

ANEXO B

PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS ISÓTROPAS CON CONTROL DE SUCCIÓN. Mini – célula isotrópica rígida

B.1 Introducción

La mini-célula isotrópica rígida con control de succión fue diseñada y construida en los laboratorios de Geotecnia de la U.P.C. (Universidad Politécnica de Cataluña), en la Fig. 3.18 del Capítulo 3 se presenta el esquema general del equipo. El diseño de la mini-célula isotrópica rígida presenta dos principales características:

- Con la dimensión de la probeta, con un diámetro de 20 mm y una altura de 20 mm, se disminuye el tiempo de equilibrado de las presiones de aire (u_a) y agua (u_w) de poros.
- La muestra es sometida a un estado tensional isotrópico en una cámara rígida, cuyas paredes presentan un grosor de 29 mm en acero inoxidable minimizando posibles deformaciones del equipo (Fig. 3.18 y 3.21 del Capítulo 3).

B.2 Descripción de la mini - célula isotrópica rígida

En la Fig. 3.19 del Capítulo 3, se presenta la mini-célula rígida isotrópica. El equipo consta de dos cuerpos principales: cuerpo superior e inferior (base). Los dos cuerpos están unidos dejando una cavidad interna de 54.5 cm³. El cuerpo inferior de la célula de acero inoxidable contiene una serie de conductos que permiten dar la presión de confinamiento, así como la presión de aire (u_a) y de agua (u_w) a la muestra.

La muestra descansa sobre un pedestal cilíndrico que a la vez contiene un disco cerámico de alto valor de entrada de aire (1.5 MPa) y una segunda piedra porosa anular concéntrica con el disco (Fig. B.1). La piedra porosa anular tiene 20 mm de diámetro exterior y 15 mm de diámetro interior, ésta es, caso contrario al disco cerámico, de una elevada permeabilidad y está comunicada con los conductos con los cuales se impone la presión de aire (u_a) de poros.

Cuando están unidos los dos cuerpos (inferior y superior) la cavidad interna se comunica con dos conductos del cuerpo inferior donde se podrá controlar la presión de confinamiento, el cuerpo superior tiene una entrada externa, sobre el eje vertical de la célula, que comunica con la cámara de confinamiento, y que permite verificar el llenado de la cámara con el líquido de confinamiento y expulsar el aire (Fig. B.4). Es importante remarcar que la estanqueidad del conjunto es imprescindible, por lo cual, el cuerpo inferior tiene incorporado en su parte superior una junta tórica 39x2 (39 mm de diámetro interior x 2 mm de grueso) que asegura un acoplamiento hermético de los dos cuerpos (Fig. B.1, B.2).

B.2.1 Equipos complementarios

B.2.1.1 Equipos de medida. Medidores de volumen.

El medidor de volumen es un aparato que determina el volumen de líquido que circula a través de sus dos entradas. Consiste de una bureta de vidrio de 7 mm de diámetro y 675 mm de longitud, ubicado en el interior de un cilindro de metacrilato de 30 mm de diámetro interior y 680 mm de longitud. La parte inferior de ambos cilindros concéntricos están llenos de agua, mientras la parte superior de un gasoil, con un color claramente diferenciado y una densidad más baja que el agua, asegurándose de la no-homogeneidad (Fig. 3.9 y 3.20, Capítulo 3). Aunque la resolución del sistema de lecturas sea de 0.02 cm^3 , pueden estimarse variaciones de 0.01 cm^3 sin dificultad. En el ensayo se utilizan dos medidores de volumen: a) uno está destinado a medir el flujo que entra o sale de la cámara de confinamiento de la célula, que nos indica la deformación volumétrica de la muestra (Fig. 3.20); b) el segundo medidor, nos mide la cantidad de agua intersticial que entra o sale de la muestra, por lo tanto, nos permite determinar los cambios de humedad (Fig. 3.20).

