

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLE DE UN EQUIPO PARA ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL DIDÁCTICO EN MUESTRAS DE SUELO DE PEQUEÑAS DIMENSIONES

**Autores: Romario Restrepo¹,
Oscar Julián Tellez¹ & Juan
Camilo Tribín¹**

romario.ing@hotmail.com

/tellez.oj@prodesa.com/jtribin40@h
otmail.com

¹Semillero de Investigación en Geotecnología. Línea de investigación del programa de Geomateriales. Línea de investigación del grupo HD+i: Infraestructura y Nuevas Tecnologías. Universidad Piloto de Colombia. Director Proyecto: Juan Carlos Ruge C. Par Colaborativo: Fausto Andrés Molina

Resumen

Las instituciones que ofrecen programas de Ingeniería Civil adelantan un proceso de aprendizaje práctico en el laboratorio, en base a normas y estándares, que permiten al estudiante reforzar el concepto aprendido en el aula. En el área de formación relacionada con la geotecnia, el proceso de enseñanza en el laboratorio es crucial para entender de manera adecuada los fenómenos físicos que ocurren en el suelo, y mediante la aplicación de metodologías analíticas, extrapolar apropiadamente ese comportamiento a estructuras geotécnicas reales. Es así como el ensayo de compresión triaxial representa de manera adecuada la respuesta de una masa de suelo en profundidad, bajo la acción de esfuerzos geostáticos y/o inducidos, permitiendo determinar la resistencia

al corte de un suelo para trayectorias de esfuerzos en los tres ejes principales de análisis. Generalmente los equipos triaxiales que existen en instituciones universitarias son onerosos, presentan sensores y un manejo especializado por técnicos expertos en la temática. Esto dificulta la tarea de aprendizaje del estudiante, al no poder interactuar directamente con el equipo y captar adecuadamente el concepto del ensayo. El equipo triaxial didáctico presentado en esta investigación tiene como principal finalidad contribuir al conocimiento del estudiante, mediante la participación directa en el equipo, manipulando las válvulas y sensores, así como registrando de manera manual los datos de salida del equipo. El equipo de compresión triaxial permite realizar las tres modalidades del ensayo Consolidado Drenado (CD), No Consolidado No Drenado (UU) y Consolidado No Drenado (CU), preferiblemente para muestras de dimensiones menores a las convencionales, sin embargo, se pueden tallar muestras provenientes de muestreo inalterado. Este artículo presenta principalmente las fases de diseño, construcción y ensamble del aparato triaxial propuesto, en posteriores investigaciones de este proyecto se realizarán las fases de calibración y obtención de resultados del equipo.

Palabras Clave: *Ensayo de Compresión Triaxial, Envolvente de falla, Modelo Mohr-Coulomb*

Abstract

The institutions that offer Civil Engineering programs advance a process of practical learning in the laboratory, based on standards, which allow the student to reinforce the concept learned in the classroom. In the area related to geotechnics, the teaching process in the laboratory is crucial to adequately understand the physical phenomena that occur in the soil, and through the application of analytical methodologies, appropriately extrapolate that behavior to geotechnical structures. Thus, the triaxial compression test adequately represents the response of a soil mass in depth under geostatic and external stresses, allowing the determination of the shear strength of a soil for stress paths in the three main axes of analysis. Generally, the triaxial

equipment that exist in university institutions are expensive, they present sensors and a specialized management by expert technicians in the subject. This hampers the student's learning task by not being able to interact directly with the team and adequately grasp the concept of the essay. The main purpose of the triaxial didactic equipment presented in this research is to contribute to the student's knowledge, by participating directly in the equipment, manipulating the valves and sensors, as well as manually registering the output data of the equipment. The triaxial compression equipment allows to perform the three

1. INTRODUCCIÓN

Debido al carácter empírico que precisan poseer los fenómenos físicos para ser entendidos por un ingeniero en formación, la fase laboratorial es un paso ineludible en la formación de ingenieros civiles. Específicamente en el área de énfasis geotécnica, esta experiencia brinda la oportunidad de captar el comportamiento del suelo, que en muchas ocasiones tiende a ser complejo y errático. Por tal razón para el estudiante es una oportunidad interesante interactuar directamente con el geomaterial bajo análisis y con los elementos y equipos que hacen parte del estudio de una respuesta mecánica y/o hidráulica, de un suelo en particular.

