

Trabajo de Fin de Grado

**PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE LA
CÉLULA DE ROWE, UN EQUIPO DE
LABORATORIO PARA ENSAYOS DE
CONSOLIDACIÓN RADIAL**

Alumno: JOSÉ ANTONIO JIMÉNEZ VALERA

Director: GONZALO GARCÍA ROS
Codirector: IVÁN ALHAMA MANTECA

Julio 2018

Agradecimientos

Al director del trabajo Gonzalo García Ros, por el tiempo invertido en la realización del mismo, tanto en la organización como en la realización e interpretación de ensayos, la gran disponibilidad ofrecida y su amabilidad.

Al codirector Iván Alhama Manteca por ofrecerme la realización de éste apasionante proyecto y por el tiempo dedicado.

A Francisco Alhama, por ayudarnos en la realización de los primeros ensayos y a obtener conclusiones de los mismos.

A Calixto, por su ayuda en el laboratorio y cercanía.

A mis padres, por apoyarme cada día y estar siempre ahí para todo lo que necesite.

Índice

1	Introducción y objetivos	1
1.1	Resumen	1
1.2	Objetivos y alcance.....	1
2	Fundamentos teóricos	3
2.1	Teoría de consolidación unidimensional	3
2.1.1	Introducción.....	3
2.1.2	Analogía mecánica	5
2.1.3	Modelo matemático de la consolidación unidimensional	6
2.2	Teoría de consolidación radial	11
2.2.1	Introducción.....	11
2.2.2	Teoría de consolidación radial de Barron.....	12
2.3	Ensayo de consolidación unidimensional. Norma UNE 103-405-94.....	16
2.3.1	Objeto del ensayo y campo de aplicación.....	16
2.3.2	Aparatos y materiales	17
2.3.3	Preparación de la probeta.....	18
2.3.4	Procedimiento de operación	19
2.3.5	Resultados obtenidos	21
2.4	La norma BS 1377-6 1990. Ensayos de consolidación y permeabilidad en células hidráulicas con medida de la presión intersticial.....	21
2.4.1	Ámbito y equipos	21
2.4.2	Definiciones.....	22
2.4.3	Determinación de las propiedades de la consolidación con la ayuda de una célula hidráulica	23
2.4.4	Tipos de ensayos.....	23
2.4.5	Célula de consolidación hidráulica y accesorios	25
2.4.6	Descripción de ensayos.....	27
2.4.7	Coeficiente de consolidación	29
2.4.8	Medida y cálculo de la permeabilidad vertical	30
2.4.9	Medida y cálculo de la permeabilidad horizontal.....	32
2.4.10	Informe del ensayo	33
3	Aparatos de laboratorio para ejecución de ensayos y preparación de muestras.....	35
3.1	La célula de Rowe-Barden.....	35
3.1.1	Partes de la Célula Rowe del laboratorio de Geotecnia de la UPCT:	35
3.2	Módulo de adquisición de datos Cyber-Plus Evolution.....	41
3.2.1	Descripción.....	41

3.2.2	Características técnicas y funcionamiento	41
3.3	Sensores para registro de datos	44
3.4	Material para preparación de muestras y ensayos	46
3.4.1	Diferentes utensilios y material de laboratorio utilizado	46
3.4.2	Determinación del límite líquido. Método del penetrómetro de cono	49
4	Puesta en funcionamiento de la Célula de Rowe	51
4.1	Montaje de la célula	51
4.2	Equipo de presión y compresor	54
4.3	Ensayos de comprobación	56
4.3.1	Ensayo para comprobar la estanqueidad	56
4.3.2	Primer ensayo de prueba con arcilla y drenaje radial exterior	57
5	Ensayos registrados con la célula de Rowe	61
5.1	Selección de muestras	61
5.1.1	Características de la arena suelta:	61
5.2	Ensayos	62
5.2.1	Ensayo 01: Ensayo no drenado con arena ligeramente compactada	62
5.2.2	Ensayo 02: Drenado a 0,5 bares	64
5.2.3	Ensayo 03: 1 bar drenado	70
5.2.4	Determinación de la permeabilidad en los ensayos drenados	75
5.2.5	Determinación de las curvas edométricas	76
5.2.6	Fotos realizadas durante el ensayo no drenado	80
5.2.7	Fotos realizadas durante el ensayo drenado a 0,5 bares	83
5.2.8	Fotos realizadas durante el ensayo drenado a 1 bar	84
6	Análisis y discusión de resultados	87
6.1	Ensayo no drenado	87
6.2	Ensayo drenado a 0,5 bares	87
6.3	Ensayo drenado a 1 bar	88
6.4	Propiedades del suelo obtenidas de los ensayos con la célula de Rowe	88
7	Conclusiones y comentarios finales	89
8	Referencias	91

1 Introducción y objetivos

1.1 Resumen

El Área de Ingeniería del terreno del departamento de Ingeniería Civil, disponía tanto de la célula de Célula Rowe, como de los equipos necesarios para su puesta a punto y posterior funcionamiento. Todas las partes que la componen estaban embaladas, a la espera de que surgiera un proyecto interesante que justificara su uso.

El trabajo está estructurado en una primera parte en la que se describe la teoría de consolidación, diferenciando entre consolidación unidimensional y consolidación radial. Para realizar ensayos de consolidación unidimensional, tomamos como referencia la norma UNE 103-405-94, y para consolidación radial, hemos trabajado con la BS 1377-6 1990. Ambas normativas son descritas en el trabajo.

Otro grueso del trabajo son los aparatos y equipos utilizados para la ejecución de ensayos y para la preparación de muestras. Éste apartado incorpora la descripción de la célula Rowe-Barden, el módulo de adquisición de datos, los sensores de registro de datos y demás material necesario.

El siguiente apartado es el relacionado con la puesta en funcionamiento de la célula, es decir, con su montaje, la explicación de cómo funciona el compresor y los diferentes ensayos de comprobación realizados antes de registrar datos.

Una vez montada la célula y realizados los ensayos previos, se realizan las pruebas de laboratorio en las que van a ser registradas tanto presiones intersticiales como deformaciones de la muestra.

Finalmente los resultados son analizados y discutidos y se establecen las conclusiones pertinentes.

1.2 Objetivos y alcance

1. Revisar toda la teoría de consolidación vertical y de consolidación radial, incluyendo la normativa para la realización de ensayos de consolidación vertical.
2. Familiarizarse con la célula de consolidación hidráulica de Rowe. Con las piezas que la forman, sus utilidades y con los tipos de ensayo que se pueden llevar a cabo con ella.
3. Interpretación de la norma BS 1377-6 1990, para conocer el equipo, una serie de definiciones y los ensayos que se pueden ejecutar.
4. Poner en funcionamiento la célula Rowe. Realizar el montaje inicial, puesta a punto de elementos necesarios, de los medidores y del equipo de adquisición de datos (módulo Cyber-Plus Evolution). Trabajar con el compresor de aire y con el equipo de presión hidráulico.

5. Crear un manual/guía para la utilización de la célula de consolidación hidráulica y de los equipos necesarios para realizar los diferentes ensayos.
6. Realización de ensayos para comprobar el correcto funcionamiento de los equipos, asegurándonos de que el funcionamiento se entiende y es el correcto, y conocer las variadas utilidades de éstos equipos.
7. Analizar los resultados obtenidos en los ensayos, tanto desde el punto de vista de análisis de la muestra de suelo (obtención de propiedades como el coeficiente de consolidación, su permeabilidad y las curvas edométricas), como desde el punto de vista del correcto funcionamiento y operación de la célula.

2 Fundamentos teóricos

2.1 Teoría de consolidación unidimensional

2.1.1 Introducción

Un suelo se puede considerar como un esqueleto de gránulos sólidos, los cuales encierran vacíos que pueden estar rellenos de gas, de líquido, o de una combinación de ambos (Taylor [1960]).

Si una determinada carga actúa sobre una muestra de terreno de tal manera que el volumen disminuye, tenemos tres factores a los que atribuir esta disminución:

1. Una compresión de la materia sólida.
2. Una compresión del agua y del aire que ocupan los vacíos.
3. Un escape de aire y/o de agua de los vacíos.

La materia sólida y el agua (la consideramos incompresible) no sufren un cambio apreciable en su volumen. Por lo tanto si nuestra muestra de terreno está saturada, la disminución del volumen total se debe a un escape de agua procedente de los vacíos.

Si la masa de suelo está parcialmente saturada, la situación es más compleja, ya que la cantidad que haya de aire compresible dentro de los poros puede permitir una compresión apreciable de la muestra en su totalidad incluso si no hubiera escape de agua.

Por tanto, podemos afirmar que la compresibilidad de un suelo no depende de manera destacable de la compresibilidad de los granos sólidos que lo componen. La compresibilidad de una masa de suelo depende de la rigidez de su esqueleto y, a su vez, la rigidez depende del arreglo estructural de las partículas que lo forman. Si es un suelo de granos finos, depende además del grado de unión entre las partículas adyacentes.

Para explicar el fenómeno de consolidación (Berry y Reid [2000]), partimos de un depósito de suelo el cual, se somete a un incremento de esfuerzos totales debido, por ejemplo, a la carga aplicada por la construcción de un edificio o de un terraplén. Éste incremento de esfuerzos totales produce en el suelo un exceso de la presión intersticial.

Teniendo en cuenta que el agua no es capaz de resistir los esfuerzos cortantes, el exceso de presión intersticial se disipa mediante un flujo de agua hacia el exterior. La permeabilidad de la masa de suelo determinará la velocidad a la cual se produce éste proceso.

La consolidación es la disipación del exceso de presión intersticial debido al flujo de agua hacia el exterior.

Éste proceso tiene dos consecuencias significativas:

1. Lleva a una reducción del volumen de vacíos y por tanto a la reducción del volumen total de la masa de suelo. Se manifiesta en el asentamiento de la superficie de terreno y por lo tanto en un asentamiento de la estructura.
2. Mientras ocurre la disipación del exceso de presión intersticial, la tensión efectiva en la masa de suelo aumenta y, por tanto, se incrementa su resistencia a esfuerzos cortantes. Por lo tanto, podemos deducir que la consolidación y la resistencia al cortante están correlacionados.

Cuando un suelo se consolida, se produce una disminución de la relación de vacíos acompañado de un incremento de la tensión efectiva. Debemos diferenciar entre la consolidación en suelos granulares y la consolidación en suelos arcillosos. Si tenemos un suelo formado por arenas (granular) la permeabilidad es relativamente alta y el exceso de presión intersticial puede disiparse de manera inmediata. Por tanto, el asentamiento de la estructura (en términos generales) finaliza al final de la construcción de nuestra estructura.

Si nuestro suelo es arcilloso, la permeabilidad es muy baja. Por lo tanto el exceso de presión intersticial se disipa muy lentamente y la estructura puede continuar asentándose durante varios años después de haber finalizado la construcción. Éste caso es el que tiene más interés y se necesita predecir tanto el asentamiento total de la estructura como la velocidad la cual se produce el asentamiento.

El proceso de consolidación involucra en tres dimensiones el flujo del agua intersticial y las deformaciones del depósito de suelo, pero las teorías tridimensionales son demasiado complejas y llevarlas a la práctica es difícil.

En contraposición tenemos el caso de consolidación unidimensional, que es el más simple (matemáticamente hablando) y el más usado en la práctica. A su vez es la base de prácticamente todos los cálculos de asentamientos.

2.1.2 Analogía mecánica

El proceso de consolidación se puede entender mejor mediante la analogía mecánica (Taylor [1960]). En la Figura 2.1 se pueden observar varias longitudes asumidas para un resorte que está sometido a diferentes cargas.

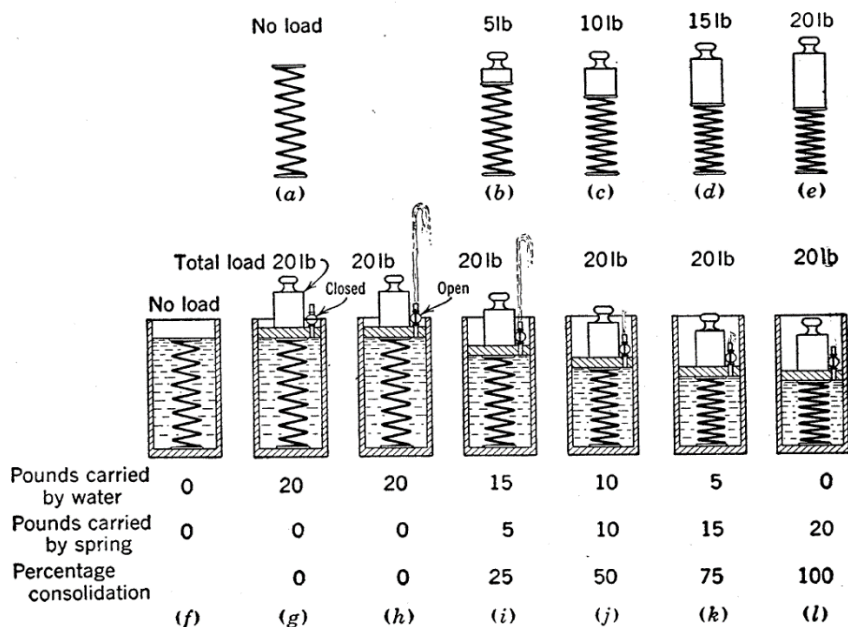


Figura 2.1 Analogía mecánica del pistón y el resorte. (Taylor [1960])

En la fila inferior, se asume el mismo resorte metido en un cilindro que se encuentra sellado y completamente lleno de agua.

En (g) hay un pistón sin fricción con el cilindro, pero ajustado completamente a su pared. Está cargado con un total de 20 libras. El pistón está provisto de un grifo, el cual asumimos que está cerrado y por lo tanto no permite que el agua se escape. Bajo la carga de 20 libras a la que está sometido, el resorte acabará tomando la longitud que se muestra en (e), pero no lo puede hacer a menos que el pistón baje, pero si el agua no puede escapar el pistón tampoco puede bajar. Se asume que la compresibilidad del resorte es tan grande que las fatigas que se producen tanto en el agua como en las paredes del cilindro son insignificantes en comparación.

Por lo tanto, el resorte no puede hacer frente a ninguna parte de la carga que tiene encima y el agua no tendrá más remedio que soportarla toda. (Podríamos decir que no hay consolidación bajo la carga aplicada si pudiéramos aplicar el término consolidación al resorte.)

Supongamos que el grifo se abre. En (h) podemos ver lo que pasaría después. Como resultado de la presión, el agua sale rápidamente del cilindro. En el primer momento, las condiciones de presión se mantienen invariables.

Al escapar el agua, el pistón baja cada vez más y el resorte se va comprimiendo. En (i) la longitud del resorte es la misma que en (b). Por lo tanto, el agua deberá cargar 15 libras, mientras el resorte carga 5. Se habrá producido un cuarto de la consolidación.

En (j) la longitud será la misma que en (c), en (k) la misma que en (d) y finalmente en (l) la misma que en (e).

El tiempo requerido para que el resorte pase de un estado de consolidación al siguiente, va a depender de la rapidez con la cual el agua escapa, es decir, va a depender del tamaño del orificio por donde sale.

2.1.3 Modelo matemático de la consolidación unidimensional

2.1.3.1 Modelo de Terzaghi

El primer modelo de cálculo matemático de la consolidación de suelos (Iglesias, [1997]) fue propuesto por Karl von Terzaghi (Terzaghi [1923]). Es un modelo unidimensional en el cual se supone que la deformación del suelo y el flujo de agua intersticial se producen en la misma dirección (generalmente vertical).