B.2.1.2 Presión de aire e interfaces

En el laboratorio de Geotecnia del departamento de Ingeniería de Terreno dispone de dos líneas de aire a presión: una de 8 – 10 bar y la segunda línea de 30 – 40 bar, la presión de aire es suministrada por dos compresores que trabajan independientemente. Se disponen de dos tipos de reguladores, Bellofram tipo 70 para proveer una presión de 1.8 MPa (rango de trabajo: 10 kPa hasta 0.9 MPa) y Fairchild modelo 10 para proveer una presión de 3.5 MPa (rango de trabajo: 25 kPa hasta 2.5 MPa). Este sistema permite mantener una presión constante en la muestra durante el ensayo. La combinación de los reguladores con transductores de presión permite el control de presión con una resolución de 1 kPa.

Cuando se desea controlar la presión de un fluido se utiliza un elemento interfase, que recibe por una de las entradas una presión de aire determinada convirtiéndose como salida la misma presión de un fluido. Estas interfaces consisten de una cámara cilíndrica de 200 mm de longitud de acero inoxidable. Una membrana de látex ajustada a la cara superior divide la cámara en dos dominios aire y agua (Fig. 3.9 y 3.20, Capítulo 3). De esta manera, la salida inferior del elemento interfase comunica una presión de líquido igual a la presión de aire, que es transmitida por la membrana en el interior de la cámara.

B.2.1.3 Eliminación del aire en las líneas de agua a presión

Es importante que el agua de la cámara de confinamiento, de los medidores de volumen y de todos los conductos de agua a presión no contenga aire ya sea en fase gaseosa o disuelto en el agua. Los siguientes elementos intentan cumplir con este propósito:

Interceptores de burbujas de aire (IBA): Los interceptores de burbujas de aire, consisten de una pequeña cámara de metacrilato de 5 cm de diámetro y 5.1 cm de altura, en su base dispone de dos entradas por la que pasa un flujo de agua a presión (Fig. 3.9 y 3.20). Si el flujo de agua contiene una burbuja de aire, al llegar al IBA tiende a quedarse en la parte superior de la cámara. En la configuración global de la mini-célula isótropa y de los elementos auxiliares (equipos de medida) se incluyen 2 elementos IBA para la línea de presión de agua (u_w) y 2 para la línea de presión de confinamiento (Fig. 3.20).

Cámara de agua desairada (CAD): Los IBA evitan que entren burbujas de aire en el sistema durante el desarrollo del ensayo, pero existen aspectos de los cuales resulta ineficaz.

El agua de la que se dispone a priori en los ensayos no está totalmente desairada, si no que contiene aire disuelto afectando: Las líneas y medidores de volumen y el líquido de confinamiento.

En ambos casos las lecturas de los medidores de volumen se ven afectadas, donde este aire disuelto experimenta importantes cambios de volumen frente a variaciones de presión impuestas. Para evitar estos dos efectos se ha optado para comunicar el agua a presión con una cámara de agua desairada (CAD), de manera que el aire del sistema migre por difusión a esta segunda cámara. Esta cámara (CAD) tiene una entrada superior por donde se comunica una presión negativa de aire, por medio de una bomba de succión. Para mantener la eliminación de aire por difusión durante todo el ensayo es preciso que el agua de la cámara CAD se desaire con cierta regularidad sin que resulte afectada la línea de presión de confinamiento, con este propósito se ha realizado una conexión en *by pass* entre

las dos entradas de la cámara que permiten mantener la presión de confinamiento mientras se extrae aire de la cámara CAD (Fig. 3.20).