Cuando se quiere analizar una masa infinitesimal de suelo en profundidad e intentar comprender los esfuerzos a los que está sometido en varias direcciones, es válido pensar en un cubo de suelo, solicitado por esfuerzos normales a sus caras, en tres direcciones. De tal forma para obtener el comportamiento aproximado de una masa de suelo, se hace necesario que la muestra ensayada en el laboratorio guarde al máximo posible las condiciones naturales a las que está sometido el suelo. El ensayo de compresión triaxial es capaz de reproducir en el suelo adecuadamente el comportamiento

modes of the Consolidated Drained (CD), Unconsolidated Undrained (UU) and Consolidated Undrained (CU) test, preferably for samples of smaller dimensions than conventional ones, however, samples can be carved from unaltered sampling. This article presents mainly the phases of design, construction and assembly of the proposed triaxial apparatus, in later investigations of this project will be carried out the phases of calibration and obtaining results of the equipment.

Keywords: *Triaxial Compression Test, Failure envelope, Mohr-Coulomb Model*

descrito, por lo cual hoy en día continúa siendo la herramienta principal de análisis para obtener la resistencia al corte de un suelo.

Sin embargo, el entendimiento del concepto implica de la interacción directa con el equipo, algo que no presenta una cobertura tan amplia en las instituciones universitarias, debido a que los equipos destinados para tal fin son excesivamente costosos y presenta un manejo técnico realizado por mano de obra calificada.

La propuesta mostrada en este artículo describe el diseño, construcción y ensamble de un equipo de compresión triaxial con fines didácticos, económico y adaptable a cualquier prensa universal utilizada en los laboratorios de instituciones universitarias que ofrecen programas de ingeniería. El equipo permite y obliga al estudiante manipular directamente con el equipo y sus elementos, consiguiendo entender el concepto teórico del ensayo, mientras refuerza la teoría enseñada en clase a medida que el ensayo es desarrollado.

2. ANTECEDENTES

El equipo de ensayo de compresión triaxial ha tenido un avance vertiginoso en casi cien años de existencia, con diversas

variaciones y extensiones dependiendo de las exigencias de diseño y control de las estructuras geotécnicas de la actualidad.

Westerberg construyó en 1921 (Suecia) un aparato triaxial rudimentario donde sometió una muestra de suelo a un esfuerzo vertical y lateral de forma simultánea, pero independiente entre ellos (Krey 1927; Bjerrum&Simons, 1960). Se comenzaron a observar efectos que ayudaron a entender el comportamiento de diferentes tipos de suelos, por ejemplo, la relación entre las dos presiones (vertical y lateral) se identificó que era constante cuando fallaba la arena, mientras que para la arcilla la diferencia entre las dos presiones era constante.

También se evidenció que las arenas tenían una respuesta mecánica característica de un material poco cohesivo con un ángulo de fricción interno constante, mientras que las arcillas revelaron un comportamiento cohesivo puro con $\phi=0$. Westerberg fue el primero en comprobar de manera empírica que una arcilla saturada sometida a una velocidad de carga rápida se comporta como un material $\phi=0$ (Skempton, 1960; Brand & Brenner, 1981).

El *cell test*, que es un tipo de ensayo triaxial fue desarrollado cerca de 1930 por Buisman, con el objetivo principal de determinar trayectorias de resistencia al corte en suelos cohesivos. Después de observar estos resultados, Bishop en 1950, se percató que la deformación máxima ocurrida en el ensayo no es suficiente para causar la falla en la muestra y que la resistencia al corte medida, llega a ser menor que la obtenida a partir de un ensayo triaxial no drenado.

Los primeros esbozos que poseían características de los ensayos triaxiales de vanguardia fueron

desarrollados por Buisman (1924) y Hveem (1934), según lo descrito por Endersby (1950).