Hipótesis del modelo:

- El suelo es homogéneo.
- El suelo está saturado y permanece saturado durante el proceso completo de la consolidación. Por lo tanto, tiene dos fases: agua intersticial y el esqueleto de suelo. Podemos admitir que todos los suelos que se sitúan bajo el nivel freático están saturados, a excepción de ciertos suelos sedimentarios de origen lacustre, marino o fluvial que poseen materia orgánica cuya descomposición anaeróbica desprende gas en su interior. Éste fenómeno da un grado de saturación menor a la unidad. Si queremos tener en cuenta el gas o aire, debemos recurrir a modelos trifásicos.
- Tanto el agua como los granos sólidos del suelo son incompresibles.
- Las deformaciones son únicamente verticales. Esta hipótesis sólo se cumple en el caso de carga uniforme de una capa de suelo cohesivo drenada por sus caras inferior y/o superior. Esto es difícil que se cumpla, ya que ni existen capas de suelo de ancho infinito ni cargas uniformes aplicadas sobre una superficie infinita.
- Existe una relación lineal entre la tensión aplicada al esqueleto o tensión efectiva y sus variaciones de volumen, que son proporcionales a las deformaciones verticales.

$$\Delta e = -a_v \Delta \sigma'_v$$

donde:

Δe : variación del índice de poros.

$\Delta \sigma'_v$: variación de la tensión efectiva vertical.

a_v : coeficiente de compresibilidad (constante).

La experiencia deja en evidencia que existen asientos diferidos después de la estabilización de las tensiones efectivas, por lo que podemos distinguir dos tipos de consolidación.

1. Consolidación primaria: Asiento diferido que tiene su origen en los fenómenos hidrodinámicos de flujo del agua intersticial en el esqueleto del suelo.
2. Consolidación secundaria: Asiento después del final de la consolidación, manifestación de la fluencia del esqueleto del suelo, debida las variaciones de la ordenación de los granos de suelo como consecuencia de la viscosidad de las capas de agua adsorbida en el contacto intergranular.

Ésta consolidación da lugar a asientos muy pequeños en la mayoría de suelos, por lo que puede, en términos generales, despreciarse. En el caso de suelos cohesivos con gran contenido en materia orgánica o en turbas, éste asiento puede llegar a ser el 40% del total.

- El flujo hidráulico es vertical únicamente.
- Se supone válida la ley de Darcy.
- El coeficiente de permeabilidad K es constante en la capa de suelo y durante toda la consolidación. Depende de dos factores principalmente:
 1. Del tamaño medio de los huecos, representado por el índice de huecos.
 2. De la viscosidad del líquido intersticial, que, a su vez, depende de la temperatura.
- K es inversamente proporcional a la viscosidad del líquido intersticial.
- El suelo experimenta deformaciones pequeñas a lo largo de la consolidación.

2.1.3.2 Teoría de Terzaghi para la consolidación vertical

2.1.3.2.1 Deducción de la ecuación de comportamiento

Consideramos un depósito de suelo homogéneo, saturado, de longitud lateral infinita y sometido a una carga q uniforme aplicada en toda la superficie (Figura 2.2). El suelo se sitúa sobre una base impermeable y drena libremente por su cara superior. El exceso de presión intersticial se disipa mediante el flujo del agua intersticial en sentido vertical y ascendente hacia la superficie, ya que el gradiente hidráulico solamente se presenta en dirección vertical. Se producirán deformaciones en la dirección vertical.

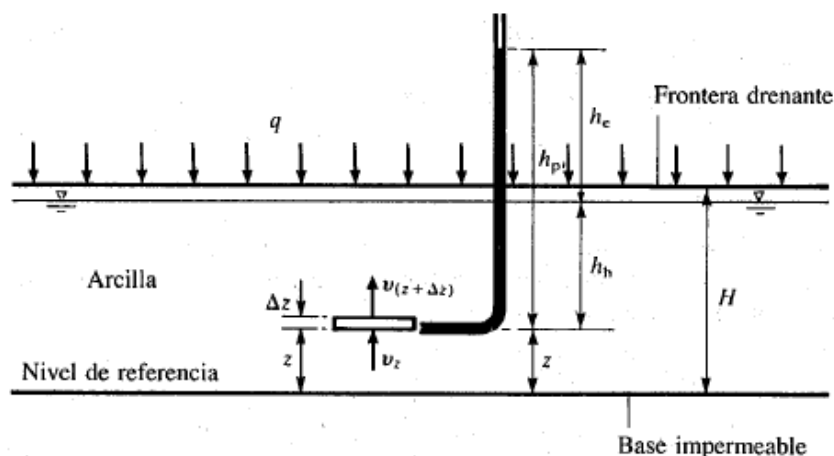


Figura 2.2 Consolidación vertical de una capa de suelo. Berry y Reid [2000]

Para el elemento de suelo tenemos que:

v_z : es la velocidad vertical del flujo que entra en el elemento.

$v_{z+\Delta z}$: es la velocidad vertical del flujo que sale del elemento.

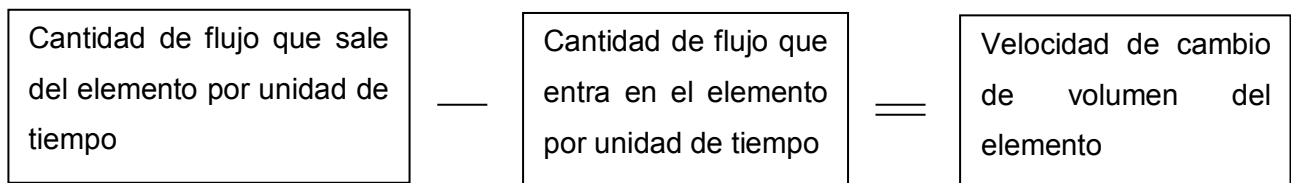
Aplicando el desarrollo en serie de Taylor:

$$v_{z+\Delta z} = v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} \Delta z + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \Delta z^2 + \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 v_z}{\partial z^3} \Delta z^3 + \dots$$

Ya que Δz se toma muy pequeño, podemos suponer que los términos de segundo orden y de orden superior se pueden despreciar debido a su insignificancia. Entonces tenemos:

$$v_{z+\Delta z} = v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} \Delta z$$

A partir del principio de continuidad del volumen, se tiene que:



Por lo tanto:

$$\left[v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} \Delta z \right] A - A v_z = \frac{\partial V}{\partial t}$$

donde A es el área plana del elemento y V es su volumen. Por lo tanto:

$$V \frac{\partial v_z}{\partial z} = - \frac{\partial V}{\partial t}$$

Al suponer que las partículas de suelo y el agua intersticial son incompresibles, la velocidad de cambio de volumen respecto del elemento $\frac{\partial V}{\partial t}$ es igual a la velocidad de cambio de volumen de vacíos:

$$V \frac{\partial v_z}{\partial z} = - \frac{\partial V_v}{\partial t}$$

Si V_s es el volumen de sólidos en el elemento y e es la relación de vacíos, por defición

$V_v = e \cdot V_s$. Por lo tanto:

$$V \frac{\partial v_z}{\partial z} = - V_s \frac{\partial e}{\partial t}$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t}$$

A partir de la ecuación de Darcy, se obtiene para el flujo vertical del agua intersticial a través del elemento:

$$v_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

Donde h es la cabeza total en el elemento y k_z es el coeficiente de permeabilidad vertical de nuestro suelo. En la terminología usada por Terzaghi, k_z es k_v :

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(k_v \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t}$$

Las deformaciones verticales son pequeñas en la práctica. Por lo tanto podemos suponer que la permeabilidad del suelo permanece constante durante la aplicación de la carga:

$$k_v \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t}$$

Si tomamos como nivel de referencia la base del suelo, la cabeza h total del elemento:

$$h = z + h_h + h_e$$

donde:

z: cabeza de posición

h_h : cabeza hidrostática

h_e : exceso de cabeza de presión

Si suponemos que $z + h_h$ permanece constante (teoría de pequeñas deformaciones):

$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 h_e}{\partial z^2}$$

El exceso de presión intersticial u_e en el elemento es:

$$u_e = \rho_w g h_e$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2}$$

Sustituimos y obtenemos:

$$k_v \frac{1 + e}{\rho_w g} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial e}{\partial t}$$

Tenemos finalmente una ecuación con dos incógnitas: u_e y e . Necesitamos una ecuación adicional que relacione la relación de vacíos con el exceso de presión intersticial.

Debemos considerar el comportamiento del suelo bajo esfuerzo vertical-deformación. Terzaghi lo tomó como lineal para un incremento de carga en particular. Como el cambio de la relación de vacíos es proporcional al cambio de deformación, implica la existencia de una relación lineal $e-\sigma'_v$ que sería razonable siempre y cuando la relación incremento de presión sea casi igual a la unidad (Figura 2.3).

$$a_v = -\frac{\partial e}{\partial \sigma'_v}$$

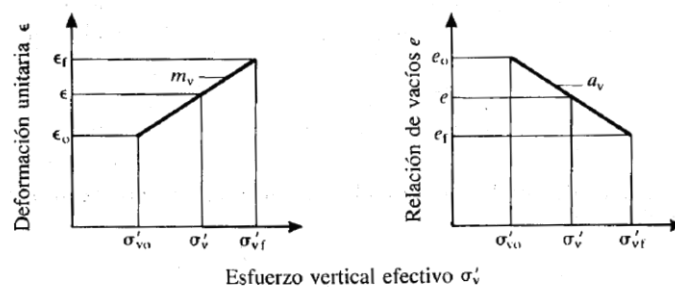


Figura 2.3 Deformación unitaria e índice de poros en función de la tensión efectiva. Berry y Reid [2000]

Si σ_v es la tensión vertical total sobre el elemento de suelo, σ'_v es la tensión efectiva vertical en el elemento y u es la presión intersticial correspondiente:

$$\sigma_v = \sigma'_v + u$$

$$u = u_h \text{ (presión hidrostática) } + u_e \text{ (exceso de presión)}$$

Si derivamos con respecto al tiempo, obtenemos:

$$\frac{\partial \sigma'_v}{\partial t} + \frac{\partial u_e}{\partial t} = 0$$

Por lo tanto:

$$\frac{\partial \sigma'_v}{\partial t} = -\frac{\partial u_e}{\partial t}$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \frac{\partial e}{\partial \sigma'_v} \frac{\partial \sigma'_v}{\partial t}$$

Si sustituimos en las tres ecuaciones anteriores:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = a_v \frac{\partial u_e}{\partial t}$$

Sustituimos en la fórmula del k_v :

$$k_v \frac{1 + e}{\rho_w g a_v} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t}$$

Esta ecuación es más conveniente expresarla de la siguiente manera:

$$c_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t}$$

siendo

$$c_v = k_v \frac{1 + e}{\rho_w g a_v}$$

donde:

c_v es el coeficiente de consolidación vertical.

Las soluciones para esta ecuación diferencial pueden hallarse en numerosos textos (Taylor [1960]; Berry y Reid [2000]), tanto para el exceso de presión intersticial (u) como para el grado medio de consolidación \bar{U}_v .

2.2 Teoría de consolidación radial

2.2.1 Introducción

Como bien explica Iglesias [1997] en su libro "*Mecánica del suelo*", en California, en el año 1936, aparece por primera vez la técnica de los drenes verticales de arena o de grava para acelerar el proceso de consolidación en suelos cohesivos.

Para dimensionar los drenes, había que fijar dos parámetros: La separación de los drenes y el diámetro de los drenes.

En el interior de los drenes, la distribución de presión intersticial es hidrostática (aproximadamente), lo que crea un gradiente hidráulico en la dirección de los mismos. A la consolidación vertical se le suman una filtración o flujo de agua hacia los drenes.

Para su cálculo, consideramos un dren aislado, de diámetro d , rodeado de su zona de influencia (volumen de suelo cuya agua intersticial tiende a dirigirse hacia dicho dren).

Esta zona de influencia puede ser un prisma vertical de sección hexagonal o cuadrada. Para simplificar el cálculo, se la asimila a un cilindro recto coaxial con el dren y cuya sección es igual a la superficie de la malla de la red de drenes, de donde se obtiene un diámetro D que depende de la distancia L entre drenes.

Las teorías de consolidación radial más utilizadas son:

- Teoría de Terzaghi [1923] y Rendulic [1935]
- Teoría de Barron [1948]

2.2.2 Teoría de consolidación radial de Barron

En la Figura 2.4 se muestra un depósito homogéneo de arcilla saturada, cuya dimensión lateral es infinita. Está sometido a una carga uniforme q aplicada en la totalidad del área de la superficie.

La arcilla reposa sobre una base impermeable y puede drenar libremente por su cara superior. Si la arcilla es blanda, es habitual acelerar la velocidad de consolidación para limitar el asentamiento a largo plazo a un valor que sea razonable. Esto puede hacerse instalando un sistema de drenaje vertical de arena. El exceso de presión intersticial se disipa por los flujos verticales y radial conjuntamente, pero las deformaciones originadas se producirán en la dirección vertical.

Si la cimentación que estamos utilizando (la que aplica la carga) es flexible, la superficie se asienta de manera diferencial durante el proceso de consolidación, ya que la arcilla que se encuentra más cerca de los drenajes se va a consolidar con mayor rapidez que el suelo que se encuentre fuera de la zona de influencia. Esto se denomina deformación vertical libre.

Si por el contrario la cimentación es rígida, el asiento será uniforme. Esto se denomina con deformación uniforme.

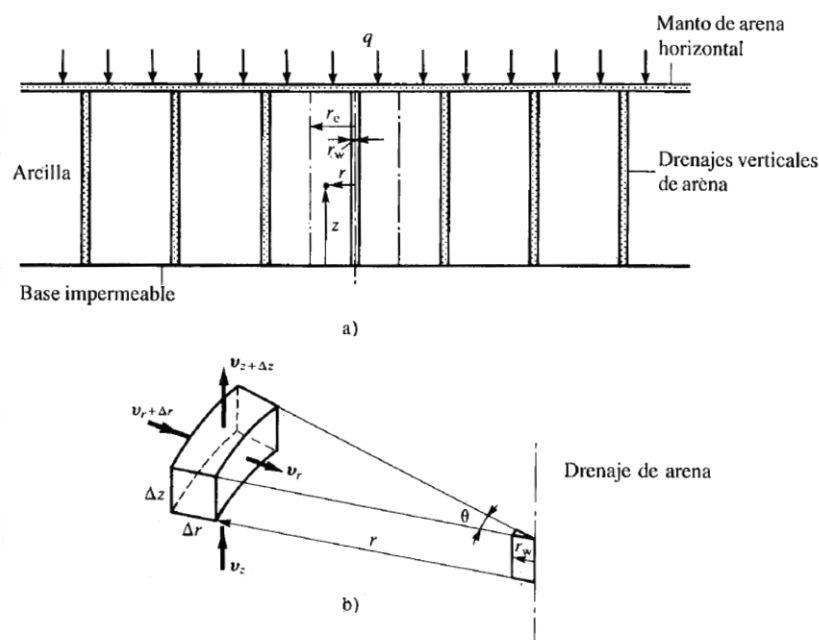


Figura 2.4 Consolidación vertical y radial combinada de un elemento de suelo.
Berry y Reid [2000]

Se adoptan las siguientes hipótesis:

1. Deformaciones en el suelo únicamente verticales.
2. Flujo de agua radial, hacia la superficie exterior del dren.

3. Suelo saturado e incompresible
4. La deformación vertical es proporcional a la variación de tensión efectiva vertical ($-a_v d\sigma'_v$), y no depende de r .
5. Se aplica la Ley de Darcy a la filtración horizontal hacia el dren: $\bar{v}_h = k_h * \bar{I}$
6. Los granos de esqueleto son incompresibles.
7. Suelo homogéneo y sus propiedades son constantes en el tiempo.
8. Deformaciones en el suelo son pequeñas.

Consideramos los flujos radial y vertical del agua intersticial a través de un elemento de suelo de altura z , medida desde la base impermeable y a una distancia radial r del eje vertical del drenaje de arena. Se obtiene la ecuación de comportamiento para la condición de deformación vertical libre:

$$c_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} + c_h \left[\frac{\partial^2 u_e}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_e}{\partial r} \right] = \frac{\partial u_e}{\partial t}$$

$$c_v = \frac{k_v (1+e)}{a_v \gamma_w} \text{ es el coeficiente de consolidación vertical}$$

$$c_h = \frac{k_h (1+e)}{a_v \gamma_w} \text{ es el coeficiente de consolidación horizontal}$$

Carrillo [1942] demostró que $c_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} + c_h \left[\frac{\partial^2 u_e}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_e}{\partial r} \right] = \frac{\partial u_e}{\partial t}$ puede separarse en la ecuación lineal para la consolidación vertical:

$$c_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t}$$

y en la ecuación para la consolidación radial plana:

$$c_h \left[\frac{\partial^2 u_e}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_e}{\partial r} \right] = \frac{\partial u_e}{\partial t}$$

Si \bar{U}_v es el grado de consolidación promedio debido al flujo vertical para un instante de tiempo t determinado y \bar{U}_r es el grado de consolidación promedio debido a flujo radial para el mismo tiempo, el grado de consolidación promedio debido al flujo vertical y radial combinado \bar{U}_{vr} :

$$(1 - \bar{U}_{vr}) = (1 - \bar{U}_v)(1 - \bar{U}_r)$$

Barron [1948] obtiene la solución para la consolidación radial plana para el caso de una carga aplicada de forma instantánea y que luego se mantiene constante.

