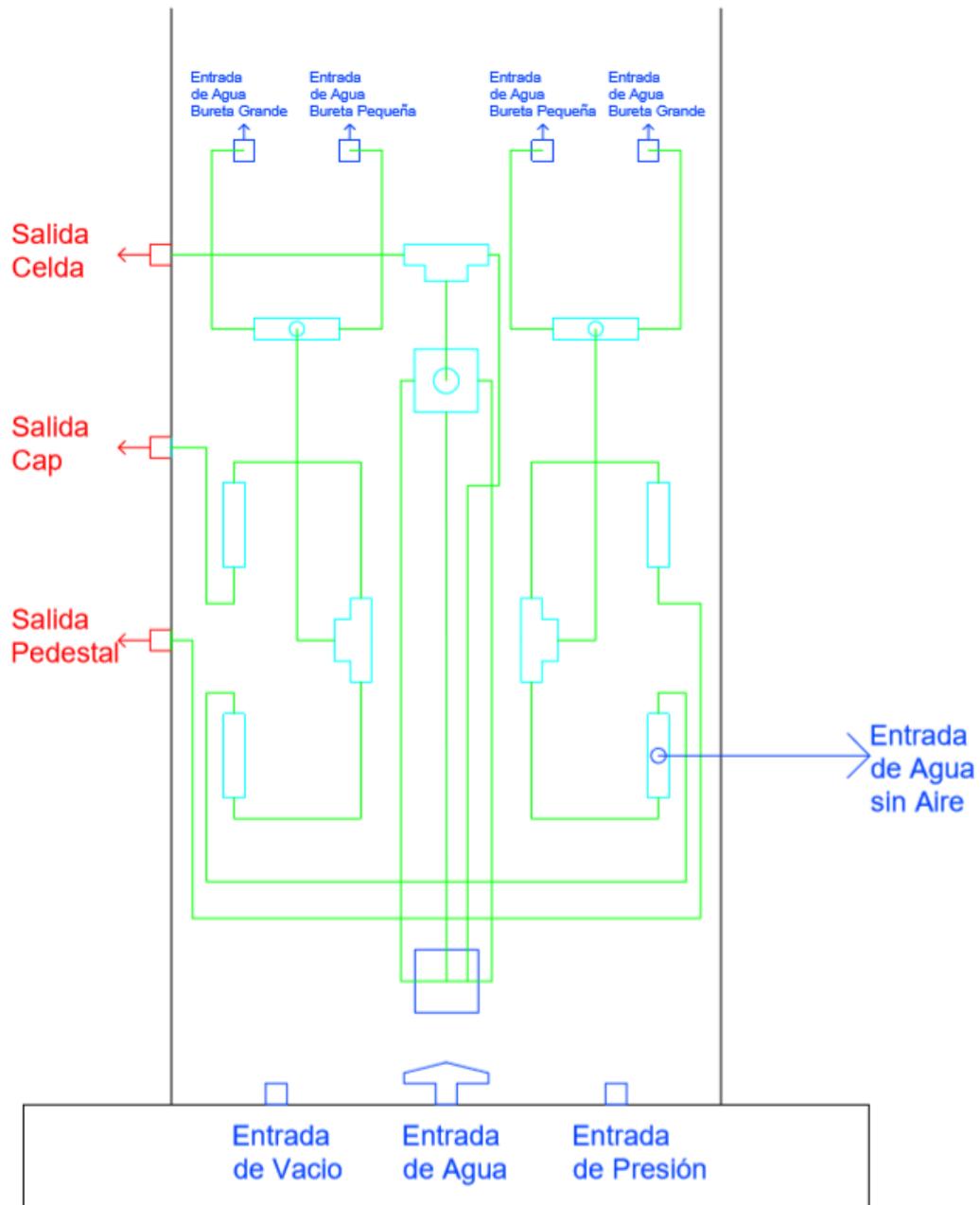


Figura B. 1: Plano conexiones columna triaxial.

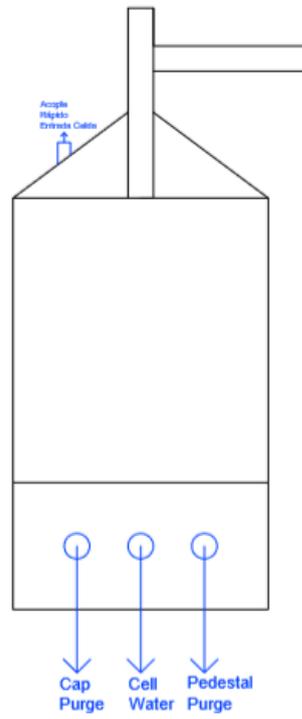


Figura B. 2: Celda triaxial conexiones 1.