No obstante, el primer prototipo considerado moderno fue diseñado en Viena por Terzaghi en 1930 (Skempton, 1960). Este equipo triaxial fue ensamblado por Rendulic in 1933, trabajando junto con Terzaghi en un proyecto relacionado con la resistencia al corte de arcillas (Rendulic, 1935). A estos dos investigadores se debe la imposición y medición, por primera vez, de la presión de poros dentro de una muestra de arcilla. Además, se desarrollaron ensayos drenados y no drenados y demostraron la validez del postulado de esfuerzos efectivos de Terzaghi (Skempton, 1960; Rendulic, 1936). En Norteamérica el primer ensayo triaxial fue construido en el MIT por Casagrande por 1930, planteando una modificación del diseño inicialmente en Viena por Terzaghi.

En aquella época y como ha sido costumbre en la mayoría de las nuevas metodologías, los pioneros en la temática concluyeron que el aparato triaxial presentaba ventajas más identificables que el corte directo. Esta tendencia es confirmada hoy en día, con el avance del equipo de compresión triaxial y el aporte esencial en el entendimiento de la mecánica de suelos en general (Olson, 1989; Lai, 2004).

3. RESISTENCIA AL CORTE EN SUELOS

Normalmente, en el diseño de estructuras geotécnicas la carga última se encuentra a partir del valor de la resistencia al corte, a excepción de algunos problemas geotécnicos donde las deformaciones del material no son altas, y el diseño puede ser controlado por otros aspectos del comportamiento del suelo. Incluso en ensayos poco realísticos como el de compresión

simple sin confinamiento lateral, el suelo falla por corte en un plano cercano a los 45° (Briaud, 2015).

Por definición los esfuerzos de corte impuestos sobre cualquier tipo de material, pueden ser descritos como la tendencia que una parte de su masa se deslice respecto a otra. Los suelos poseen esta predisposición entre los planos presentes en toda su estructura, los cuales pueden ser planos potenciales de falla. La resistencia al corte es encontrada a lo largo de este plano de ruptura. Esta puede traducirse como la capacidad del material de soportar la acción de una falla cortante dentro del plano analizado. Sin embargo, los suelos al ser de naturaleza heterogénea, con una formación pedogenética en algunos casos caprichosa o poco predecible, hacen que diferentes tipos de suelo posean distintos grados de resistencia al corte (Duncan Jr, 1998).

Coulomb en 1773, propuso una teoría para la resistencia al corte de un suelo, basándose en una analogía planteada en el problema clásico de un bloque sobre un plano inclinado. De acuerdo a lo anterior, para que ocurra una falla por deslizamiento (corte) en un suelo, debe ser causada por un esfuerzo cortante considerablemente mayor al esfuerzo normal, en determinado plano susceptible de falla. Está claro entonces que, en otros planos probables de falla del mismo suelo, no ocurrirá eventualmente la falla (Verruijt, 2007).

La analogía formulada condujo a Coulomb a proponer que la combinación crítica de esfuerzos cortante y normal puede ser descrita como:

$$\tau_f = c + \sigma' \tan \phi \quad (1)$$

Donde σ' es el esfuerzo efectivo (normal) en el plano analizado, c

la cohesión y ϕ es el ángulo de fricción interna.

El esfuerzo cortante es determinado entonces por esta ecuación, mostrando dependencia por la clasificación del suelo. Suelos granulares dependen su resistencia por la interacción mecánica entre sus partículas, mientras que los suelos arcillosos están influenciados por fuerzas electroquímicas. La resistencia mostrada por suelos mixtos, combina características de ambos tipos de suelo. La distinción se muestra en la Figura 1.

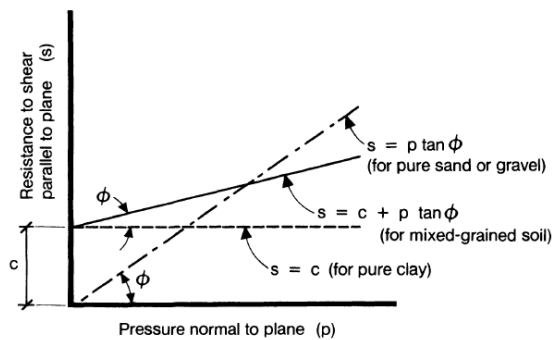


Figura 1. Ilustración gráfica de la ecuación 1 para diferentes tipos de suelo (Duncan Jr, 1998).