El exceso de presión intersticial $\Delta u(r,t)$ en el tiempo t y la distancia r del eje del dren es:

$$\Delta u(r, t) = \frac{\overline{\Delta u}(t)}{D^2 F(n)} \left[D^2 \ln \left(\frac{2r}{D} \right) - \frac{4r^2 - d^2}{2} \right]$$

$$\overline{\Delta u}(t) = \overline{\Delta u_0} e^{-\frac{8T_r}{F(n)}}$$

donde:

$\overline{\Delta u}(t)$ = exceso de presión intersticial medio.

$\overline{\Delta u_0}$ = sobrepresión intersticial media inicial.

$N = D/d$: coeficiente geométrico de la red de drenes.

T_r = factor de tiempo radial = $\frac{c_r t}{D^2}$

El grado medio de consolidación \overline{U}_r , para un drenaje hacia el interior y bajo la hipótesis de deformación vertical libre, tiene por expresión:

$$\overline{U}_r = 1 - \sum_{\alpha_1 \alpha_2 \dots}^{\alpha = \infty} \frac{4U_1^2(\alpha)}{\alpha^2(n^2 - 1)[n^2 U_0^2(\alpha n) - U_1^2(\alpha)]} e^{(-\alpha^2 n^2 T_r)}$$

donde:

$$U_1(\alpha) = J_1(\alpha)Y_0(\alpha) - Y_1(\alpha)J_0(\alpha)$$

$$U_0(\alpha n) = J_0(\alpha n)Y_0(\alpha) - Y_0(\alpha n)J_0(\alpha)$$

Siendo:

J_0 , J_1 , Y_0 e Y_1 funciones de Bessel de primer y segundo género (de orden cero y de primer orden según el subíndice),

α_i raíces de Bessel que cumplen que $J_1(\alpha n)Y_0(\alpha) - Y_1(\alpha n)J_0(\alpha) = 0$, $n = r_e/r_w$, donde r_w es el radio del dren, r_e su radio de influencia, y T_r es el factor de tiempo adimensional:

$$T_r = \left(\frac{t c_h}{r_e^2} \right)$$

Por tanto, para un valor de n especificado y para valores del factor de tiempo T_r , puede calcularse el grado medio de consolidación radial \overline{U}_r , Figura 2.5.

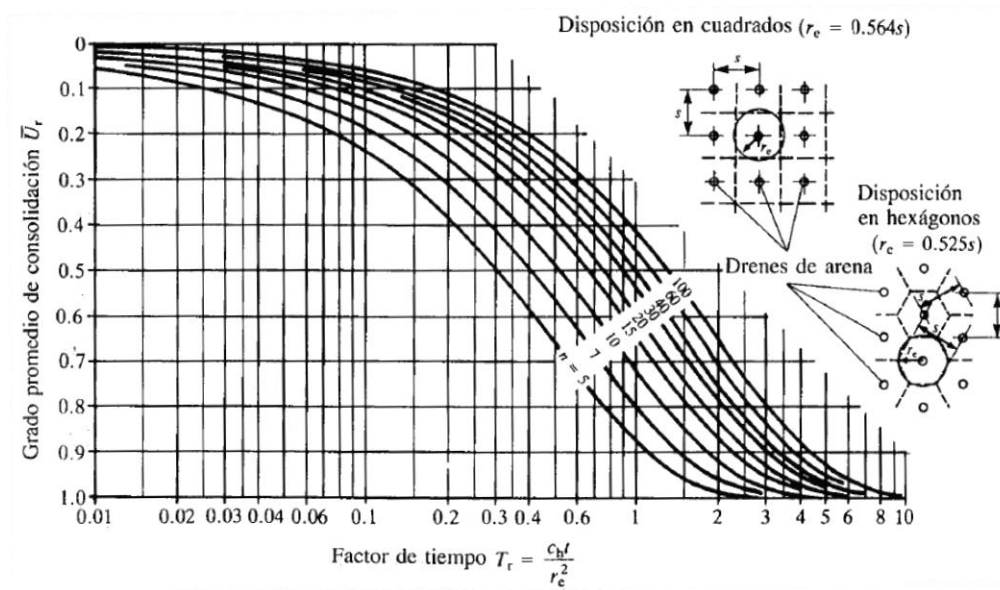


Figura 2.5 Familia de curvas obtenidas para los distintos valores de n (drenaje radial hacia el interior e hipótesis de deformación libre). Berry y Reid [2000]

La figura anterior, muestra la familia de curvas obtenidas para los distintos valores de n . Se observa como la velocidad de consolidación aumenta conforme el parámetro n disminuye.

La ecuación de comportamiento si la deformación vertical es uniforme es la siguiente:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = c_{v,z} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + c_{v,r} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right)$$

Donde \bar{u} es el valor promedio del exceso de presión intersticial a cualquier profundidad.

Si sólo tenemos flujo radial, podemos escribir:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = c_{v,r} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right)$$

Que tiene como solución para el grado medio de consolidación radial \bar{U}_r (Barron [1948]):

$$\bar{U}_r = 1 - e^{-\left(\frac{2T_r}{F(n)}\right)}$$

donde:

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$$

A nivel práctico, puede utilizarse la gráfica mostrada en la Figura 2.5 sin tener en cuenta las condiciones de deformación en la frontera.

Para el caso de un teórico dren periférico, y bajo condiciones de deformación vertical libre, McKinlay [1961] obtuvo:

$$\bar{U}_r = 1 - 4 \sum_{\alpha_1, \alpha_2, \dots}^{\alpha=\infty} \frac{1}{\alpha^2} e^{(-\alpha^2 T_r)}$$

donde: α_i raíces de la función de Bessel $J_0(\alpha) = 0$

Finalmente, para el caso de deformación vertical uniforme, Scott [1963] obtuvo:

$$\bar{U}_r = 1 - e^{(-8T_r)}$$

En la Figura 2.6 se representan las soluciones de Scott [1963] y McKinlay [1961]:

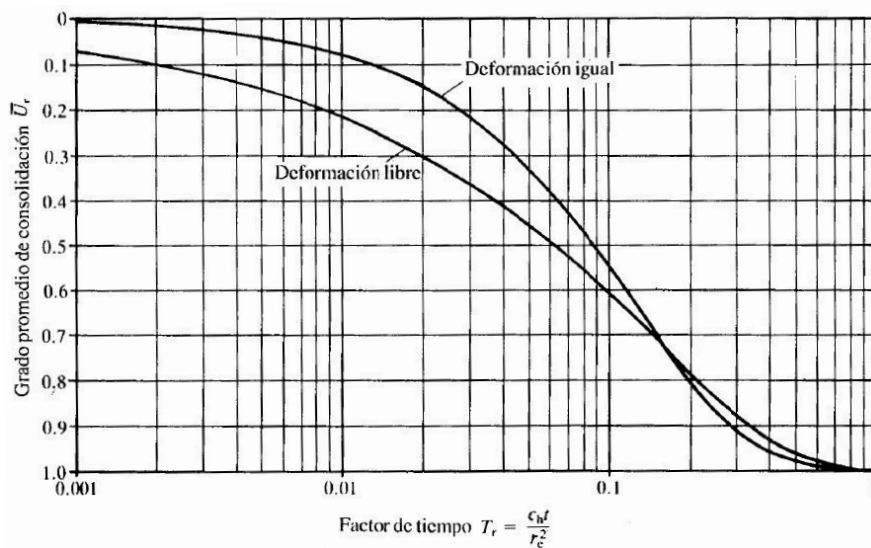


Figura 2.6 Soluciones para el grado medio de consolidación \bar{U}_r , con dren periférico y deformación libre (McKinlay [1961]) o uniforme (Scott [1963]). Berry y Reid [2000]

2.3 Ensayo de consolidación unidimensional. Norma UNE 103-405-94

2.3.1 Objeto del ensayo y campo de aplicación

Se utiliza para determinar las características de consolidación de suelos homogéneos, en los que el tamaño máximo de la partícula no sea superior a la quinta parte de la altura de la probeta utilizada en el ensayo (UNE 103-405 [1994]).

La probeta es cilíndrica y se encuentra confinada lateralmente. Se somete a diferentes presiones verticales y el drenaje se realiza tanto por su cara inferior como por su cara superior. Se deben medir los asientos correspondientes.

Con éste ensayo, se persigue determinar la fase de consolidación primaria del suelo, aunque se puede emplear también para obtener la de consolidación secundaria.

2.3.2 Aparatos y materiales

2.3.2.1 Equipo edométrico

El ensayo debe realizarse en una sala libre de vibraciones y el equipo debe de estar protegido de los rayos directos del sol, de fuentes de calor y de corrientes de aire.

La temperatura de la sala debe mantenerse constante dentro de un margen de $\pm 4^{\circ}\text{C}$.

Elementos esenciales del equipo edométrico:

- Célula edométrica en la que la probeta pueda estar cubierta de agua y sometida a las presiones deseadas.
- Medidor de deformaciones verticales de la probeta.
- Bancada que permita la aplicación de cargas sobre la probeta y además que se mantengan constantes durante cualquier período de tiempo. Generalmente la bancada es de tipo mecánico y actúa a través de un sistema de palanca con pesas.

Los componentes de la célula edométrica son los siguientes:

- Una base metálica, que sea resistente a la corrosión y que no produzca reacciones electroquímicas con el anillo portaprobetas.
- Una pieza que sea del mismo material que la base metálica para fijar el anillo portaprobetas sobre la placa porosa inferior.
- Cuerpo lateral de cierre formando con la base un recipiente estanco y con la altura precisa para que la placa porosa superior quede siempre sumergida en el agua. Puede ser metálico o de plástico transparente.
- Placa/piedra porosa superior. Puede ser de material abrasivo o metálica resistente a la corrosión. En cualquier caso debe permitir el libre drenaje y debe tener un tamaño de poro que evite la intrusión de partículas de suelo. Su deformación debe de ser despreciable en comparación con el suelo.
- Placa/piedra porosa inferior.
- Tuercas de fijación
- Anillo edométrico donde se aloje la probeta de suelo a ensayar. Puede ser confinado lateralmente y no confinado.
- Pistón de carga.

2.3.2.2 Material auxiliar

- Balanza de capacidad suficiente con precisión de 0,01 gramos.
- Disco metálico indeformable debido a las presiones máximas que se aplican en el ensayo, con caras planas y paralelas de un diámetro igual a 1 mm menor que el del anillo portaprobetas y de la misma altura que éste.
- Diferentes elementos que nos permitan determinar la humedad, siguiendo la Norma UNE 103-300.
- Calibre de precisión igual a 0,1 mm.
- Cronómetro.
- Cuchillas.
- Espátulas.

- Cepillos.
- Extractor de muestras que sea similar al que describe la Norma UNE 103-400.
- Elementos necesarios para compactar las muestras a ensayar.

2.3.3 Preparación de la probeta

Dependiendo de la muestra que tengamos, el ensayo se puede preparar de diferentes formas.

La humedad relativa no debe ser inferior al 50% y en el caso de suelos sensibles a los cambios de humedad, es necesario el tallado en cámara húmeda o recinto similar que tenga una humedad relativa del $90\% \pm 5\%$.

2.3.3.1 Preparación por extrusión de una muestra inalterada contenida en un tubo portamuestras

Se necesita un anillo portaprobetas de borde cortante, si el diámetro de la muestra es mayor que el diámetro del anillo. El procedimiento es el siguiente:

Se sujeta el tubo portamuestras en el equipo de extracción y se coloca el anillo de forma que su eje coincida con el del tubo. Si el anillo lleva incorporado bode cortante, éste debe estar en contacto con la superficie de la muestra.

La muestra se extrae de manera que vaya penetrando en el interior del anillo, hasta que sobresalga del mismo.

Se corta la muestra por el otro extremo con una sierra de hilo, dejando un espesor algo mayor que el del anillo.

Si los suelos a ensayar llevan incorporadas partículas gruesas u otros elementos que puedan dar lugar a alteraciones de la probeta durante el proceso de extrusión, se debe usar en su lugar un anillo portaprobetas de borde cortante y cuyo diámetro interior sea igual que el de la muestra.

2.3.3.2 Por tallado. Muestra inalterada en bloque.

Es necesario emplear un anillo con borde cortante.

Se prepara en la muestra, una zona con la superficie horizontal, con un tamaño superior al diámetro interior del anillo y con el cuidado de que la orientación que tenía la muestra en el terreno se mantenga.

Se sitúa el anillo sobre la superficie preparada con el borde cortante en contacto con la superficie.

Se talla un cilindro cuyo diámetro es aproximadamente el diámetro exterior del anillo y de altura superior al anillo.

Se introduce el anillo en la muestra, hasta que ésta sobresalga por la parte opuesta al borde cortante, cortando después por debajo de éste.

2.3.3.3 Por remoldeo

Se realiza la compactación con las condiciones deseadas en un molde determinado y adecuado. Se aplica uno de los procedimientos anteriormente explicado, dependiendo del caso.

2.3.4 Procedimiento de operación

2.3.4.1 Montaje de la célula, en la bancada y preparación del ensayo

Se coloca la placa porosa inferior sobre la base de la célula y después el anillo con la probeta. Sobre la superficie de la probeta se coloca la placa porosa superior y el pistón de carga. Todos los elementos que hay sobre la superficie de la probeta deben quedar centrados.

Si los suelos son de baja capacidad absorción, se elimina el agua libre de las placas porosas antes de colocarlas. Si son de gran capacidad de absorción, se secan al aire antes de colocarlas.

La célula se coloca sobre la bancada y se aplica una libera presión de ajuste no mayor de 3 kPa mediante la colocación de la pesa en el colgadero.

El medidor de deformaciones se sitúa en su posición, dejando suficiente recorrido en el vástago y anotamos la lectura inicial de deformación 0.

2.3.4.2 Realización del ensayo

2.3.4.2.1 Proceso de carga

Aplicación a la probeta de diferentes presiones que se pueden seleccionar de la siguiente secuencia de escalones:

- 0,05; 0,1; 0,2; 0,4; 0,8; 1,5; 3,0; 6,0; 10,0; 15,0 kp/cm².

Lo más normal es aplicar al menos seis escalones consecutivos, de manera que cada presión sea aproximadamente el doble de la anterior. Cada escalón se debe mantener 24 horas con el fin de que la curva que relaciona el índice de poros (e) con las presiones quede bien definida.

En suelos consistentes, la presión inicial puede ser la debida a su peso propio o la que se encuentra un escalón inmediatamente inferior.

Si el suelo a ensayar es expansivo, la presión inicial es inmediatamente superior al de su presión de hinchamiento.

La presión final debe ser superior a la presión vertical máxima que se pueda producir en el terreno. Si es un suelo sobreconsolidado, debe ser por lo menos el doble de la presión de preconsolidación, teniendo como límite superior la capacidad de carga estructural del equipo empleado.

2.3.4.2.2 Determinación de la curva de consolidación

Se toma como lectura inicial del primer escalón la que corresponde a deformación 0.

Al mismo tiempo que retiramos la carga que corresponde a la presión de ajuste, se añaden de manera cuidadosa en la bancada las pesas que corresponden al primer escalón que hemos seleccionado.

Se llena de agua la célula de forma que la placa porosa superior quede cubierta.

Si se observara hinchamiento, se añaden pesas hasta que el deformímetro se mantenga en $\pm 0,01$ mm de la lectura inicial corregida.

Alcanzada la situación de equilibrio, se calcula la presión ejercida sobre la probeta, dividiendo la carga aplicada entre la sección de probeta. Ésta es la presión de hinchamiento.