B.2.1.4 Variación de tensiones y control de las trayectorias tensionales

Las tres presiones generadas que afectan al estado tensional de la muestra son: presión de confinamiento (σ_3), presión de aire (u_a) y presión de agua (u_w). En los ensayos, la presión de aire (u_a) es mantenida constante. La tensión de confinamiento (σ_3) y la presión de agua (u_w) se impusieron a una velocidad de variación constante. Se ha utilizado un motor reductor de corriente continua, el cual es ensamblado a dos reductores conectados en serie acoplado a un regulador Fairchild modelo 10, (conectado a un sistema interfase) permitiendo los cambios de presión de confinamiento o los cambios de succión. Las características del motor reductor y de los reductores son las siguientes:

Motor reductor de corriente continua

- Marca:	HELY
- Tipo:	MR 52-45-H
- Potencia útil en el eje:	75 W
- Reducción a la salida:	1/571
- Par máximo a la salida:	35 mN

1er Reductor Acoplado en serie

- Marca:	Mecánica Moderna
- Tipo:	EP84-102
- Reducción a la salida:	1/230

2do Reductor Acoplado en serie al 1er reductor

- Reductor por engranajes con tres salidas

B.3 Metodología de los ensayos

B.3.1 Pasos previos

- Saturación del disco cerámico (AVEA) con agua destilada y desairada, durante un periodo de tiempo, como mínimo 2 días (Bishop & Henkel, 1957).
- Se determina la permeabilidad al agua del disco cerámico. $k_{d0} = 1.1 \times 10^{-10}$ m/s (Fig. 3.15).
- Se desmonta el cuerpo superior, dejando una cubierta de agua destilada sobre la superficie del disco cerámico para evitar su desaturación durante los pasos siguientes.
- El agua de la cámara CAD se desairea con una bomba de succión en intervalos de 15 min.

- Las líneas de los medidores de volumen, así como los medidores de volumen y los interceptores de burbujas de aire (IBA) se llenan con agua desairada proveniente de la cámara CAD.
- Se circula agua proveniente de la cámara CAD a través del sistema de presión de agua (u_w) y de los conductos de la presión de confinamiento.
- Al finalizar los pasos anteriores, la cantidad de agua desairada de la cámara CAD ha disminuido, por lo que se requiere nuevamente su llenado y desairar.

B.3.2 Preparación de la muestra

El procedimiento de compactación es realizado en una cámara triaxial convencional, compactando la muestra en condiciones isotropas (Fig. C.1), en el Capítulo 4 se explica con detalle el procedimiento de compactación.

- La probeta compactada se coloca sobre el dispositivo giratorio para su labrado.
- La probeta compactada (Fig. C.1) se coloca sobre el dispositivo giratorio, se labra con el anillo cortador ($\phi=20$ mm, $h=20$ mm) forzando ligeramente el anillo para que penetre en la muestra con ayuda de un cuchillo o cortador de alambre, girando al mismo tiempo la base, procurando no modificar sus condiciones iniciales de humedad y densidad. Al llenar por completo el anillo cortador, enrasar las caras de la probeta cortando el material sobrante con el alambre acerado montado en un arco. Posteriormente, la probeta es extraída del anillo cortador.
- Se determina su contenido de humedad inicial con el material sobrante del labrado. La probeta a ensayar, se pesa y se verifican sus dimensiones, anotando los datos en la hoja de registro.

B.3.3 Montaje

- Un recubrimiento delgado de grasa de silicona es colocado alrededor del pedestal y cabezal, para garantizar la adherencia de la membrana.
- Tan pronto como la probeta entra en contacto con el disco cerámico (AVEA) se abre el sistema de presión de agua a presión atmosférica, para que el suelo absorba agua por capilaridad para recuperar el equilibrio de su succión inicial.
- Colocación de la membrana:
 - Se ha optado por una membrana de látex de 0.3 mm de grueso (Fig. B.2). El ajuste de la membrana se consigue empleando juntas tóricas en la parte inferior y superior (Fig. B.3).
 - El acoplador de membranas (Fig. B.3) es un pequeño complemento destinado a tal efecto: consiste en una pequeña pieza exteriormente cilíndrica e interiormente resulta el molde del

conjunto cabezal–muestra–pedestal. El procedimiento para colocar la membrana con este instrumento es el siguiente:

- Se recorta un dedo del guante quirúrgico y se introduce en el acoplador.
 - Se succiona el acoplador por el orificio de su parte superior. En este momento la membrana queda adherida al contorno interior del acoplador.
 - Manteniendo la succión se ajusta el acoplador al conjunto cabezal–muestra–pedestal y después se libera la succión mantenida hasta el momento. En este instante la membrana se adherirá elásticamente al conjunto cabezal–muestra–pedestal.
 - Seguidamente se recorta la parte terminal de la membrana que sobra por la parte superior del cabezal que contienen un volumen de aire no deseado.
 - Finalmente se utiliza el mismo acoplador para estirar la tórica de ajuste de la membrana con el pedestal y cabezal.
 - Es importante remarcar que el colocado de la membrana se ha de efectuar con el conducto de aire abierto a presión atmosférica, para que no quede aire entre la membrana y la muestra (Fig. B.2).
- Se ensamblan los dos cuerpos del equipo con 8 tornillos de denominación M10x30.
 - Llenado de la cámara con agua destilada proveniente de la cámara CAD por gravedad, para evitar formar burbujas de aire manteniendo abierto el conducto que nos permite verificar el llenado de la cámara (Fig. B.4).
 - Una vez realizado el llenado de la cámara isotropa, llenar nuevamente la cámara CAD y conectar la bomba de vacío y desairar el agua en intervalos de 15 minutos.

B.3.4 Desarrollo del ensayo

- Se impone una pequeña presión de confinamiento de 25 kPa, para reducir errores debido a movimientos de acoplamiento, así como verificar posibles fugas de agua del sistema.
- La presión de aire y de confinamiento, se incrementan simultáneamente manteniendo una diferencia de 25 kPa hasta alcanzar la tensión media neta inicial de ensayo ($\sigma_m - u_a$).
- La succión matricial se aplica simultáneamente, 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 la condición inicial en tensión y succión, tras la compactación isotropa en la muestra. Estas condiciones se mantienen como mínimo durante dos días, para garantizar las condiciones iniciales del ensayo.

- En trayectorias de carga–descarga, la presión de cámara se impone por medio del motor reductor una velocidad de variación constante de 0.04 MPa/día hasta llegar a la tensión media neta ($\sigma_m - u_a$) deseada bajo succión constante. Se registran lecturas de los cambios de volumen de agua de la cámara para definir la curva tiempo–deformación.
- En las trayectorias de mojado–secado se varía la presión de agua con el motor reductor a una velocidad de variación constante de 0.02 MPa/día, hasta alcanzar una diferencia igual a la succión deseada ($u_a - u_w$), bajo una tensión media neta constante ($\sigma_m - u_a$). Se registran las lecturas del cambio de agua para determinar la humedad y tiempo de equilibrio.

B.3.5 Desmontaje

- Manualmente se reduce a cero la presión de agua (u_w). Se cancela el sistema de presión de agua (u_w) para evitar su pérdida de la muestra durante el proceso de descarga.
- Manualmente se reduce simultáneamente la presión de aire (u_a) y de confinamiento (σ_3) con una diferencia de tensión media neta sobre la muestra de 20 kPa hasta obtener una presión nula.
- La muestra es removida del pedestal y cuidadosamente extraída de la membrana.
- Medir las dimensiones de la probeta para corroborar con las lecturas tomadas del medidor de volumen durante el ensayo y anotar el valor en la hoja de registro.
- La muestra se corta en 4 partes aproximadamente iguales para determinar su contenido de agua. Cada parte de la muestra se pasa a una cápsula numerada y tarada y es introducida en un horno a 110 °C durante 24 horas como mínimo. Anotar los valores en la hoja de registro.

B.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 medidores de volumen de agua.
- Realizar constantemente un flujo a presión en el sistema de presión de agua (u_a) para eliminar el aire disuelto a través del disco cerámico.
- Registrar suficientes lecturas de tiempo–cambio de volumen, para definir completamente el comportamiento hidráulico–deformacional.

B.5 Formato y hoja de registro