Continuando con el símil suministrado por el ejemplo del plano inclinado, si el esfuerzo cortante sobre cierto plano del suelo es menor que el esfuerzo cortante movilizado hasta la falla, entonces las deformaciones serán poco críticas. En cambio, si los esfuerzos cortantes sobre cualquier plano alcanzan un valor límite, entonces las deformaciones serán infinitas, concepto que es colineal con el estado crítico del suelo, formulado décadas después, señalando falla por corte del material (Schofield, 1968; Verruijt, 2007).

El modelo de Coulomb solo puede ser usado para fallas del material que se susciten a lo largo de un plano de falla conocido, tal como una junta o interfase entre dos materiales (ensayo de corte

directo). Suelos estratificados como arcillas sobreconsolidadas regularmente depositadas durante varias estaciones cíclicas y arcillas fisuradas son a menudo materiales aptos para ser reproducidos por este modelo, especialmente si la dirección del esfuerzo cortante es paralela al plano de acamamiento (Budhu, 2015).

3.1 Criterio de falla Mohr-Coulomb

Para resolver la ecuación de Coulomb (ec. 1) y por ende la resistencia al corte de un suelo, se requiere conocer el ángulo de fricción interna y el esfuerzo efectivo sobre el plano de falla. Sin embargo, la resistencia de un suelo obtenida mediante esta ley, es confiable solo para ciertos tipos de casos muy convencionales dentro de un problema geotécnico real, ya que las cantidades involucradas están gobernadas por diferentes aspectos que controlan el comportamiento del suelo.

Por tal razón fue desarrollado un criterio de falla generalizado que combina la metodología de los círculos de Mohr para hallar estados de esfuerzos conocidos, con la ley de Coulomb. Este criterio denominado Mohr-Coulomb (MC) simula la falla cuando la relación de esfuerzos efectivos principales, $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$, es alcanzada (Figura 2).

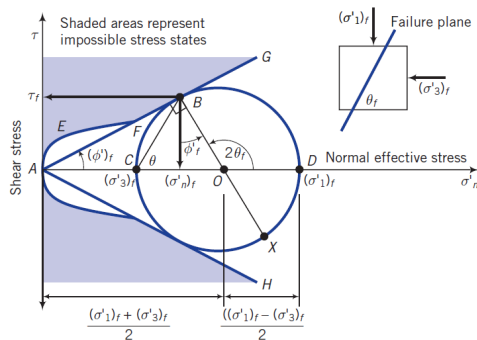


Figura 2. Criterio de falla Mohr-Coulomb, el subíndice f puede ser

reemplazado por s para estado crítico o p para resistencias pico (Budhu, 2015).

De acuerdo con la experiencia mundial, se considera que el criterio MC es adecuado para simular estados de falla en suelos arenosos. Es decir, suelos con cohesión nula y con valores de ángulo de fricción relativamente altos, esto último dependiendo de la gradación, textura y angularidad de los granos.

Para suelos arcillosos que normalmente presentan alguna cohesión, debido a la atracción electroquímica entre sus partículas, y valores de ángulos de fricción menores a los suelos granulares, el criterio también revela una aceptable aplicación. No obstante, la peculiaridad de las arcillas en razón su comportamiento secular, dependiente de la presión de poros y de la expulsión lenta de agua de los vacíos, dificulta la confiabilidad total de esta ley para calcular la resistencia al corte en suelos arcillosos.

Las limitaciones del criterio están basadas precisamente en el argumento que las arcillas pueden aumentar su cohesión ante procesos de consolidación, ya sea naturales o artificiales, causa de la alta resistencia de las arcillas sobreconsolidadas. Esto no se puede predecir mediante este criterio, ya que solo reproduce comportamientos debido a la falla por resistencia al esfuerzo cortante y no respuestas asociadas a la deformabilidad. Para arcillas blandas con comportamientos altamente viscosos, este criterio no es recomendable, debido a la ausencia de un parámetro dentro de la formulación que simule esta respuesta (Verruijt, 2007).

4. ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

El ensayo triaxial moderno posee muchas extensiones o complementos que miden diferentes tipos de

respuesta en la muestra de suelo. A continuación, se detallará el ensayo típico estandarizado en las normas ASTM D4767 e INV E-153/13(Figura 3).

Generalmente la muestra presenta una altura igual a dos veces el diámetro, para garantizar que el plano de corte diagonal que se crea típicamente en el momento de la falla se reproduzca a través de toda la muestra (Briaud, 2013). No obstante, las muestras usadas para esta investigación son de pequeñas dimensiones y es probable que esto no ocurra en todos los casos (ver el aparte de recomendaciones).