Se continúa el ensayo aplicando el escalón inmediatamente superior a la presión de hinchamiento y se anota la lectura que registra el deformímetro pasadas 24 horas.

Para obtener la curva de consolidación, es conveniente adoptar la secuencia siguiente:

10, 15, 30, 45 segundos, 1, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 45 minutos y 1, 2, 3, 5, 7, y 24 horas.

Si se deseara continuar el proceso de consolidación, se sigue la siguiente secuencia: 2, 3, 5, 7, y 10 días.

Se representan las lecturas del medidor de deformaciones en función del logaritmo del tiempo (Método de Casagrande). Si representamos las lecturas del medidor de deformación en función de la raíz del tiempo estaríamos haciendo el método de Taylor.

2.3.4.2.3 Descarga

Partimos de la presión de consolidación que corresponde al último escalón de carga. Vamos disminuyendo dicha presión retirando las pesas, eligiendo como mínimo dos escalones distribuidos adecuadamente. Cada escalón se mantiene 24 horas.

Si el suelo es expansivo y hemos determinado la presión de hinchamiento, el proceso de descarga debe finalizar con la presión de hinchamiento.

Se anota la lectura del medidor de deformaciones pasadas 24 horas y se toma éste valor como final del escalón y como inicial del siguiente. Los demás escalones se realizan análogamente.

Finalizado éste proceso se quitan las pesas que queden, se retira la célula de la bancada, se quita el agua de su interior y se desmonta retirando el anillo con la probeta.

Se determina inmediatamente la masa del conjunto, anillo más probeta con una precisión de centésima de gramo, incluyendo cualquier pequeña porción de suelo que pudiera haber quedado adherida en las superficies de ambas placas porosas. Se seca la probeta en una estufa y se determina su masa.

2.3.5 Resultados obtenidos

Previamente a la obtención de las curvas de consolidación, es aconsejable determinar los diferentes parámetros del suelo. Así, la densidad seca toma la expresión:

$$\rho_d = \frac{m_d}{A * H_0}$$

Siendo m_d la masa seca de probeta en gramos, A la sección del anillo portaprobetas en cm^2 y H_0 la altura del anillo portaprobetas en cm.

El grado de saturación inicial S_r , se calcula:

$$S_r = \frac{G w_0}{e_0}$$

Donde G es la densidad relativa de las partícula sólidas, w_0 la humedad inicial en % de la probeta y e_0 el índice de poros inicial.

$$e_0 = \frac{G}{\rho_d} - 1$$

Para obtener el índice de poros que corresponde a cada escalón de carga en primer lugar calculamos H_s que es la altura del sólido:

$$H_s = \frac{H_0}{1 + e_0}$$

$$H = H_0 - (\Delta H - c)$$

ΔH es la reducción de la altura de la probeta. La deformación medida desde el inicio del ensayo hasta el final del escalón considerado, en cm.

c es el valor de la corrección en cm del escalón en cuestión.

El índice de poros correspondiente al final de cada escalón:

$$e = \frac{H - H_s}{H_s}$$

Con éstos datos finalmente podemos obtener la curva edométrica y las curvas de consolidación.

2.4 La norma BS 1377-6 1990. Ensayos de consolidación y permeabilidad en células hidráulicas con medida de la presión intersticial.

2.4.1 Ámbito y equipos

Esta parte de la norma BS 1377 [1990] especifica métodos de ensayo para la determinación de las características de consolidación y de permeabilidad de suelos saturados.

Hay dos tipos de equipos:

- Célula de consolidación cargada hidráulicamente y unidimensionalmente (Figura 2.7)
- Célula de consolidación triaxial.

Las capacidades más significativas de ambos tipos de equipos son:

1. Medidas de presión intersticial.
2. Control del drenaje
3. Aplicación de una contrapresión/presión de cola a la muestra.

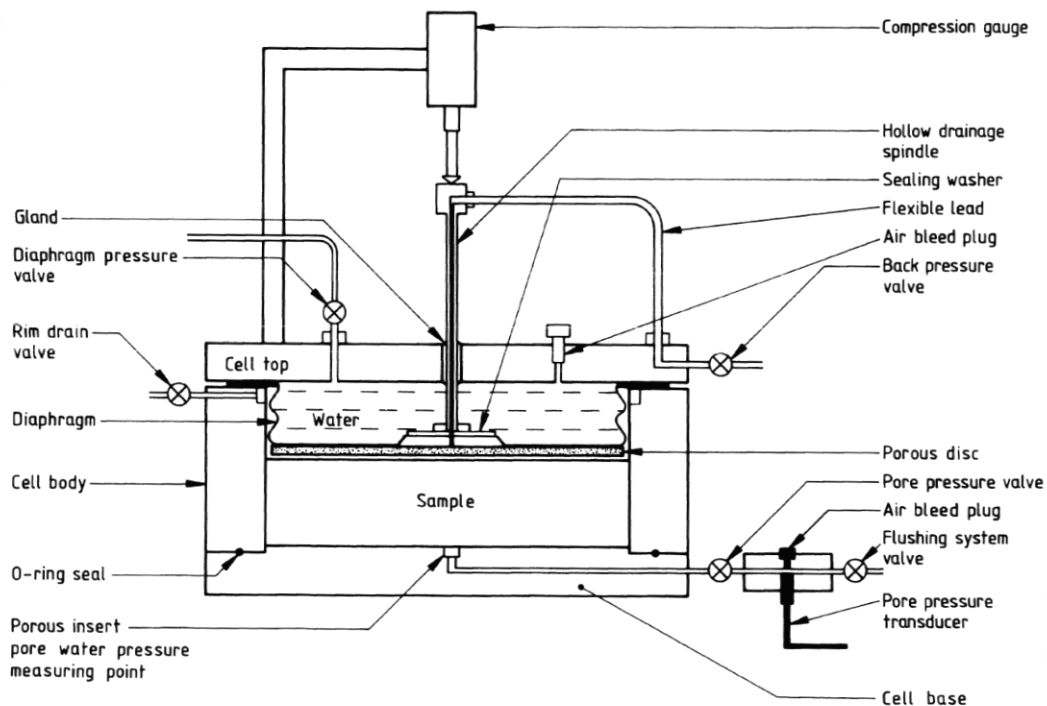


Figura 2.7 Disposición de la célula de consolidación hidráulica para drenar verticalmente. BS 1377-6 1990

2.4.2 Definiciones

1. Presión del diafragma de la célula hidráulica de consolidación: Es la presión aplicada al fluido que se encuentra en el interior del diafragma.
2. Esfuerzo total aplicado: Presión media realmente transmitida a la superficie de la muestra.
3. Carga de esfuerzo libre: carga uniformemente distribuida en la superficie de la muestra aplicada por el diafragma.
4. Carga de esfuerzo equivalente: Aplicación de presión en la superficie de muestra a través de un disco rígido, permaneciendo la superficie siempre plana.
5. Relación de presión intersticial: relación del cambio incremental en la presión intersticial al incremento aplicado de la tensión vertical cuando el drenaje no está permitido.

6. Presión de la célula: Presión del fluido de la célula que aplica esfuerzo isotrópico a la muestra en la célula triaxial.
7. Contrapresión: Presión que se aplica directamente a los poros del fluido en los vacíos de la muestra.
8. Presión celular efectiva: Diferencia entre la presión de la célula y la presión intersticial.
9. Presión de consolidación efectiva: Es la diferencia entre la presión de la célula y la contrapresión contra la cual drena el fluido de poro durante la consolidación.
10. Coefficientes A y B de presión intersticial:

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

Donde:

- A y B: son los coeficientes de presión intersticial.
- Δu : es la variación de la presión intersticial.
- $\Delta\sigma_1$: es el cambio en el esfuerzo total principal mayor.
- $\Delta\sigma_3$: es el cambio en el esfuerzo total principal menor.
- $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$: Variación en el esfuerzo desviador.

2.4.3 Determinación de las propiedades de la consolidación con la ayuda de una célula hidráulica

Los procedimientos que se describen en la norma abarcan la determinación de las magnitudes y de los rangos de consolidación de muestras de suelos de una relativa baja permeabilidad usando instrumentos que aplican cargas de manera hidráulica, donde se puede permitir el drenaje tanto en dirección vertical como en horizontal, de forma que se puedan investigar.

La muestra tiene forma de cilindro, confinado lateralmente y sometido a una presión axial vertical e hidráulica.

2.4.4 Tipos de ensayos

En éste tipo de célula de consolidación, la presión debe ser aplicada en la superficie de la muestra a través del diafragma.

Las diferentes configuraciones aparecen en la Figura 2.8y pueden ser:

- Drenaje vertical hacia la superficie de arriba, midiendo la presión en el centro de la base.
- Drenaje vertical hacia ambas superficies (inferior y superior) de la célula.
- Drenaje radial hacia el perímetro, midiendo la presión intersticial en el centro de la base.
- Drenaje radial hacia un dren central midiendo la presión intersticial en uno o más puntos distanciados del centro.

Cada ensayo requiere su propio ajuste de curva, sus propios coeficientes y va a depender de donde estemos midiendo las presiones intersticiales.

2.4.4.1 Condiciones de ensayo

Deben de especificarse antes de comenzar el ensayo:

- dimensiones de la muestra.
- Condiciones de drenaje.
- Condiciones de carga.
- Localización de los puntos de medida de la presión intersticial.
- Secuencia de incrementos y decrementos de presión efectiva.
- Criterios para determinar cada consolidación primaria e hinchamiento
- Características requeridas de la consolidación secundaria.

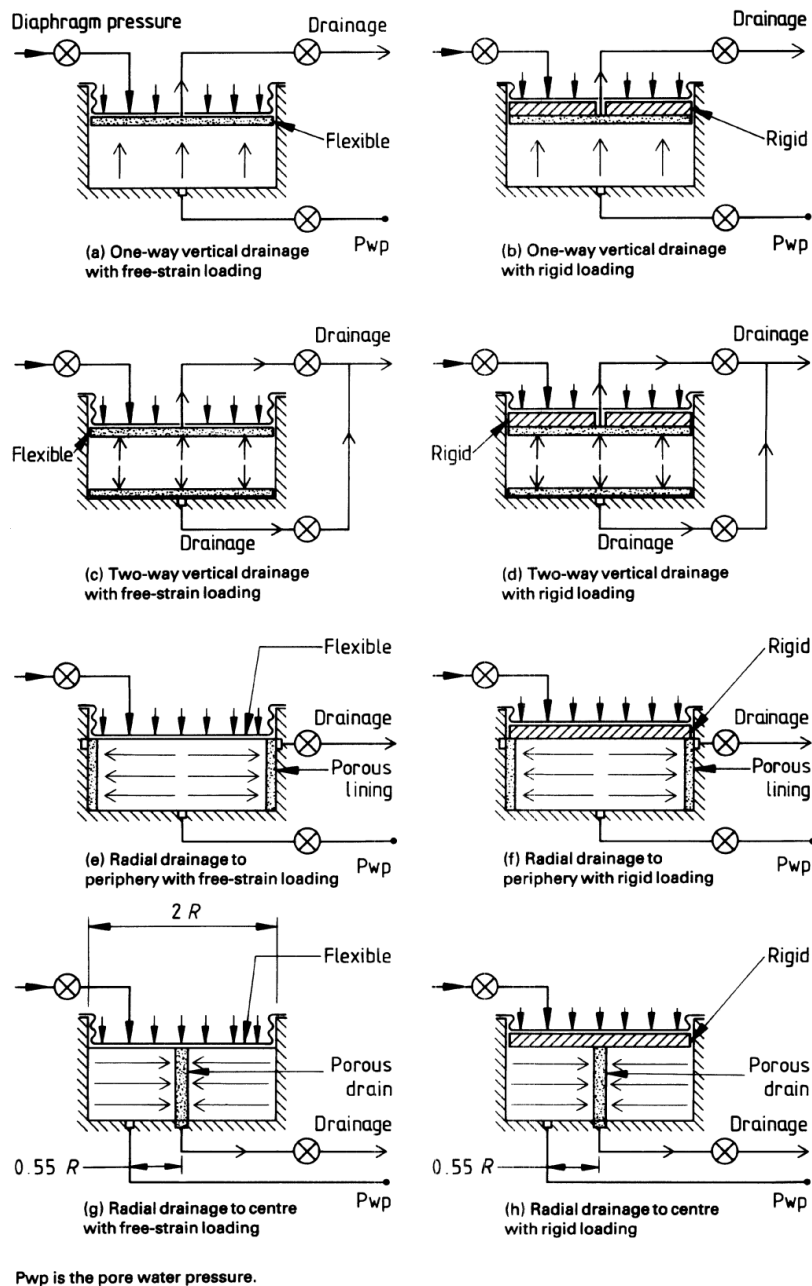


Figura 2.8 Diferentes configuraciones y ensayos de la célula de consolidación hidráulica. BS 1377-6 1990

2.4.5 Célula de consolidación hidráulica y accesorios

Todos los componentes metálicos que forman el cuerpo de la célula deben de ser tanto impermeables como resistentes a la corrosión. El cuerpo de la célula, su base y su cubierta deben de estar fabricados del mismo material para minimizar los posibles efectos de corrosión electrolítica.

La célula debe de ser capaz de soportar presiones internas mantenidas de agua de hasta 1000 kPa sin fugas ni distorsiones.

2.4.5.1 Componentes de la célula de consolidación

- **Cuerpo de la célula:** La cara interior debe de quedar sin hendiduras y libre.
- **Cubierta (tapa) superior:** equipada con un tapón de purga de aire y un casquillo para una varilla hueca que está unido al diafragma de goma de butilo. Permite que el drenaje tenga lugar desde la parte superior de nuestra muestra de estudio. Se pueden medir desplazamientos verticales desde esta cara.
- **El diafragma:** ha sido seleccionado de un rango de diafragmas de diferentes rigideces para que sea el apropiado para el tipo de suelo y el tipo de prueba.
- **Base de la célula:** Incorpora un rebaje central para un inserto poroso conectado a una válvula que permite medir la presión intersticial en diferentes puntos.
- **Puertos de conexión incorporados en la cubierta y en la base de la célula:** Cada puerto debe estar equipado con una válvula o con un tapón obturador si no es requerido para el ensayo pertinente. Los puestos deben de conectarse de la siguiente manera:
 1. Desde un punto de medida de presión intersticial situado en la base de la célula al dispositivo registrador de la presión intersticial.
 2. Desde el dispositivo registrador de la presión intersticial al sistema de descarga.
 3. Desde la cámara de presurización del diafragma hasta su sistema de presión.
 4. Desde la parte superior de la muestra a través del drenaje deriva al sistema de contrapresión.
 5. Desde el drenaje perimetral a la parte posterior del sistema de presión.
- **Discos porosos:** Para el drenaje y para medir la presión intersticial de los puntos de medida. Su permeabilidad debe de ser sustancialmente más grande que la de nuestro suelo y debe de ser capaz de soportar la máxima presión vertical a la que se puede ver sometido. Los discos deben de comprobarse antes de utilizarse para asegurarse de que no presentan partículas obstruidas.

Deben de ser hervidos 10 minutos en agua destilada antes de ser usados y deben mantenerse en agua desaireada hasta el momento de ser utilizados.

- **Válvulas ON-OFF:** deben de ser capaces de soportar la máxima presión de trabajo sin que se produzca ninguna fuga.
- **Disco poro flexible:** Actúa como una capa de drenaje a través del cual el agua de la muestra puede drenar hacia el hueco de la línea de contrapresión. El diámetro del disco debe de ser de al menos un milímetro menor que el diámetro interno de la célula. Debe de ser lo suficientemente flexible como para acomodar un asiento no uniforme de la superficie de la muestra.
- **Placa de carga circular rígida metálica:** Con mango de elevación desmontable para proporcionar la misma tensión cargando cuando sea necesario. Se debe proporcionar un enchufe que llene el orificio central cuando sea necesario.
- **Drenaje radial:** Formado por un material poroso de aproximadamente 1,5 mm de espesor que permita ensayos en los que el drenaje sea radial. La cara interior debe de ser lo más suave posible.
- **Disco de drenaje:** Debe ser de material poroso de 3 mm de espesor. Se puede usar como capa de drenaje cuando el drenaje vertical se produzca en ambos sentidos.

