

ANEXO C

PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS ISÓTROPOS Y TRIAXIALES EN MUESTRAS NO SATURADAS

Célula triaxial con control de succión

C.1 Objetivo

El objetivo de este anexo, es presentar los pasos previos al ensayo, procedimientos de montaje de la muestras y la metodología general llevada a cabo en la realización de los ensayos isótopos y de compresión triaxial.

C.2 Equipo e instrumentación

La célula triaxial con control de succión fue diseñada y construida en los laboratorios de Geotecnia de la U.P.C. (Universidad Politécnica de Cataluña). Las principales características son descritas en la sección 3.7 del Capítulo 3 y en la Fig. 3.21a se presenta el esquema general de la célula triaxial.

Un procedimiento sistemático y ordenado ha sido llevado a cabo para la preparación y montaje de las muestras, así como el ensamble de los diferentes elementos mecánicos que conforman la célula triaxial. Las principales etapas seguidas durante esta operación son descritas en los párrafos siguientes. La duración que se invierte en el montaje de la muestra y ensamble de las piezas mecánicas es aproximadamente de 80 minutos de manera organizada.

Equipos complementarios

- Célula triaxial convencional para la fabricación de probetas a ensayar (Fig. C.1).
- Torno de fabricación de probetas (Fig. C.2).
- Agua destila y desairada.
- Balanza de capacidad superior a 500 g de resolución ± 0.01 g.

- Estufa de capacidad a 110 °C y recipientes para secado en estufa.
- Herramientas: espátula, cuchillo, cortador de alambre, llaves Allen y métrica.
- Bomba de succión.
- Pegamento instantáneo tipo cianocrilato.
- Pintura acrílica blanca.
- Base de acero plana, para la colocación de membranas y LDVTs.
- Micrómetro con una resolución de 0.01 mm.
- Acoplador de membranas.
- Aparato Guía de los LVDTs internos.

C.3 Metodología

C.3.1 Pasos previos

- Saturación de los discos cerámicos mediante la aplicación de agua a presión, se guía para ello el procedimiento propuesto por Bishop y Henkel (1957). En la Fig. 3.14 se muestran las piezas mecánicas para conseguir la saturación de los discos cerámicos AVEA.
- Determinación de la permeabilidad al agua de los discos cerámicos. Permeabilidad inicial del cabezal (1.2×10^{-10} m/s) y del pedestal (8.5×10^{-11} m/s) (Fig. 3.16).
- Los discos cerámicos, son cubiertos por una fina capa de agua destilada para evitar su desaturación durante los pasos siguientes.
- Desairado del agua destilada de una cámara CAD que alimenta el sistema de imposición de la tensión desviadora mediante una de bomba de succión en intervalos de 15 min.
- Desairado del agua que alimenta los sistema de medidas de los cambios de volumen de agua.
- Los medidores de volumen de cambio de agua y los IBA se llenan con agua desairada, el aire atrapado es expulsado por el respiradero localizados en la parte superior (Fig. 3.9, Capítulo 3).
- Se produce un flujo de agua desairada por bombeo manual, con objeto de llenar las líneas de drenaje de los pistones que se comunican con los discos cerámicos (AVEA).
- En ensayos triaxiales, la cámara inferior de presión (σ_p), se llenado con agua desairada desplazando el pistón de carga a una altura de 45 mm de la base (posición inicial de ensayo), por medio del motor reductor.
- Accionar el sistema de adquisición de datos para lograr un equilibrio interno térmico y así minimizar los efectos de offsets.

C.3.2 Preparación de la muestra

Una célula triaxial convencional, es utilizada para compactar las muestras bajo condiciones isotropas (tensión controlada) (Fig. C.1), en el Capítulo 4 se explica con detalle el procedimiento de compactación. La preparación de las muestras tanto para los ensayos isotropos como para los ensayos triaxiales se aplicó el mismo criterio.