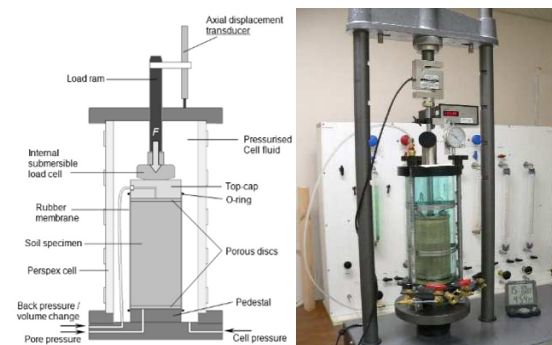


Figura 3. Ensayo de compresión triaxial: Principio (izq.) (GDS Instruments, 2017); Equipo (der.) (Timely Engineering Soil Tests, LLC, 2013).

La muestra rodeada de una membrana de látex, es colocada dentro de una cámara de acrílico de alta especificación. La membrana es conectada a las placas circulares en la cabeza y el fondo de la muestra con dos o-rings que aseguran la conexión sin filtraciones. Los diámetros más utilizados están en un rango entre 30 a 75-mm. La cámara es llenada con líquido (generalmente agua) y la presión de confinamiento (de cámara) es aplicada (Figura 4). En versiones antiguas de equipos triaxiales el fluido utilizado para el esfuerzo de confinamiento era aire a presión, hoy día ya está en desuso (Verruijt, 2007).

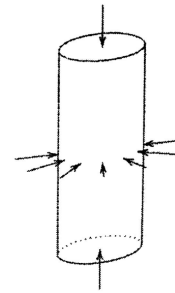


Figura 4. Presión de confinamiento sobre la muestra (Verruijt, 2007)

Generalmente y desde las versiones más antiguas, la cámara triaxial es ubicada en el equipo dentro de lo que se conoce como un marco de carga. El esfuerzo desviador que causa la falla en la muestra es aplicado moviendo el pedestal desde el fondo a una velocidad constante, dependiendo de las dimensiones de la muestra. Los datos de desplazamientos son monitoreados desde la parte externa de la cámara triaxial. En pruebas de mayor exactitud las mediciones son tomadas por sensores adosados directamente a la muestra.

Las presiones de poros son necesariamente medidas para algunas modalidades de ensayo, colocando una piedra porosa en la base de la muestra, para asegurar una distribución de salida de agua uniforme y poder medir con precisión la presión, con un transductor instalado en la placa inferior de la cámara (Giger et al, 2017; Verruijt, 2007).

3.1 Etapas del ensayo triaxial

Como ya se mencionó el ensayo triaxial intentareproducir de manera acertadas las condiciones naturales del suelo al máximo. Por tal razón su historia de esfuerzos y condiciones probables de falla deben ser simuladas fielmente. Dos etapas son realizadas para cumplir esto cabalmente. Algunos autores consideran la etapa de saturación de la muestra, una fase preliminar a las nombradas, puesto que es necesaria para obtener mediciones

confiables de presión de poros y cambio de volumen en la muestra.

3.1.1 Saturación

Para un ensayo triaxial tradicional se debe garantizar una saturación total de la muestra para mitigar los posibles errores en la estimación del cambio de volumen y presión intersticial. Generalmente se usa la metodología de contrapresión para saturar el suelo, con el fin de retirar las burbujas de aire del sistema suelo-triaxial.

El procedimiento general y que hoy día sigue siendo válido es incrementar simultáneamente la presión de poros y de cámara en incrementos pequeños de esfuerzo, permitiendo el balance en cada incremento. La tasa a la cual se debe aplicar la contrapresión es función principalmente del tipo de suelo, grado de saturación inicial y la cantidad total de contrapresión aplicada.

3.1.2 Consolidación isotrópica

En esta primera etapa las condiciones iniciales del suelo son establecidas en términos de los esfuerzos efectivos e historia de esfuerzos. Debido a que se debe tratar de aplicar sobre la muestra los esfuerzos correspondientes al peso de estratos superiores y otros materiales o estructuras que existieron en el tiempo y afectaron sus propiedades mecánicas. Esta fase es muy importante y debe ser completada bajo los esfuerzos isotrópicos elegidos anteriormente que deben ser los mismos del suelo in-situ (Das, 2015).