2.4.5.2 *Equipo auxiliar para preparación y operación de la célula*

- **Dos sistemas de presión independientes:** Que sean capaces de aplicar y mantener la presión deseada en la célula y en la línea de drenaje de la muestra. Deben de ser capaces de mantener la presión constante dentro de un $\pm 0.5\%$.
- **Manómetros calibrados:** para mediciones independientes de la presión del diafragma y contrapresión.
- **Tubos** adecuados para conectar los componentes de cada sistema de presión a la célula.
- **Materiales:**
 - a) grasa de silicona o vaselina.
 - b) láminas de plástico poroso de entre 1,5 y 3,5 mm de espesor.
 - c) Disco de caucho impermeable para cubrir el disco de metal debajo del centro del diafragma.
 - d) suministro de agua desaireada.
 - e) Sistema presurizado para distribución del agua desaireada.

2.4.6 Descripción de ensayos

2.4.6.1 Consolidación con drenaje radial hacia afuera

Hay que colocar el revestimiento de material poroso contra las paredes de la célula para que actúe como dren perimetral. Lógicamente, hay que colocarlo antes de disponer la muestra de suelo de estudio.

Después, se debe colocar un disco de látex a modo de membrana impermeable en la superficie de la muestra sin que se queda aire atrapado. Ésta membrana debería ser flexible en caso de que el ensayo sea de tensión libre.

Para un ensayo de igual tensión, hay que situar una placa metálica en la parte superior de la membrana sin que se quede aire atrapado y conectar el agujero central.

Conectar el sistema de contrapresión a la válvula de drenaje (rimdrainvalve), como se puede ver en la Figura 2.9, a través de la cual el drenaje tiene lugar.

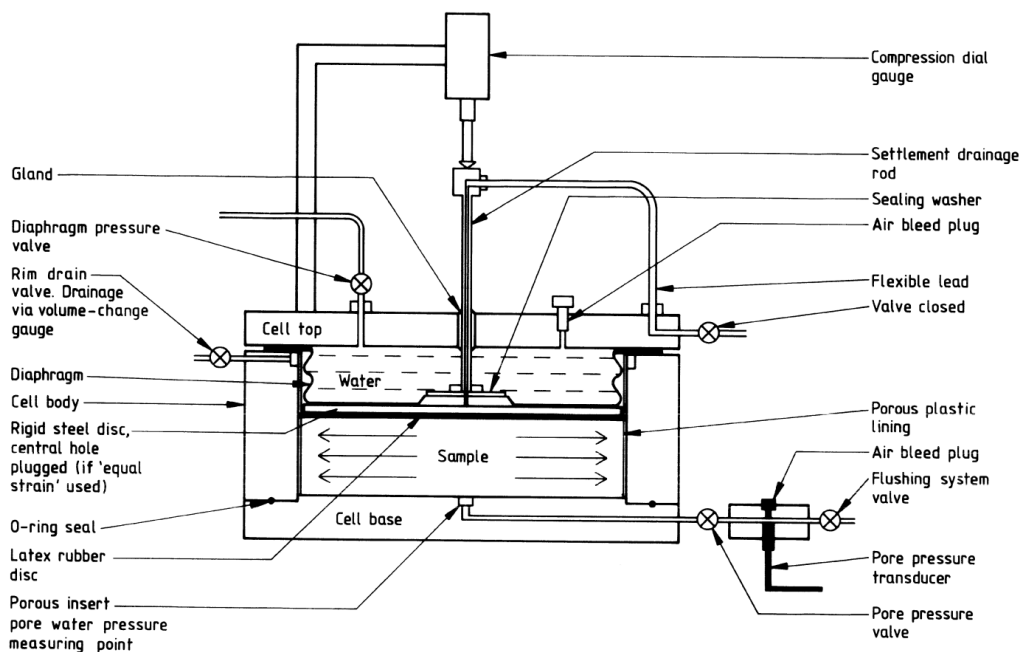


Figura 2.9 Consolidación con drenaje radial hacia fuera. BS 1377-61990

La válvula de contrapresión no se utiliza y además permanece cerrada, con la conexión entre ella y el extremo del vástago hueco lleno de agua desaireada.

La presión intersticial se mide en el centro de la base, como se puede ver en la Figura 2.9.

Si corresponde, se debe cubrir la muestra y el disco poroso con agua desaireada.

2.4.6.2 Consolidación con drenaje radial hacia el interior

La presión intersticial se mide en un punto alejado una distancia $0.55 \cdot R$ del dentro de la muestra, donde R es el radio de la muestra. El punto central es el que es usado para el drenaje radial. La válvula de presión intersticial está conectada al sistema de contrapresión.

Ni la válvula de presión intersticial ni la válvula de drenaje superior van a ser utilizadas en éste ensayo.

Inmediatamente después de recortar la superficie de la muestra, hay que crear un agujero vertical en su centro, utilizando un torno o una herramienta adecuada. Éste agujero deber de ser lo más cercano al 5% del diámetro de la muestra, Porque el análisis teórico para el cálculo del coeficiente de consolidación, c_{ri} , se basa en una relación de diámetros de 1:2.

Después se debe enjuagar el orificio con agua desaireada hacia arriba desde el puerto central (inserto poroso central) de la base para garantizar que no está obstruido y no hay material manchado en el inserto poroso. El orificio debe quedar dos terceras partes lleno con agua limpia y sin aire.

A través de un tubo, se coloca la arena saturada, evitando sacudidas y vibraciones en la célula después de colocarla.

Cuando el agujero esté lleno, hay que comprobar que el agua es capaz de drenar libremente a través de la arena y hacia afuera a través de la válvula de presión poro, manteniendo eso sí, la arena completamente saturada.

Como punto final de la preparación de la muestra, recortar la superficie de ésta si procede y cubrirla con agua desaireada si corresponde.

Para realizar un ensayo de tensión libre, hay que colocar un disco flexible e impermeable en la parte superior, teniendo la precaución de evitar que quede aire atrapado.

Para una prueba tensión igual, colocar la placa de acero circular en la parte superior teniendo la precaución de que no queda aire atrapado ni taponando el agujero central.

2.4.6.3 Procedimiento para el ensayo de consolidación con drenaje radial hacia el exterior

En éste ensayo, el drenaje tiene lugar en la periferia de la curva de la muestra, es decir, el camino del drenaje es horizontal, radial, hacia el perímetro exterior. La presión intersticial se mide en el centro de la cara inferior y se supone que en cualquier momento la distribución de la presión intersticial a lo largo de cualquier línea vertical se mantiene uniforme.

La muestra se prepara con una capa de material plástico poroso ajustado a la pared de la célula. Las conexiones a la célula son las que se muestran en la figura 2.10.

La línea de drenaje está controlada por la válvula de drenaje. La conexión entre la superficie de la muestra y la válvula del sistema de contrapresión estará

completamente llena de agua desaireada y la válvula permanecerá cerrada durante el ensayo.

Posteriormente se procederá a la saturación de la muestra.

Carga no drenada: Aplicar incrementos de carga y observar el crecimiento de la presión de poro. El exceso de agua puede disiparse abriendo momentáneamente la válvula de drenaje y medir el volumen de agua que no va a ser tenido en cuenta en las mediciones de drenaje.

Consolidación (etapa drenada): Se inicia la consolidación al abrir la válvula de drenaje superior (rim drain valve). Cabe destacar que, en suelos laminados de menos permeabilidad, las capas pueden seguir consolidando después que la presión intersticial observada indique que se ha disipado al 100%. La duración de la consolidación puede ser monitoreada observando sólo el asentamiento y tomando las lecturas de cambio de volumen.

Si utilizamos la válvula de drenaje superior, el decremento de cargas debe de ser progresivo.

En la etapa de carga, hay que graficar para cada etapa:

- Presión intersticial vs tiempo para cada fase de carga no drenada.
- Asiento y cambio de volumen vs logaritmo del tiempo o vs raíz cuadrada del tiempo o ambos durante el proceso de consolidación.
- Presión intersticial disipada vs logaritmo del tiempo.

En la etapa de descarga:

- Presión intersticial vs logaritmo del tiempo para cada fase de carga no drenada.
- Cambio de volumen vs logaritmo del tiempo o vs raíz cuadrada del tiempo
- Porcentaje de la presión intersticial compensada vs logaritmo del tiempo.

2.4.7 Coeficiente de consolidación

Realizar los cálculos con los datos iniciales de la muestra, disipación de la presión intersticial, relaciones de vacíos y coeficiente de compresibilidad del volumen.

El coeficiente de consolidación c_{ro} puede obtenerse:

- Método a) Disipación de la presión intersticial.

Cálculo de c_{ro} ($m^2/año$) a partir de las siguientes ecuaciones, según corresponda:

a) carga de "tensión libre":

$$c_{ro} = \frac{0.026 * D^2}{t_{50}}$$

b) carga de "igual tensión":

$$c_{ro} = \frac{0.023 * D^2}{t_{50}}$$

donde:

t_{50} : tiempo correspondiente a la disipación del 50% de la presión intersticial.

D: Diámetro de la muestra.

- Método b) Ajuste de la curva de tiempo de registro.

Calcular c_{ro} a partir de una de las siguientes ecuaciones:

a) carga de "tensión libre":

$$c_{ro} = \frac{0.0083 * D^2}{t_{50}}$$

b) carga de "igual tensión":

$$c_{ro} = \frac{0.011 * D^2}{t_{50}}$$

- Método c) Carga de "tensión libre".

a)

$$c_{ro} = \frac{0.0083 * D^2}{t_{50}}$$

b)

$$c_{ro} = \frac{0.0044 * D^2}{t_{50}}$$

- Método d) Carga de "igual tensión".

a)

$$c_{ro} = \frac{0.0011 * D^2}{t_{50}}$$

b)

$$c_{ro} = \frac{0.038 * D^2}{t_{50}}$$

2.4.8 Medida y cálculo de la permeabilidad vertical

Para obtener el valor de la permeabilidad vertical, hay que realizar un ensayo con flujo vertical hacia abajo con la muestra consolidada.

Con la válvula de medida de presión intersticial cerrada y la válvula de entrada de la presión de cola cerrada, hay que ajustar la presión en la línea de drenaje (p_2) en kPa

para que equipararla con la contrapresión (p_1) en kPa. La válvula que permite el drenaje se encuentra cerrada.

Aumentar la presión p_1 a un valor tal que la diferencia entre p_1 y p_2 sea igual a la diferencia de presión deseada.

La diferencia entre la presión aplicada por el diafragma p_d (kPa) y p_1 normalmente no debe de ser menor que $p_1 - p_2$.

Se registran las lecturas del cambio de volumen en las líneas de entrada y salida cuando se alcanzan valores estables.

Abrir la válvula de contrapresión y comenzar a registrar. Se deben registrar las lecturas de ambos cambios de volumen en intervalos de tiempo adecuados.

La tensión efectiva media vertical σ_v es igual a:

$$\sigma_v = p_d - \frac{p_1 + p_2}{2}$$

Dibujar el gráfico de volumen acumulado de agua que fluye a través de la muestra Q (en mL) durante el cambio de volumen VS tiempo en abscisas.

La prueba debe continuar hasta que la relación sea lineal y las dos líneas sean paralelas.

Registrar la temperatura en las proximidades de la célula de consolidación a $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

El ensayo termina cerrando la válvula de medida de presión intersticial y la válvula de presión de cola.

Para realizar los cálculos, en primer lugar, calcular el área circular de la sección transversal de la muestra de suelo (en mm^2).

Determinar la pendiente media de la parte lineal de los gráficos representados que es igual a la tasa media de flujo q (mL/min) durante las condiciones de flujo constante.

Finalmente calcular k_v utilizando la siguiente ecuación:

$$k_v = \frac{1,63qL}{A[(p_1 - p_2) - p_c]} * 10^{-4}$$

donde:

q : es el flujo medio de agua que sale de la muestra en mL/min.

L : Es la altura de la muestra en mm.

$(p_1 - p_2)$: es la diferencia entre la presión aplicada y la presión de salida en kPa.

p_c : es la presión perdida en sistema en kPa debido al flujo de agua.

R_t : es el factor corrector de temperatura para la viscosidad del agua.

A : es la sección de la muestra en mm^2 .

2.4.9 Medida y cálculo de la permeabilidad horizontal.

Para obtener la permeabilidad horizontal hay que llevar a cabo un ensayo de consolidación radial hacia el exterior en la muestra consolidada. Si el flujo es radial hacia el interior, el procedimiento es similar pero con la entrada y conexiones de salida intercambiadas. La válvula de presión de cola permanece cerrada.

Con la válvula de medida de presión intersticial y la válvula de drenaje cerradas, ajustar la presión de salida por el drenaje conectada la válvula de presión intersticial (p_2) para equiparla con la presión de cola (p_1).

Abrir la válvula de medida de presión intersticial y aumentar p_1 a un valor tal que la diferencia entre p_1 y p_2 sea igual a la diferencia de presión deseada para el ensayo de permeabilidad.

La diferencia entre la presión que ejerce el diafragma p_d y p_1 debe ser normalmente mayor que la diferencia entre p_1 y p_2 .

Se deben registrar las lecturas de cambio de volumen en las líneas de entrada y salida cuando se alcanzan valores estables.

Abrir el drenaje y comenzar a registrar datos. Registrar las lecturas de ambos cambios de volumen en intervalos de tiempo regulares y adecuados.

La tensión efectiva media vertical σ_v es igual a:

$$\sigma_v = p_d - \frac{p_1 + p_2}{2}$$

Dibujar el gráfico de volumen acumulado de agua que fluye a través de la muestra Q (en mL) durante el cambio de volumen VS tiempo en abscisas

La prueba debe continuar hasta que la relación sea lineal y las dos líneas sean paralelas.

Registrar la temperatura en las proximidades de la célula de consolidación a $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

El ensayo termina cerrando la válvula de medida de presión intersticial y la válvula de drenaje.

Finalmente calcular k_H utilizando la siguiente ecuación:

$$k_H = \frac{0,26q}{L[(p_1 - p_2) - p_c]} \log_e \left(\frac{D}{d} \right) R_t * 10^{-4}$$

donde:

q: es el flujo medio de agua que sale de la muestra en mL/min.

L: Es la altura de la muestra en mm.

$(p_1 - p_2)$ es la diferencia entre la presión aplicada y la presión de salida en kPa.

p_c : es la presión perdida en sistema en kPa debido al flujo de agua.

R_t : es el factor corrector de temperatura para la viscosidad del agua.

D: es el diámetro de la muestra.

d: diámetro del dren central.

2.4.10 Informe del ensayo

Además de afirmar que se llevó a cabo según el apartado 3.7 de BS 1377-6 1990, debe incluir la siguiente información:

1. Declaración de que fue usada una célula de consolidación hidráulica y su diámetro nominal.
2. Observaciones sobre las condiciones y la calidad de la muestra.
3. Observaciones sobre cualquier dificultad experimentada durante la preparación de la muestra a ensayar.
4. Dimensiones iniciales de la muestra.
5. Contenido de humedad inicial, densidad aparente y densidad seca.
6. Densidad de la partícula e indicar si ha sido supuesta o medida.
7. Relación de vacíos iniciales y grado de saturación (si es requerido).
8. El tipo de carga ("tensión libre" o "igual") y las condiciones de drenaje, además del espesor del dren perimetral.
9. Declaración de que el drenaje y de las medidas de la presión intersticial (además de la ubicación de los puntos).
10. Presión de hinchamiento si corresponde.
11. Método utilizado para saturar la muestra, incrementos de presión aplicados.
12. Volumen de agua que se toma en la muestra durante la saturación
13. Presión del diafragma, presión intersticial y valor de la relación de presión intersticial al final de la etapa de saturación.
14. Datos tabulados para cada etapa de carga:
 - * Contrapresión utilizada.
 - * Presión del diafragma.
 - * Esfuerzo efectivo a la terminación de la etapa de consolidación.
 - * Aumento de asentamiento y presión intersticial debido a carga no drenada.
 - * Proporción de vacíos y porcentaje de disipación de la presión intersticial al final de la consolidación.
 - * valores del coeficiente m_v y c_{ro} .
15. Método utilizado para derivar c_{ro} .
16. Curvas trazadas para cada etapa de consolidación. Disipación de presión intersticial vs el tiempo y cambio de volumen contra el registro de tiempo.
17. Curva de la relación de vacíos.
18. Densidad final y contenido de humedad total de la muestra.
19. Contenido de humedad de zonas específicas.
20. Fotografías en color que ilustran las características del suelo.