- Probetas de 38 mm de diámetro y 76 mm de altura son obtenidas mediante tallado de la zona central de una probeta compactada en condiciones isotropas, cuyas dimensiones iniciales son de 50 mm de diámetro y 100 mm de altura (Fig. C.2). Durante el tallado de la probeta, se obtienen testigos de material para determinar su humedad.
- Al finalizar el tallado, se toma una serie de medidas de su diámetro (superior, centro, inferior), así como de su altura, las dimensiones son medidas con un micrómetro de resolución de 0.01 mm. La probeta a ensayar, se pesada y los datos son anotados en la hoja de registro (Fig. C.3).

C.3.3 Montaje

- Las primeras etapas del montaje de la muestra se realizan por separado, donde el pedestal, con sus conductos de agua previamente llenados, se coloca sobre una base plana de acero con una funda de plástico, cubierta por una capa de agua destilada con objeto de prevenir la posibilidad del secado del disco cerámico durante las primeras etapas de montaje (Fig. C.4).
- La célula de carga (ensayos triaxiales) es roscada entre el cabezal y el pistón superior. La pieza de alineación no-contacto (ensayos isotropos) es roscada en el pistón superior (Fig. 3.22). Las conexiones del sistema de presión de aire (u_a) y de agua (u_w) entre el pistón superior y el cabezal se conectan. Estos pasos se realizan antes de colocar el cabezal sobre la muestra para evitar momentos de torsión y alterar las condiciones de la muestra.
- La muestra se coloca entre el cabezal y el pedestal, lo cual debe ser adecuadamente orientada con objeto de no interferir las líneas de drenaje (aire y agua) del cabezal con las conexiones eléctricas y los LVDT (Fig. C.5)
- El cabezal con el pistón superior se mantiene fijo en posición vertical con un aparato auxiliar, ejerciendo una tensión axial sobre el espécimen aproximadamente de 5 kPa, suficiente para mantener contacto entre el cabezal y la muestra (Fig. C.4).
- Tan pronto como la probeta entra en contacto con los discos cerámicos conectados a un sistema abierto de presión de agua, la probeta comienza absorber agua por capilaridad. Esto es importante para minimizar disturbios sobre las condiciones iniciales de la muestra.

- Una delgada capa de grasa de silicona es colocada alrededor del pedestal y cabezal, con la finalidad de que la membrana tenga mayor adherencia.
- Una membrana de látex se coloca en la muestra fijandola en el cabezal y pedestal por dos tóricas de 2.6x28 mm, asegurando el sello en los extremos. Esta membrana tiene un espesor que no excede al 1% del diámetro del espécimen y un diámetro interno del 90 % de la muestra, de acuerdo a las normas ASTM-D2850.
- La membrana de látex es cubierta con grasa silicona, con el propósito de evitar deslizamientos entre las membranas y proteger a la muestra de la migración de aire del fluido de confinamiento.
- Una segunda membrana de silicona es colocada en la muestra. La membrana de 36.5 mm de diámetro interior y 0.75 de espesor es necesaria para fijar los elementos de plástico que soportan los transductores de desplazamiento axial.
- En la segunda membrana de silicona, una capa de pintura acrílica blanca se aplica en las zonas de medida por los sensores láser, con objeto de tener una buena señal, esta cubierta tiene un color blanco permanente durante el ensayo.
- Los soportes y las bases de los LVDTs internos son posicionados con un aparato alineador con objeto de garantizar la posición del cero eléctrico, estos son adheridos a la membrana, colocados en la parte central de la probeta en dos posiciones diametralmente opuestas (Fig. C.4).
- La muestra (cabezal, pedestal y pistón superior) se traslada a la célula triaxial para finalizar el montaje (Fig. C.5). El cabezal y pistón superior ejercen una presión sobre la muestra de 15 kPa.
- El pedestal se fija al pistón inferior de carga, teniendo cuidado de la posición del ensamble. Se conectan los conductos de agua y aire de poros y las líneas del drenaje exterior.
- Se realiza un flujo de agua desairada por bombeo manual, con objeto de llenar las líneas de drenaje de los pistones que se comunican con los discos cerámicos (AVEA) y expulsar el aire atrapado. En un sistema abierto se impone una presión de agua de 15 kPa.
- Se conectan al sistema de adquisición de datos los LVDTs y célula de carga (Fig. C.5). La cámara es cuidadosamente ensamblada sin tener contacto con el espécimen, en la base con 8 tornillos de denominación M10x30, posteriormente la tapa superior es ensamblada con la cámara con 8 tornillos de la misma denominación (Fig. 3.21b y 3.24).
- Sobre el pistón superior, se conectan las líneas de drenaje de la presión de aire y de agua, comunicados hasta el cabezal por medio de los conductos del pistón superior. De igual manera que en el pedestal, se realiza un flujo de agua desairada por bombeo manual, para expulsar el aire existente. Se mantiene un sistema abierto con una presión de agua de 15 kPa.