3.1.3 Corte (Falla)

En esta etapa se somete la muestra a un esfuerzo axial adicional, llamado desviador, que sumado al esfuerzo anterior de consolidación dan lugar a un esfuerzo axial total aplicado. Se debe alcanzar la resistencia pico y residual del

suelo, considerando las condiciones de drenaje en las que se desarrolló el ensayo. Algunas variaciones de ensayo incluyen cambios en los esfuerzos laterales que acompañan al esfuerzo axial.

La sollicitación de esfuerzos puede ser vertical o lateral sobre la muestra, ya sea de incremento o de decremento. Normalmente el ensayo debe suministrar cuanta carga el suelo soporta sin fallar y la deformación que ocurrirá bajo condiciones de trabajo o admisibles.

Los resultados deben ser interpretados y utilizados bajo un apropiado factor de seguridad ya que los esfuerzos reales son generalmente menores al esfuerzo pico obtenido en el ensayo. Las relaciones constitutivas de esfuerzo-deformación obtenidas a partir del triaxial dan las bases para la determinación de las deformaciones del problema geotécnico abordado. Lo anterior puede ser simplificado para solucionar analíticamente el problema o puede ser empleando los resultados de los ensayos para calibrar el modelo constitutivo elegido para el análisis, incluyendo un método numérico como elementos finitos o diferencias finitas (Lade, 2016).

3.2 Modalidades de ensayo triaxial

Las condiciones de drenaje en un problema geotécnico real, inciden directamente en la respuesta a corto o largo plazo en el *performance* de la estructura geotécnica. Estas condiciones deben ser reproducidas de la manera más fiel posible en el laboratorio, mediante los siguientes tipos de ensayos triaxiales:

1. Ensayo Consolidado Drenado, denominado Triaxial CD
2. Ensayo Consolidado No Drenado, denominado Triaxial CU

3. Ensayo No Consolidado No Drenado, denominado Triaxial UU.

Las anteriores condiciones de drenaje en los ensayos de laboratorio corresponden a cada caso de acuerdo al problema geotécnico real atendido. Esta situación se encuentra controlada por la velocidad de carga en el ensayo y la tasa a la cual el agua es expulsada o es succionada por el suelo, puesto que la conductividad hidráulica del suelo y las condiciones de frontera de drenaje, junto con el incremento de carga, influyen directamente en la escogencia del ensayo idóneo para el análisis (Lade, 2016).

Durante la historia del ensayo, el estado del arte en cada momento de su evolución demostró que el objetivo de elegir las modalidades señaladas, fue planificado en función de facilitar a los diseñadores la selección de un factor de seguridad apropiado para la condición de drenaje y de desfavorabilidad en el problema geotécnico.

5. EQUIPO PARA ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL DIDÁCTICO

Como ya fue mencionado, la justificación de diseñar un aparato de estas características, está esencialmente basada en la interacción directa que brinda este equipo por parte de usuarios poco expertos. Posibilidad que es poco frecuente en otro tipo de ensayos triaxiales, los cuales son muy costosos y de delicado manejo.

5.1 Componentes del equipo

Con el fin de realizar los diversos ensayos triaxiales, un equipo triaxial debe poseer unos aspectos mínimos para llevar a cabo el ensayo. Sin embargo, paulatinamente se pueden agregar sensores o elementos para el desarrollo de ensayos especializados o complementos para aumentar la

confiabilidad de los resultados. Aprovechando la ventaja de adaptabilidad a cualquier tipo de prensa que presenta esta solución. A continuación, se caracterizan de forma breve cada uno de ellos y la función que cumplen.

Un compresor con capacidad de carga de 80 psi, de operación eléctrica conectado a una fuente de energía de 110v, un manómetro que indica la carga almacenada en el tanque y un regulador de presión con manómetro para indicar la presión de salida, así como una válvula de emergencia. El compresor en otras versiones portables del equipo, podría funcionar también mediante alimentación con energía solar o planta de gasolina (ver Figura 1).



Figura 1. Compresor o bomba (fuente: autores).