Tensiones totales y efectivas in situ de la muestra en la profundidad que se tomó, si se conoce.

3 Aparatos de laboratorio para ejecución de ensayos y preparación de muestras

3.1 La célula de Rowe-Barden

En el siguiente apartado se describirán cada una de las partes que componen nuestra célula Rowe

3.1.1 Partes de la Célula Rowe del laboratorio de Geotecnia de la UPCT:

3.1.1.1 Base

La primera parte a destacar de nuestra célula de consolidación hidráulica es su base (Figuras 3.1 y 3.2). Está fabricada en acero inoxidable y es donde están situados los 4 puntos de medida de presión intersticial.

El punto 1 es el punto central. Se encuentra justo en el centro de la superficie donde va a ir colocada la muestra de suelo de estudio y a 76 mm de donde va a ir colocado el dren perimetral. El punto 3 es el que se encuentra más cerca del punto central, a una distancia de dren perimetral de 51 mm.

El punto más cercano a nuestro dren radial es el punto 4, situado a 5 mm. El punto intermedio entre éstos dos últimos está situado a 28 mm y es el punto 2.

Cada punto está conectado a una válvula. En cada una conectaremos un transductor, que nos indicará la presión que tiene el agua de la muestra en cada momento.

En cada orificio de cada punto, se encuentra una placa porosa que permite el paso únicamente del agua, permitiendo que las partículas del suelo permanezcan sobre la superficie de apoyo sin flujo de material.

Alrededor de la superficie sobre la que situaremos la muestra, hay colocado una goma que garantiza la impermeabilidad al colocar después el cuerpo de la célula de consolidación hidráulica.

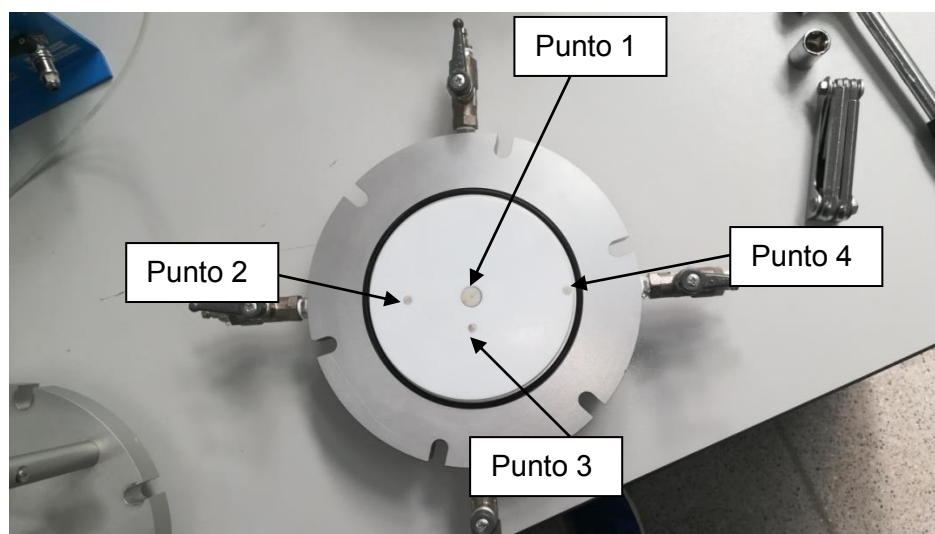


Figura 3.1 Base de la célula Rowe del laboratorio de Geotecnia de la UPCT. Vista cenital



Figura 3.2 Base de la célula Rowe del laboratorio de Geotecnia de la UPCT. Vista lateral

3.1.1.2 Cuerpo de la célula

El cuerpo, es la parte central de nuestra célula de consolidación (Figura 3.3). El material, como dice la norma BS 1377 parte 6, es el mismo que el de la base, y por supuesto que el de su cubierta o tapa. Se conecta a la base a través de seis tornillos con dos arandelas y una tuerca.

Dentro del cuerpo, se coloca la muestra a ensayar, tras realizar sobre ella las comprobaciones pertinentes. En el caso de que queramos realizar un ensayo de consolidación radial hacia el exterior (hacia la periferia), debemos colocar en primer lugar el dren perimetral, que cubre completamente la pared interior del cuerpo y va encajado 5 mm en la base. Sobre el dren marcamos la altura a la que vamos a enrasar la muestra, para, posteriormente, colocar sobre ella los dos discos de acero inoxidable que van a cubrir completamente la superficie superior de la muestra y van a garantizar que el reparto de presiones sea uniforme.

Tiene seis hendiduras en su parte superior y otras seis en su parte inferior, para conectarlo con la base y posteriormente con la cubierta.

Su altura interior es de 83 mm, mientras que su diámetro interior es de 152 mm.

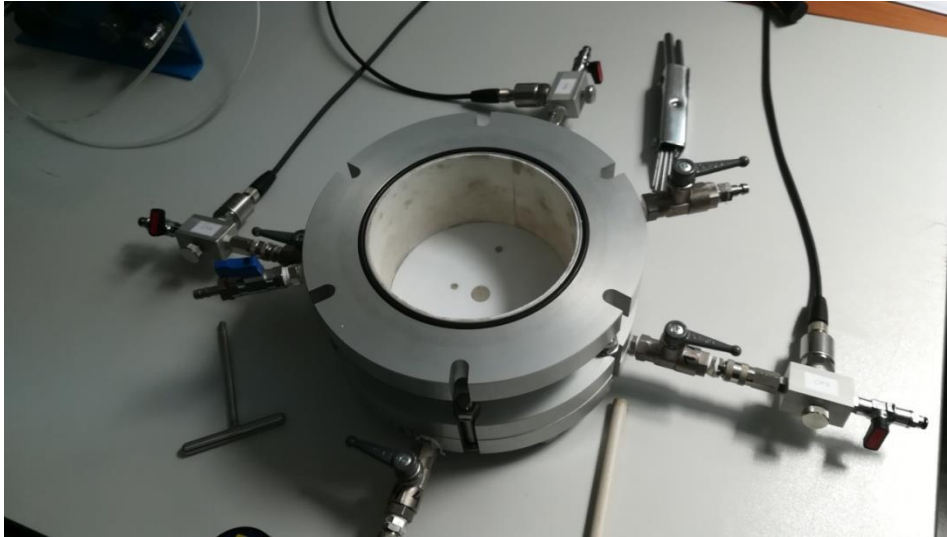


Figura 3.3 Cuerpo central de la célula Rowe del laboratorio de Geotecnia de la UPCT

3.1.1.3 Cubierta de la Célula Rowe

La cubierta de la célula Rowe es tal vez la parte más delicada de nuestro equipo, puesto que lleva incorporado en ella el diafragma que va a ejercer la presión deseada en la muestra de suelo.

Como se puede ver la Figura 3.4, tiene una válvula que está conectada con la parte central, y ésta a su vez, con un punto situado en la superficie superior de la muestra que sirve para introducir una determinada presión de cola. Éste punto no está conectado hidráulicamente con el diafragma. Hay una conexión que lo atraviesa y llega hasta la parte superior de la muestra, en el centro de la misma.

También tenemos una serie de cilindros de acero que sirven de apoyo para colocar el deformímetro, una purga de aire, y lo más importante, una válvula que conecta el equipo de presión con el diafragma.

El diafragma, que debe de estar completamente lleno de agua antes de conectar la cubierta con el cuerpo de la célula, es el encargado de transmitir la presión que nosotros marcamos en el equipo de presión a la muestra.

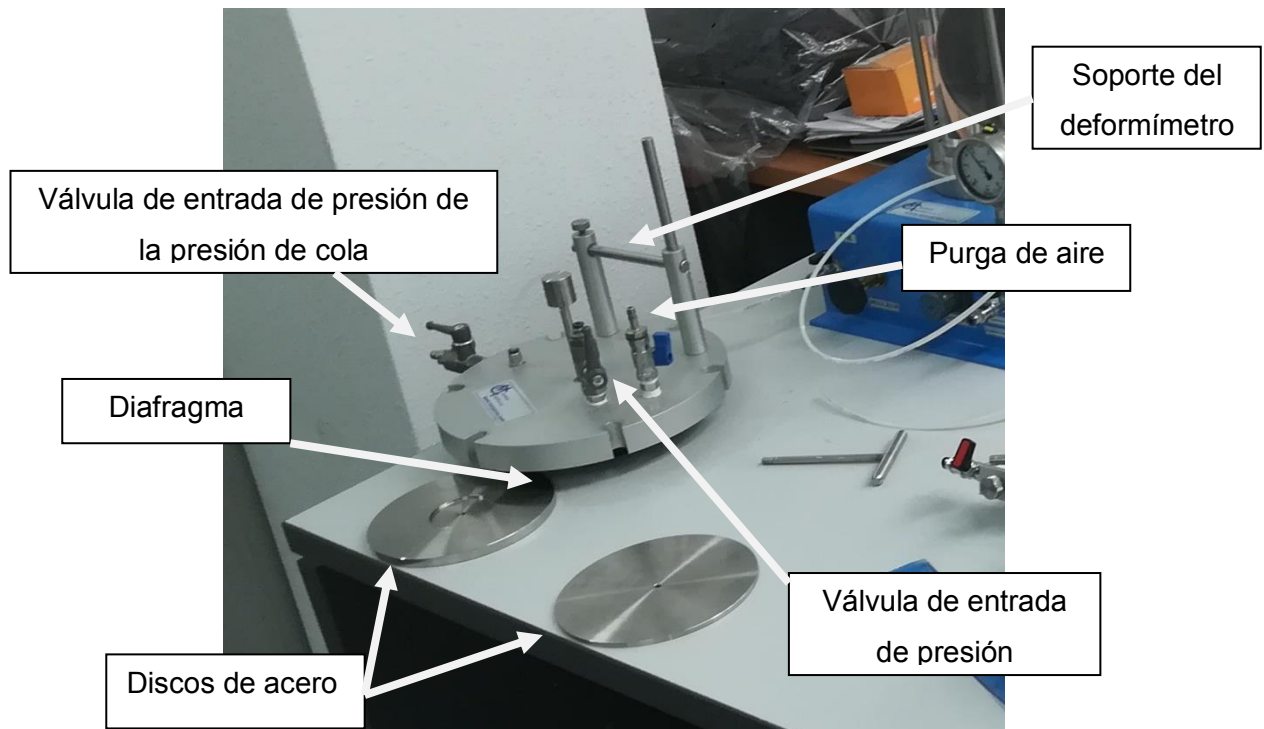


Figura 3.4 Cubierta y discos de acero

3.1.1.4 Compresor de aire

Para obtener la presión necesaria de funcionamiento de la célula de consolidación Rowe, utilizamos el compresor de pistón ABAC 50 Hp 2.

Especificaciones técnicas:

- Compresor de pistón.
- Potencia de su motor: 50 CV.
- Sección de su cable: 2,5 mm.
- Presión máxima: 8 bares.
- Peso: 36 kg.
- Arranque por presostato cuando su presión baja 2 bares.
- Salida de aire a presión de media pulgada.
- Caudal de aire aspirado: 222 litros/minuto.
- Lubricado con aceite.
- Capacidad de almacenamiento de aire: 50 litros.
- Equipado con dos ruedas.
- Ruido generado: 94 dB.

Como se puede ver en la Figura 3.5, hay dos manómetros. En el primero, vemos la presión que existe en el interior del compresor y por lo tanto, la máxima que podemos introducir en nuestro equipo de presión hidráulico. En el segundo manómetro es donde nosotros regulamos la presión de salida del compresor. La válvula de salida va conectada con el globo del equipo de presión que transmitirá la presión deseada al agua contenida en el interior del cilindro.



Figura 3.5 Compresor de aire utilizado

La máxima presión que es capaz de generar es 8 bares. En nuestros ensayos, vamos a fijar una presión de 8 bares en el interior del compresor y una presión de salida de 8 bares, que se verán reducidos a la entrada del equipo de presión hidráulico.

3.1.1.5 Equipo de presión hidráulico

Nuestro equipo de presión hidráulico está formado por un cilindro completamente lleno de agua (antes de realizar los ensayos pertinentes, nos aseguraremos de que todo el aire salga a través de la purga de aire.). En el interior del cilindro tenemos el elemento esencial: el globo (Figura 3.6).

Al globo le llega el aire procedente del compresor a la presión deseada. No le llega a la presión de salida del compresor, sino a la que nosotros fijamos a través de la válvula de entrada de aire al globo. Podemos controlar la presión que tiene el globo y por tanto la que transmite al agua, con el manómetro situado en la placa superior del cilindro. Esa presión será la presión que transmitirá el agua al diafragma de la célula de consolidación y por tanto la presión aplicada a la muestra de estudio.

Como se puede apreciar (Figura 3.6), tenemos una salida de agua procedente del cilindro, cuya presión de salida podemos regular (lógicamente sólo puede ser menor o igual que la del interior del cilindro). Ésta contrapresión es la presión de cola que podemos utilizar para realizar los pertinentes ensayos de consolidación, ya sea radial o vertical con una presión de cola.



Figura 3.6 Equipo hidráulico de presión

3.1.1.6 Equipo de medición y registro de datos

Podemos registrar tanto las presiones intersticiales (en tres puntos de la base, pues actualmente hay disponibles tres transductores de presión intersticial – posteriormente hablaremos sobre este elemento – en el laboratorio de Geotecnia) como los asentamientos de la muestra en los intervalos de tiempo que deseemos, con una duración determinada, en el módulo Cyber-Plus Evolution (Figura 3.7).

Es un equipo táctil que puede registrar a la vez hasta 14 ensayos diferentes y los datos generados los guarda en un pen drive o tarjeta SD. A la vez, podemos visualizar en tiempo real tanto las presiones como la deformación vertical.



Figura 3.7 Equipo de medición y toma de datos "Cyber-Plus Evolution"

3.2 Módulo de adquisición de datos Cyber-Plus Evolution.

3.2.1 Descripción

El módulo de adquisición de datos Cyber-Plus Evolution es un equipo de registro tanto de presiones, como de desplazamientos y de fuerzas. Tiene 8 canales que hay que calibrarlos debidamente con el sensor de registro de datos. Es muy importante saber que no se puede cambiar una vez calibrado y establecido.

El módulo traduce la señal de entrada, en forma de valor de resistencia interna del sensor, en un valor real de desplazamiento, presión o fuerza.

La presión que ejerce el agua sobre el transductor de presión que está conectado en un determinado punto de medida de la máquina es registrada como una resistencia en el sensor que lleva incorporado y esa resistencia es la que llega a nuestro módulo Cyber-Plus.

3.2.2 Características técnicas y funcionamiento

El módulo tiene tanto entrada para tarjeta SD, como entrada USB y la pantalla es táctil y en color de 320x240 pixel.

El sistema operativo que lleva incorporado es Windows Embedded CE 6.0 R2.

Aunque la pantalla sea táctil, todas las funciones se pueden realizar también a través del teclado que tiene a la derecha de la pantalla.