- En ensayos isótopos, el pistón superior y aparato de alineación no-contacto, son mantenidos 5 mm por encima del cabezal por medio de un tornillo bloqueador externo, después de verificar la verticalidad del conjunto.
- Los sensores láser se posicionan cercano al cero eléctrico de calibración, en su desplazamiento horizontal. En su posición vertical dependerá del tipo de ensayo. En ensayos isótopos, el láser se coloca de tal manera que registre la evolución del centro de la probeta, tomando como referencia el pedestal. En los ensayos de compresión triaxial, se tomará como referencia la parte superior de la probeta (cabezal) para el registro de la deformación radial local.

Es importante minimizar el tiempo de montaje, con la idea de evitar disturbios en las condiciones iniciales de la probeta.

C.3.4 Desarrollo del ensayo

- Una presión de cámara de 25 kPa es impuesta, con la finalidad de reducir errores debido a movimientos de acoplamiento de los soportes de los LDVTs y de verificar posibles fugas en el sistema.
- Los sensores láser son posicionados iluminando la parte inferior del pedestal (ensayos isótopos) o la parte inferior del cabezal (ensayos triaxiales), donde los datos son registrados por el programa de adquisición de datos. Estos elementos (cabezal o pedestal) son tomados como referencia a través de todo el ensayo, posteriormente los sensores láser son colocados en el centro de la probeta.
- En todo la altura de la muestra desde el punto de referencia del pedestal hasta el cabezal (ensayos isótopos) o del punto de referencia del cabezal hasta el pedestal (ensayos triaxiales), los sensores láser son recorridos, registrando el perfil de la muestra con objetivo de detectar inclinaciones y establecer la configuración inicial de referencia.
- La etapa inicial es similar a los ensayos isótopos con la mini-célula isótropa rígida y célula edométrica, donde la presión de aire y de cámara son incrementados simultáneamente por etapas con una diferencia de 25 kPa hasta alcanzar las tensión media neta inicial de ensayo ($\sigma_m - u_a$).
- La succión matricial se aplica simultáneamente empleando la técnica de traslación de ejes, manteniendo la presión de aire constante y controlando la presión de agua hasta alcanzar una diferencia igual a la succión deseada ($u_a - u_w$).