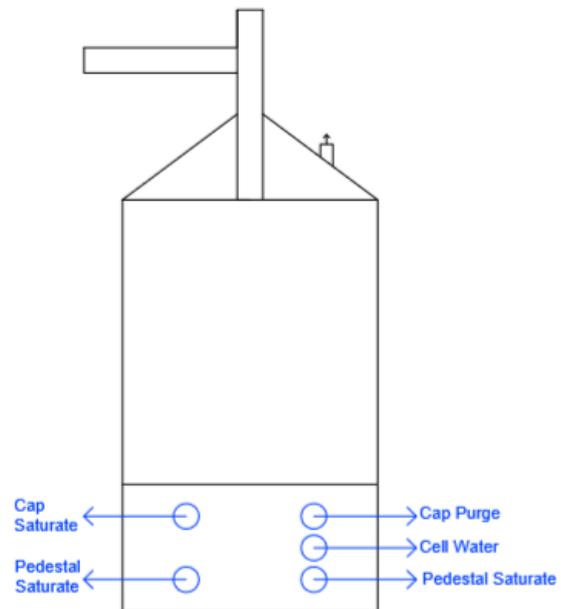


Figura B. 3: Celda triaxial conexiones 2.

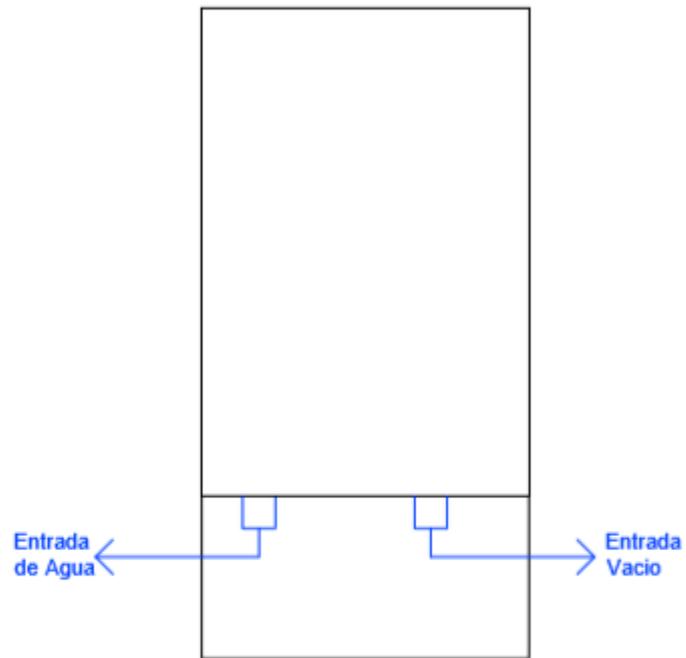


Figura B. 4: Vista lateral izquierda De Aerator

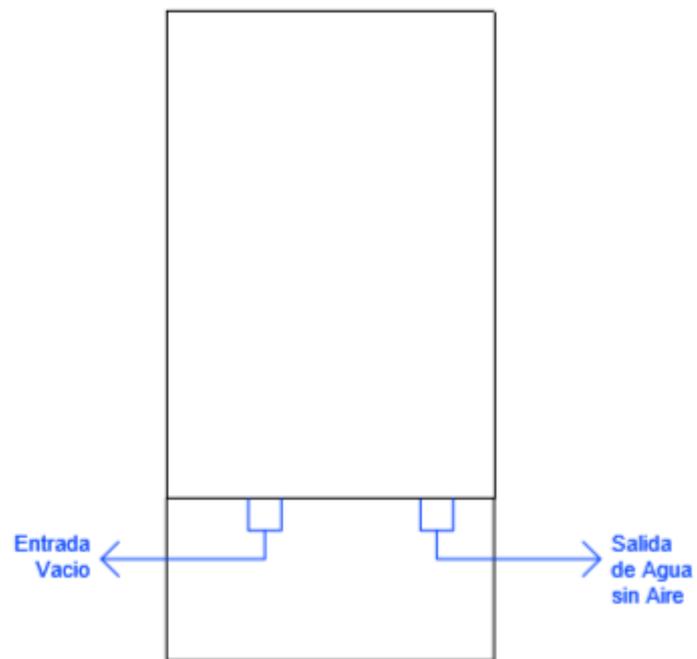


Figura B. 5: Vista lateral derecha De Aerator