Este compresor básicamente sirve como bomba para aplicar las presiones y contrapresiones durante la etapa de saturación de la muestra. Así mismo es esencial para someter la muestra a la compresión isotrópica en la etapa de consolidación.

Una cámara en acrílico y que en su interior está rellena de agua todo el tiempo y provista de un balón de

caucho, elementos que permiten transmitir la presión de agua controlada las tres cámaras de ensayo, principalmente para la contrapresión en la etapa de saturación. Esta cámara consta de una válvula de entrada de aire, conectada al compresor con una manguera transparente de 3/8", una válvula de salida de agua a presión de 1/4", esta salida se conecta con una manguera transparente a dos manómetros, esta cámara esta provista de una válvula de seguridad y de purga ubicada en la tapa superior (Figura 2).



Figura 2. Cámara de control de presión (fuente: autores).

Un panel frontal donde se ubican los manómetros de control de la presión de agua y las válvulas reguladoras, tanto para la presión como para la contrapresión necesarios para el desarrollo del ensayo. En este panel se puede medir también la presión de poros. En la parte posterior de este panel, se encuentra todo el sistema de mangueras conectadas de tal forma que garantizan que la presión de agua llegue a los elementos necesarios. En la parte superior del panel se encuentra un tanque (reservorio) en acrílico con capacidad de 6 litros, provisto de una válvula y una manguera transparente para llevar el agua a las cámaras (ver Figura 3).



Figura 3. Panel frontal con válvulas y llaves de manejo (Fuente: autores)

En la Figura 4 se observa una de las cámaras en acrílico dispuestas para colocar en su interior la muestra de suelo a ensayar. Estas cámaras pueden ser usadas indistintamente para las etapas de saturación, consolidación y corte. (ver Figura 3). En la etapa de corte, la cámara se lleva a la prensa universal y es adaptada al sistema existente para poder aplicar el esfuerzo desviador que causa la falla de la muestra. Por la placa inferior presenta dos entradas o salidas necesarias para aplicar el esfuerzo de confinamiento y la medición de la presión de poros en la muestra, naturalmente durante la última etapa del ensayo.

También se puede observar la instalación de un sensor que registra el desplazamiento axial de la muestra en la parte externa. En futuras versiones se pueden adaptar sensores directamente en la muestra para aumentar la precisión en los resultados (Figura 4).



Figura 4. Cámara de acrílico que aloja la muestra (Fuente: autores) Junto al compresor y la cámara principal, se dispuso de un cajón con entrepaños con el fin de ubicar cada uno de los accesorios que se necesitan para el montaje de la muestra de suelo. En la Figura 5 se puede observar la disposición completa del ensayo.



Figura 5. Equipo triaxial didáctico (Fuente: autores)

6. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

A continuación, se presentan las ventajas y desventajas recopiladas de diferentes fuentes bibliográficas, que eventualmente podría tener este equipo en comparación con aparatos triaxiales existentes en el mercado.

- VENTAJAS

El equipo propuesto presenta una alta adaptabilidad a prensas universidades existentes en cualquier instituto o entidad, lo que la hace versátil cuando sea complicado desde el punto de vista económico adquirir un ensayo de las marcas que suministran equipo de punta.

Su matiz didáctico es la gran contribución, debido a que los usuarios pueden interactuar directamente con el equipo, ensamblar la muestra, manipular las válvulas, registrar resultados de sensores, tomar datos manualmente, etc.; evitando de esta manera el efecto "caja negra", en el cual el usuario no entiende el concepto y funcionamiento propio del equipo.

El equipo con pequeñas variaciones puede ser portable y ensayar muestras in-situ, es decir puede ser llevado a los lugares directos de exploración del subsuelo y fallar las muestras inmediatamente después de ser recolectadas, evitando alteraciones durante el transporte y almacenamiento.

Debido a su naturaleza versátil, el equipo permite actualizaciones, en términos de instalación de elementos que complementen o extiendan el tipo de ensayos a realizar, por ejemplo, la adquisición de datos mediante sensores electrónicos. Sin embargo, su esencia didáctica se vería afectada. No obstante, es posible agregar algunos elementos que aumenten la confiabilidad del equipo, como el sistema de desaireación del fluido que hace parte del ensayo.