En la parte inferior de la pantalla aparece la siguiente barra (Figura 3.8):

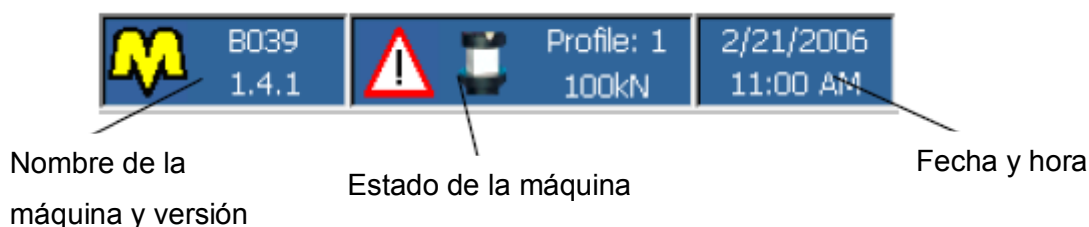


Figura 3.8 Barra de la parte inferior de la pantalla

La parte central de la barra de inferior (Figura 3.9), que nos indica el estado de la máquina, nos muestra la siguiente información:

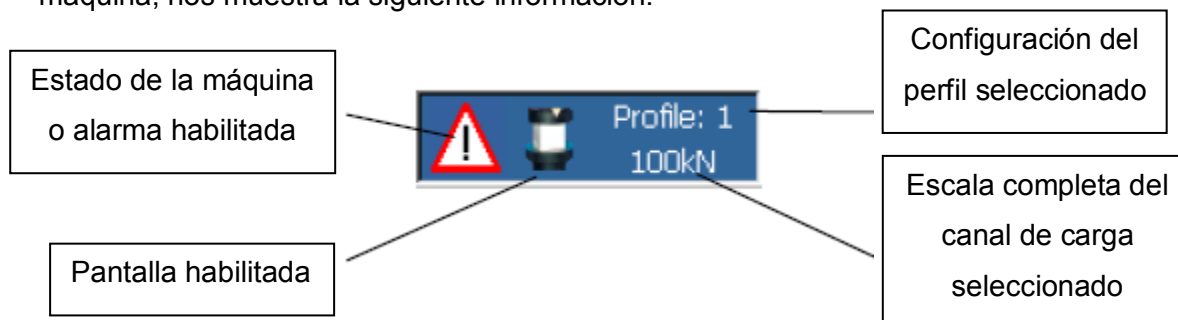


Figura 3.9 Parte central de la barra inferior del equipo de medición y toma de datos.

El estado de la máquina (Figuras 3.10 y 3.11) puede ser, dependiendo de la operación que se esté realizando:

	Alarma
	La máquina no está configurada
	Inicialización
	Inicialización terminada. Preparado
	Configuración automática de medidores de tensión
	Búsqueda del punto de contacto
	Esperando la activación del operador
	Activación retardada la operación automática
	Operación automática
	Activación del manual

Figura 3.10 Estados de la máquina







	Visualización de alarmas establecidas
	Posición del manual
	Selección del perfil de configuración
	Configuración de canal de entrada
	Configuración del canal de salida
	Calibración del canal de salida

Figura 3.11 Estados de la máquina

El teclado virtual numérico es mostrado en la Figura 3.12:

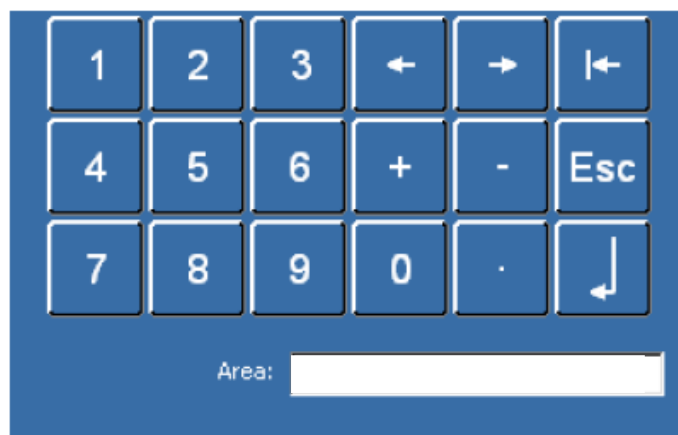


Figura 3.12 Teclado virtual numérico

Aunque también cuenta con un teclado virtual alfanumérico (Figura 3.13):



Figura 3.13 Teclado virtual alfanumérico

Nada más entrar en el módulo Cyber-Plus Evolution, nos aparece un menú principal en el que nos pide elegir entre realizar un ensayo nuevo/ registro de datos nuevo, o ver los resultados registrados en ensayos anteriores que ya han terminado.

También nos permite mientras estamos realizando un ensayo ver qué valores marcan los diferentes canales y visualizarlo en una gráfica en tiempo real.

Al empezar un ensayo nuevo, lo primero que tenemos que hacer es describirlo. Darle un nombre.

Seguidamente debemos elegir qué canales van a funcionar en cada ensayo. En nuestro caso siempre van a ser los canales CH3, CH6, CH7 y CH8.

Después debemos elegir los intervalos de tiempo en los que se van a registrar datos, las unidades, si ponemos o no a cero los marcadores y la duración total del ensayo registrado.

Se le puede conectar tanto el deformímetro utilizado en la máquina de corte directo como el de la célula Rowe y el del ensayo edométrico. También se puede medir la fuerza ejercida en el anillo dinamométrico del ensayo de corte directo.

En nuestro caso vamos a conectar tres puntos de medida de presión intersticial.

Los datos que se han registrado durante el ensayo, los vamos a grabar en un pen drive en formato .txt que posteriormente se pasará a Excel para analizar los resultados.

En la Figura 3.14, se pueden ver los diferentes escalones de presión aplicada a una muestra de ensayo.

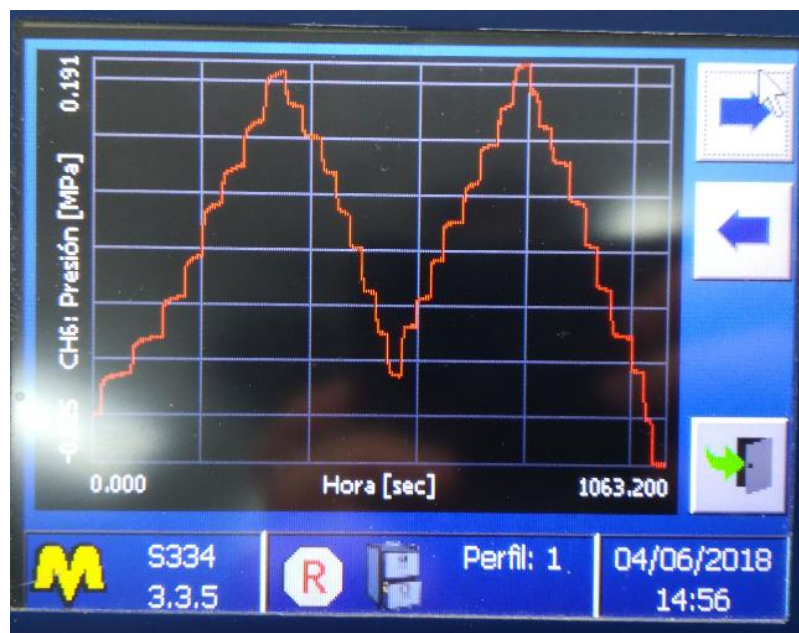


Figura 3.14 Escalones de presión aplicada a la muestra de ensayo

3.3 Sensores para registro de datos

Dentro de los sensores para registro de datos que tenemos conectados con el módulo Cyber-Plus Evolution de Matest, distribuido por Mecacisa en España, tenemos que diferenciar entre dos tipos de transductores:

En primer lugar, tenemos un transductor potenciométrico para medida de desplazamientos (0-10 mm $\pm 0.25\%$). Este sensor recibe una deformación por acción del vástago que lleva incorporado el deformímetro. El sensor lleva incorporado una resistencia interna que varía con el desplazamiento del vástago, de manera que, tras un proceso adecuado de calibración del módulo Cyber-Plus Evolution, éste es capaz de transformar el valor de resistencia en un valor real de desplazamiento.

En segundo lugar, tenemos un transductor de presión absoluta. En nuestro caso lo que mide es la presión intersticial, hasta una presión de 10 Bares (10Kg/cm² $\pm 0.25\%$).

El sensor lleva incorporado una resistencia interna, al igual que para el desplazamiento que varía según varía la presión. Finalmente el módulo Cyber-Plus

Evolution transforma ese valor de resistencia, en un valor real de presión que queda registrado.

En las Figuras 3.15 a 3.18 podemos observar los tres transductores utilizados para medir y registrar la presión intersticial (CH6, CH7 Y CH8) y el deformímetro de 10 mm que utilizamos para medir el asentamiento de la muestra (CH3):



Figura 3.15 Transductor de presión intersticial CH6



Figura 3.16 Transductor de presión intersticial CH7



Figura 3.17 Transductor de presión intersticial CH8

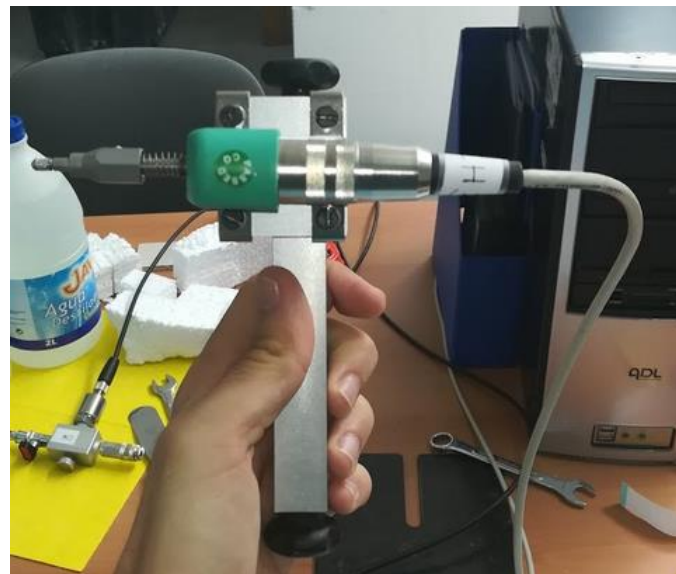


Figura 3.18 Deformímetro de 10 mm CH3

3.4 Material para preparación de muestras y ensayos

3.4.1 Diferentes utensilios y material de laboratorio utilizado

El uso de frascos lavadores (Figura 3.19) es indispensable, ya que sin ellos no sería posible realizar ningún ensayo. Los utilizamos, en primer lugar, para llevar al límite líquido el material arcilloso. También para llenar completamente y purgar de aire el cilindro donde se encuentra situado el globo, es decir, en el interior del equipo generador de presión.

También los utilizamos para lavar cualquier parte o pieza de nuestra célula hidráulica y especialmente para saturar tanto el interior de ella como el interior del diafragma.



Figura 3.19Frascos lavadores del laboratorio de Geotecnia de la UPCT

Las llaves Allen (Figuras 3.20 y 3.21) han sido muy útiles, porque sin ellas no hubiéramos podido colocar el deformímetro en la cubierta de nuestra célula de consolidación. Las llaves Allen son herramientas que nos permiten atornillar o desatornillar los tornillos que tienen cabeza hexagonal e interior.



Figura 3.20Llaves Allen del laboratorio de Geotecnia de la UPCT



Figura 3.21Llaves Allen del laboratorio de Geotecnia de la UPCT

También usamos una carraca (Figura 3.22), también llamada llave chicharra o matraca. Nos permite apretar de una forma muy cómoda y a la vez rápida los tornillos y las tuercas que conectan la parte central de nuestra célula de consolidación hidráulica con la base y con la cubierta.



Figura 3.22 Carraca, llave chicharra o matraca del laboratorio de Geotecnia de la UPCT

Para poder colocar la muestra en el interior de la célula, también para colocarla en el interior de los recipientes metálicos para posteriormente determinar si estaban al LL las arcillas, es necesario disponer de espátulas de diferentes tamaños y tipos. En nuestro caso particular, usamos tres tipos diferentes de espátulas. La más pequeña para enrasar y para colocar la muestra en los recipientes y las dos más grandes para colocar el material, ya sea arenoso, limoso o arcilloso en el interior de la célula.

El uso de una pequeña pala pueda ayudar si la muestra tiene un volumen superior al habitual de ensayo.

En la Figura 3.23 aparecen los recipientes metálicos utilizados como material de apoyo en el llenado/vaciado de la célula, como apoyo de la base de la célula y como recipientes para preparar muestras. También aparecen tanto las espátulas, como la pala y los anillos metálicos con borde cortante para determinar la humedad de la muestra.



Figura 3.23 Material necesario para la preparación de muestras

3.4.2 Determinación del límite líquido. Método del penetrómetro de cono

Para hacer ensayos con arcillas en nuestra célula de consolidación hidráulica, es necesario llevar al límite líquido nuestra muestra arcillosa. Para determinar el límite líquido, usamos el penetrómetro de cono que tenemos en el laboratorio de Geotecnia.

Para realizar éste ensayo, necesitamos el penetrómetro, 3 recipientes metálicos, espátulas y una chapa metálica.

La norma BS 1377-2 1990 describe el cono del penetrómetro como un cono de acero inoxidable o duraluminio de aproximadamente 35 mm de largo, con una superficie lisa y pulida y un ángulo de $30 \pm 1^\circ$ para garantizar que el ángulo sigue siendo lo suficientemente agudo a efectos del ensayo a realizar (Figuras 3.24 y 3.25).

Necesitamos que haya agua destilada en vasos de precipitados.

Para preparar la muestra, la colocamos en un recipiente de tamaño relativamente grande en comparación con la cantidad de arcilla que vamos a ensayar y amasamos la arcilla a la humedad del límite líquido de manera aproximada añadiéndole el agua que consideremos necesaria. La superficie del recipiente debe ser lo más lisa posible.

Lo ideal sería dejar la cantidad de muestra a ensayar durante al menos 2 horas en cámara húmeda.

Pasado éste tiempo, se amasa de nuevo, añadiendo agua para ensayar el suelo con 3 humedades diferentes.

Colocamos las muestras de suelo en los recipientes metálicos y se calibra el penetrómetro de cono (Figura 3.26) con la chapa metálica colocada sobre la muestra.

Procedemos a ensayar las tres muestras anotando el valor de la penetración.

La humedad y la penetración están directamente relacionadas entre sí, de manera que conforme aumenta la penetración de una muestra su humedad es mayor.

La humedad que representa el límite líquido corresponde a una penetración de 20 mm.

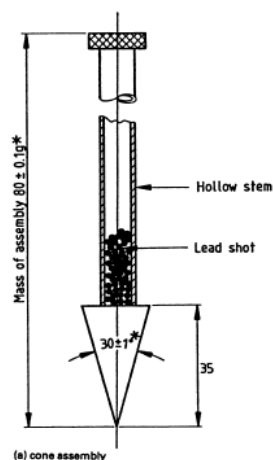


Figura 3.24 Montaje del penetrómetro de cono

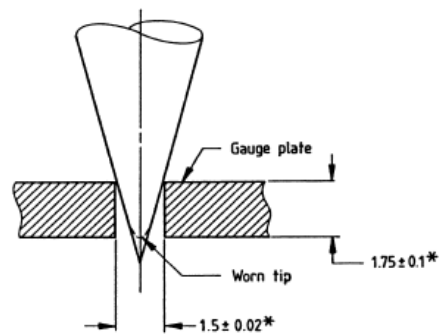


Figura 3.25 Dimensiones del cono

En las dos figuras anteriores podemos observar los detalles del cono del penetrómetro que aparecen en la BS 1377-2 1990.

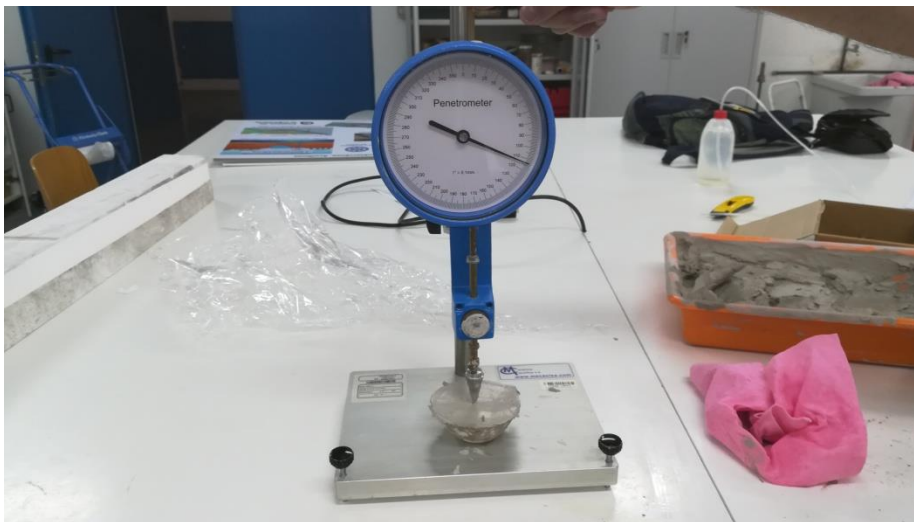


Figura 3.26 Penetrómetro de cono del laboratorio de Geotecnia de la UPCT

4 Puesta en funcionamiento de la Célula de Rowe

4.1 Montaje de la célula

Para hacer el montaje de la célula de consolidación hidráulica (Célula Rowe), debemos primeramente tener la base separada del cuerpo central y sin ninguna conexión.