- Con las etapas anteriores se establece en la probeta, la condición inicial en tensión y succión, tras la compactación isotropa, manteniéndose como mínimo 48 horas, para garantizar las condiciones iniciales.
- Los sensores láser son nuevamente recorridos, para registrar el perfil de la muestra tras imponer las condiciones iniciales de ensayo en la muestra.
- En trayectorias de carga–descarga, llevada a cabo por etapas, se mantendrá cada etapa como mínimo 48 horas ($\sigma_m - u_a$), bajo succión constante, una vez llegado al equilibrio de deformación.
- En trayectorias de humedecimiento–secado, por etapas, se varía la succión matricial en la muestra, manteniendo la presión de aire constante y controlando la presión de agua hasta alcanzar una diferencia igual a la succión deseada ($u_a - u_w$), bajo una tensión media neta constante ($\sigma_m - u_a$). Registrando los cambios de volumen de agua de la muestra para determinar su humedad y el tiempo de equilibrado en cada etapa.
- La trayectoria de descarga, se realiza tomando las mismas consideraciones al procedimiento de carga, hasta llegar a la tensión media neta ($\sigma_m - u_a$) deseada.
- En la trayectoria de rotura, la presión de cámara inferior, se impone por medio de un motor reductor, con un tiempo de falla alrededor de 12 días, logrando una deformación axial (ϵ_l) entre 18 y 25 % a una velocidad de variación constante de desplazamiento de 1.0 $\mu\text{m}/\text{min}$, bajo una succión constante, registrando los cambios de agua de la muestra para determinar su contenido de humedad. En la sección 3.7.2.3 se explica con mas detalle la imposición de la tensión axial.

C.3.5 Desmontaje

- Al finalizar el ensayo, la presión de agua se reduce a cero ($u_w = 0$). Se cancela la válvula que conecta el sistema de presión de agua con la muestra, para evitar su pérdida de la muestra durante el proceso de descarga de la presión de confinamiento y de aire.
- Se reduce simultáneamente la presión de aire y la presión de cámara con una diferencia de tensión media neta de $\sigma_m - u_a = 20$ kPa hasta obtener una presión nula en la probeta.
- Los sistemas de presión (σ_3 , u_a y u_w) son desconectados y los sensores láser son desplazados hacia el exterior, para evitar contacto con la cámara al ser retirada.
- La muestra es removida del pedestal y cuidadosamente extraída de las membranas, teniendo cuidado de no perder material.
- Medir con precisión, las dimensiones de la probeta para corroborar con las lecturas registradas durante el ensayo y anotar el valor en la hoja de registro.

- La confirmación de la homogeneidad en contenido de agua de la muestra después de realizar trayectorias de humedecimiento y secado, se verifica midiendo contenidos de agua locales dividiendo la muestra en tres partes (Fig. C.6). Cada parte de la muestra se pasa a una cápsula numerada y tarada, se introduce en un horno a 110 °C durante 24 horas como mínimo para su secado, anotando los valores en la hoja de registro. En la sección 6.3.5, se presentan los contenidos de humedad.

C.4 Observaciones finales

- Durante el ensayo es extremadamente importante el control de la temperatura del laboratorio, con una variación de ± 1 °C, para obtener lecturas fiables en los cambios de volumen de agua.
- Realizar constantemente el desairado por medio de un flujo a presión en el sistema de presión de agua (u_a) para eliminar el aire difuso a través del disco cerámico.
- Registrar suficientes lecturas de tiempo–cambio de volumen de agua, para definir la etapa de equilibrio y los contenidos de humedad.

C.5 Cálculos generales

1° En la hoja de registro de datos generales de ensayo, se anota la humedad w , la relación de vacíos e y el grado de saturación S_r , inicial y final.

2° Deformación axial (ϵ_l), deformación radial (ϵ_3), deformación volumétrica (ϵ_v) y deformación de corte (ϵ_s).

$$\delta\epsilon_3 = \frac{\delta L_1 + \delta L_2}{\phi_0} ; \delta h_{1,2} = \frac{\delta h_{1,2}}{h_0} \quad \therefore \quad \delta\epsilon_1 = \frac{\delta h_1 + \delta h_2}{2}$$

$$\delta\epsilon_v = \delta\epsilon_1 + 2\delta\epsilon_3 \quad \text{y} \quad \delta\epsilon_s = \frac{2}{3}(\delta\epsilon_1 - \delta\epsilon_3)$$

donde, δL_1 , desplazamiento radial (láser 1); δL_2 , desplazamiento radial (láser 2); $\delta h_{1,2}$, incremento axial (LVDTs 1 y 2); h_0 , altura inicial; ϕ_0 , diámetro inicial de la muestra.

C.6 Formato y hoja de registro