- DESVENTAJAS

Las muestras arenosas presentan complicaciones para ser instaladas en este equipo. Ya que se requiere

aplicar una mínima succión para garantizar la integridad de la muestra. Elemento que no existe en el aparato propuesto.

Los acrílicos no son de alta especificación en cuanto a presiones admisibles, por lo tanto, las presiones de confinamiento aceptadas no pueden ser mayores a lo que recomienda el manual de usuario anexo.

La confiabilidad en los resultados por supuesto es menor a los equipos triaxiales que usan elementos de última generación, sin embargo, este equipo no busca brindar resultados altamente exactos, sino dar la oportunidad a los usuarios de entender completamente el concepto del ensayo.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Aunque la mayoría de recomendaciones se encuentran descritas en el manual de funcionamiento, a continuación, se exponen algunas de ellas.

El aparato triaxial debe ser manipulado con sumo cuidado, siguiendo las instrucciones de funcionamiento consignadas en el manual de usuario.

No se deben llevar las presiones de confinamiento a valores excesivos, debido a que los acrílicos usados en las cámaras no son de alta especificación.

El proyecto fue desarrollado hasta la etapa de ensamble, y se comprobó el correcto funcionamiento del equipo, sin embargo, se recomienda que el equipo tenga una fase de calibración y puesta en marcha del equipo, realizada por otra investigación.

Es importante señalar que este aparato triaxial fue diseñado para actividades didácticas, por lo tanto, no debe ser usado para

resultados de investigación, ni para prestar servicios externos a la comunidad empresarial y/o académicas.

Además, presenta componentes potencialmente patentables por lo que no se recomienda su socialización hasta la resolución de este aspecto, por parte de los inventores y la universidad.

REFERENCIAS

ASTM D4767-11. 2011. Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils.

Bjerrum, L. & Simons, N.E. 1960. Comparison of Shear strength characteristics of normally consolidated clay. Proc. Research conference on shear strength of cohesive soils. ASCE, 711-716.

Brand, E.W. & Brenner R.P. 1981. Soft Clay Engineering. Elsevier.

Briaud, J.L. 2015. Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils. John Wiley.

Budhu, M. 2015. Soil mechanics fundamentals. Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics. University of Arizona, USA. Wiley Ed.

Das, B. 2015. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. 4th. Ed. Cengage Learning.

Duncan Jr, C., 1998. Soils and Foundations for architects and engineers 2nd edition. University of Texas at Arlington. Springer Science.

Endersby, V. A. 1950. The History and Theory of Triaxial Testing and the Preparation of Realistic Test Specimens. A Report of the Triaxial Institute. Spec. Tech. Publ. No. 106.

Giger, S., Ewy, R. & Stankovic, R. 2017. CU Triaxial Test Results of Opalinus Clay and Comparison with Caprock Shales. (ATMSS). Alessio Ferrari & Lyesse Laloui Editors. Springer.

GDS Instruments, 2017.
<http://www.gdsinstruments.com/>

INV E-153/13. 2013. Ensayo de compresión triaxial en suelos cohesivos. Instituto Nacional de Vías - INVIAS. Colombia.

Krey, H. 1927. Rutschgefahrliche und flieβende Bodenarten. Die Bauteile. 5. 485-489.

Lade, P. 2016. Triaxial Testing of Soils. John Wiley & Sons, Ltd

Lai, J. 2004. Triaxial Shear Testing. Department of Construction Engineering Advanced Geotechnical Laboratory. Chaoyang University of Technology (modified).

Olson, R.E. 1989. Triaxial Shear Testing. Department of Construction Engineering Advanced Geotechnical Laboratory. Chaoyang University of Technology.

Rendulic, L. 1936. Relation between void ratio and effective principal stresses for a reconsolidated silty clay. Proc. ICOSMFE, Cambridge (Mass.). Vol. 3, 48-51.

Schofield, A. & Wroth P. 1968. Critical State Soil Mechanics. Lecturers in Engineering at Cambridge University.

Skempton, A.W. 1960. Terzaghi's discovery of effective stress. In from theory to practice in soil Mechanics. New York. John Wiley. pp. 42-53.

Timely Engineering Soil Tests, LLC, 2013. <http://www.test-llc.com/>

Verruijt, A. 2007. Soil Mechanics. 1st edition. VSSD.