Una vez tenemos la base preparada, colocamos las placas porosas en los cuatro intersticios que, durante el ensayo, vamos a utilizar para medir la presión intersticial.

Para asegurarnos de que no hay ninguna partícula que pueda generar riesgo de obstrucción, como podrían ser restos de arena de un ensayo anterior, echamos agua destilada por el interior de las válvulas que están conectadas con los puntos situados en la base.

Antes proceder a su montaje, colocamos 6 recipientes metálicos de altura superior a 5 centímetros y sobre ellos colocamos una placa de acero para colocar posteriormente la célula sobre éste apoyo y que permita después trabajar con los transductores y demás conexiones hidráulicas con cierta comodidad. Los recipientes deben colocarse sobre una bandeja lo suficientemente grande y estanca.

Una vez que está limpia la base, colocamos sobre ella el cuerpo, es decir, la parte central de la Célula Rowe. La atornillamos con la ayuda de una llave inglesa y de una llave carraca.

Si vamos a realizar un ensayo de consolidación radial hacia el perímetro de la célula, debemos insertar el dren radial. El dren ocupa el total de la superficie lateral y se puede encajar completamente en la base.

Para realizar éste ensayo, es necesario que el dren esté completamente saturado de agua y limpio. Para esto, lo mejor es ponerlo a hervir en agua destilada 10 minutos, ya que así, quedará limpio de cualquier partícula ocluida y a la vez quedará totalmente saturado.

Si ya está limpio, otra forma de saturarlo es introducirlo en la célula y llenarla hasta arriba de agua destilada.

Antes de colocar la muestra ensayar, colocamos los transductores de presión en los puntos en los que vamos a medir la presión intersticial, y en su salida al exterior, colocaremos tubo transparente de un 1 metro de longitud.

Introducimos agua en el cuerpo de la célula y abrimos las válvulas conectadas a los puntos de medida de presión. A éstas válvulas están conectados los transductores de presión intersticial y a la vez que abrimos las válvulas que van incorporadas en el cuerpo de la Célula Rowe, abrimos las válvulas de los transductores para permitir que desde el punto de medida de presión hasta la válvula de salida del transductor, sólo haya agua. Por eso ponemos un tubo de 1 metro de longitud, para poder ver que han salido todas las burbujas de aire y que sólo queda agua en su interior.

Una vez colocado el dren periférico, el dren radial, debemos colocar la muestra a ensayar. Para ello con la ayuda de varios tipos de espátula colocamos la muestra con la precaución de no compactarla. Que como mucho tengamos en el caso de una muestra de arena. Arena ligeramente compactada. Cuando hayamos introducido la muestra a ensayar, debemos medir con la ayuda de un escalímetro o de una regla flexible la altura libre que queda dentro del cuerpo de la célula sobre la superficie de la muestra. Es muy importante que la muestra quede a la misma distancia de la parte superior en cualquier punto de la superficie, es decir, que la muestra tenga la misma altura en todos los puntos.

Una vez hechas las comprobaciones anteriormente descritas, debemos colocar el disco metálico que apoyará sobre la superficie de la muestra y seguidamente una placa porosa que irá debajo de otro disco metálico de superficie un poco menor.

El porqué de utilizar la placa porosa entre los dos discos rígidos de acero es porque éstos presentan una cavidad de pequeño diámetro para poder, si se desea, introducir una contrapresión o presión de cola desde el mismo aparato que actúa como equipo de presión de entrada.

Las placas de acero se deben colocar con la ayuda de una llave en T que se introduce en el interior de ambas por su centro. La conexión es atornillada.

Una vez hemos colocado las placas rígidas, llenamos la célula completamente de agua destilada hasta rebosar.

Antes de colocar la cubierta de la célula, abrimos los drenajes con la ayuda de un transductor manual para poder conectar un tubo de 1 metro longitud y ver que no queda ninguna burbuja, que sólo sale agua del interior de la célula.

Esta comprobación es esencial, puesto que no debe quedar ninguna burbuja de aire en el interior de la célula.

Tras ésta comprobación, ya se puede colocar la cubierta de la célula. Para ello son necesarios varios recipientes metálicos que mantenga la cubierta separada unos 5 centímetros del cuerpo de la célula para poder ir bajando poco a poco el diafragma y poder asegurarnos de que toda la superficie del diafragma queda rodeada sólo de agua. Puede ser necesario el uso de frascos lavadores rellenos de agua destilada para ir añadiendo agua en caso de que sea necesario.

Posteriormente se llena el diafragma de agua completamente. Es importante evitar que queden huecos rellenos de aire en el diafragma, pero como es casi imposible que quede completamente purgado de todo el aire, hay que evitarlo al máximo posible. Si queda algo de aire no nos va a influir en el proceso de consolidación ya que la presión de agua que vendrá procedente del equipo de presión hará que el aire se ponga a la misma presión que el agua.

Finalmente colocamos la cubierta de acero inoxidable (Figura 4.1), al igual que toda la célula, con tornillos y la ayuda de la llave inglesa y la llave carraca.

Conectamos el equipo de presión a la célula a través de dos tubos transparentes que están conectados entre sí a un transductor de presión. Éste transductor nos permitirá

registrar las presiones de entrada en cada momento al diafragma y por lo tanto la presión ejercida sobre la muestra.

Para conectar el transductor de presión al tubo, necesitamos un racor macho-macho de entrada rápida (Figura 4.2) que finalmente se conecte a una hembra con salida del mismo diámetro del tubo que se conecta a la cubierta de la célula y también con conexión rápida.

Antes de conectarlo a la célula, dejamos que pase una pequeña presión de 0,1 bar para que salga el agua a presión y no queda ninguna burbuja de aire en el interior de la conexión.



Figura 4.1 Colocación de la cubierta en la Célula Rowe



Figura 4.2 Racor macho-macho a la entrada de agua a presión al equipo

Si hubiéramos querido que el ensayo de consolidación radial fuera hacia el interior, hacia un dren de arena colocado en el centro de la muestra, deberíamos haber introducido, en un tubo de ensayo de diámetro igual al punto central de medida de presión intersticial de nuestra célula, arena de mayor permeabilidad que la muestra a ensayar, completamente saturada. Ésta arena se congela y finalmente se saca sin romperse del tubo de ensayo o molde específico y se coloca en el interior de la célula antes de colocar la muestra, que deberá ser colocada al instante para evitar pérdidas de agua del dren interior.

Éste dren interior es necesario también si queremos determinar la permeabilidad horizontal de la muestra empleando el procedimiento recogido en la BS 1377-6 1990.

4.2 Equipo de presión y compresor

Las características del compresor ya han sido definidas anteriormente. En éste apartado nos vamos a centrar en su funcionamiento.

En primer lugar, conectamos a la luz el compresor y permitimos que se llene de aire a la presión deseada. Para nuestros ensayos vamos a regular una presión de 8 bares.

El compresor tiene una válvula conectada a un medidor que nos permite regular la presión que tiene el compresor en su interior y otra válvula que nos permite regular la presión a la que va a salir el aire del compresor. En nuestro caso, permitimos que salgan 6 bares del compresor.

El compresor tiene un sistema que permite que, en cuanto baje su presión por debajo de 6 bares, se encienda automáticamente hasta volver a ponerse a 8 bares. Lo normal es que, durante todo el proceso de ensayo y registro de datos en el módulo, se encienda una única vez.

En la salida de aire comprimido colocamos un tubo transparente de longitud mayor a los 2 metros, para que llegue con holgura al cilindro (Figura 4.3).

Lo conectamos al cilindro (Figura 4.4) y procedemos a purgarlo de aire y llenarlo de agua.

Para llenarlo de agua, conectamos en la válvula de salida de agua de la parte inferior un frasco lavador lleno de agua destilada colocado a una diferencia de cota suficiente como para permitir que el agua pase del frasco al interior del cilindro por gravedad. A su vez abrimos la válvula superior del cilindro para permitir que vaya saliendo el aire. Es altamente efectivo colocar tubo transparente en la válvula de salida de aire para que, cuando empiece a salir agua de su interior, podamos cerciorarnos de que no hay ni una sola burbuja de aire en el interior del cilindro. Todo esto debemos hacerlo con el globo completamente vacío de aire, para que, en cuanto empiece a llenarse de agua, empiece a su vez a ejercer presión sobre el agua que le rodea.

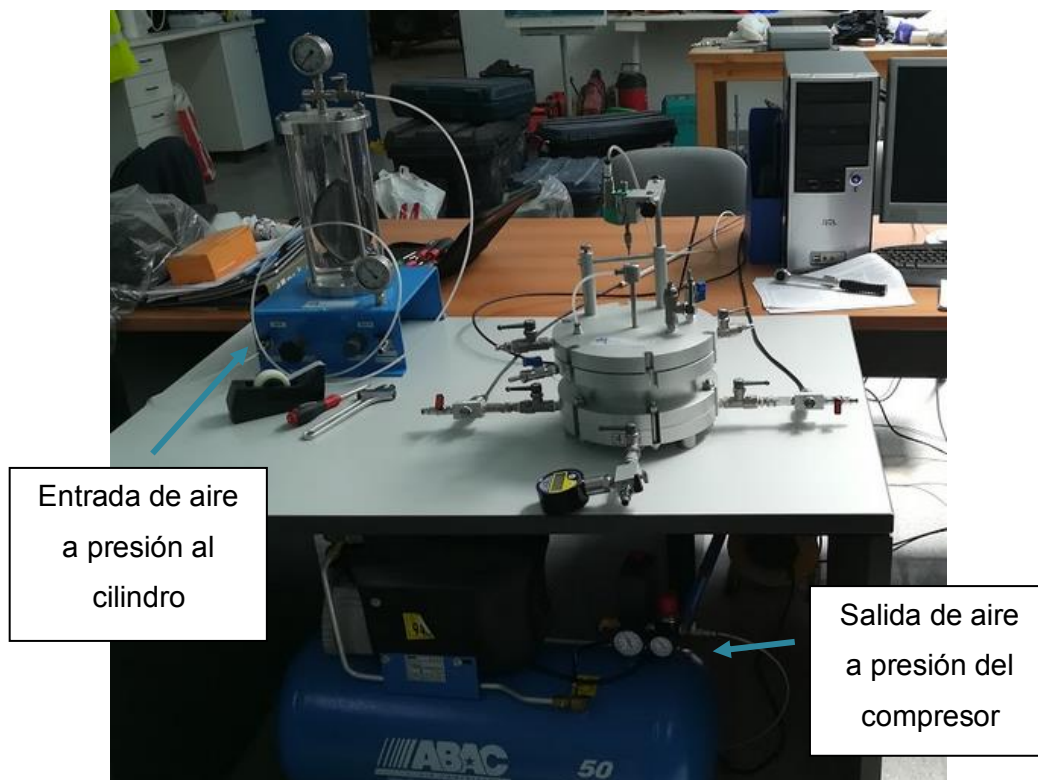


Figura 4.3 Compresor y equipo de presión

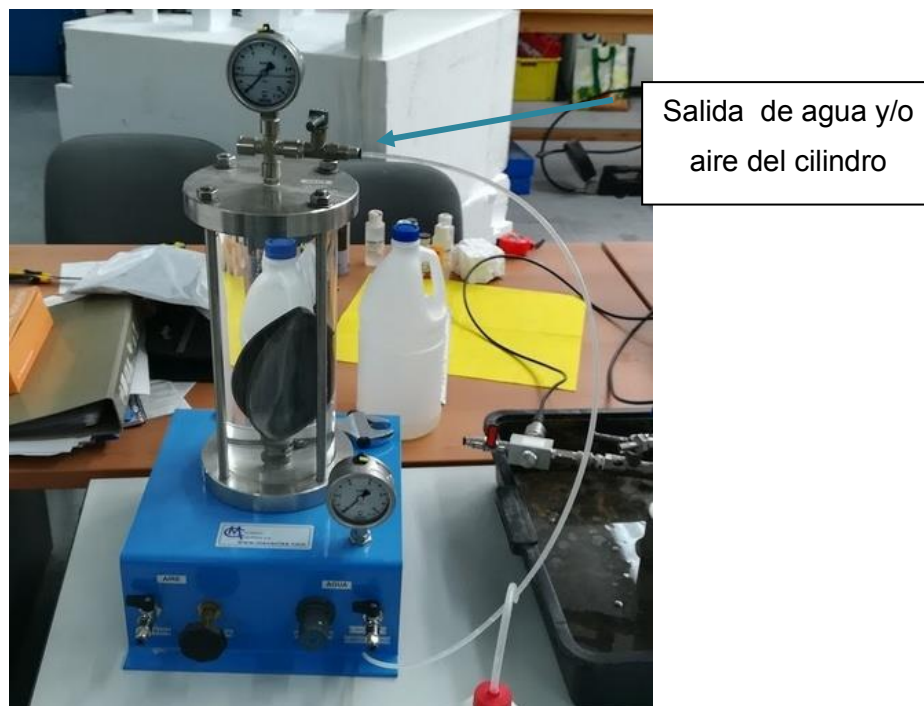


Figura 4.4 Equipo de presión

4.3 Ensayos de comprobación

4.3.1 Ensayo para comprobar la estanqueidad

El primer ensayo que hicimos, fue un ensayo de comprobación con la célula hidráulica completamente llena de agua. El objetivo era comprobar la estanqueidad del módulo y también que las presiones que teníamos en los puntos situados en la base de la célula eran exactamente iguales a la presión de entrada generada por el cilindro de presión.

Éste primer ensayo, era muy importante para nosotros, pues la célula nunca se había montado en el laboratorio de la UPCT y por lo tanto, tampoco se había realizado ninguna medida ni ningún registro procedente de la misma.

Una semana antes de realizar el ensayo, nos reunimos para comprobar que estaban todas las piezas que integraban la célula de consolidación radial, el compresor y el equipo de presión. También buscamos un primer emplazamiento para poder realizar cómodamente los ensayos de comprobación.

Colocamos todas las partes de la célula (que se encontraba completamente desmontada) en su ubicación y fijamos una fecha para hacer el primer ensayo únicamente con agua en su interior.

Durante una semana, tanto el profesor García Ros como yo, estuvimos viendo los vídeos que fueron grabados en Getafe, en las instalaciones de Mecacisa.

En esos vídeos se podía ver claramente cómo se utilizaba y cómo funcionaba el compresor. También había indicaciones para utilizar el equipo de presión y poder introducir en la célula una contrapresión o presión de cola.

Después de ver los vídeos por separado, tuvimos una reunión en laboratorio de Geotecnia para ver los vídeos juntos y al lado de la célula para poder identificar lo que veíamos en los vídeos.

Empezamos comprobando que el compresor de aire funcionaba correctamente. Lo enchufamos y lo programamos para que tuviera en su interior una presión siempre mayor a los 6 bares. Comprobamos la salida de aire a presión y vimos que todo funcionaba correctamente y que, pasado un tiempo, al bajar la presión, se volvía a encender hasta recuperar una presión de 8 bares.

Una vez comprobado el funcionamiento del compresor, pasamos a llenar completamente de agua el equipo de presión. El equipo de presión tiene una entrada de aire, que se utiliza para conectarlo al compresor y que se llene de aire el globo interior. También tiene dos válvulas que se utilizan para llenar el cilindro de agua y a su misma vez purgarlo de aire, y para que, durante el ensayo, si lo deseamos, podamos introducir una presión de cola determinada.

Utilizamos un depósito de material plástico lleno de agua saturada para llenar el cilindro, elevándolo una diferencia de cota de al menos un metro. Cuando por la purga de aire sólo salía agua, cerramos inmediatamente la válvula de entrada de agua y a la vez la válvula de salida.

Finalmente pasamos a la parte esencial, que fue montar la célula de consolidación hidráulica o Célula Rowe.

Introducimos los filtros en los cuatro puntos situados en la base de la célula.

Colocamos con las debidas precauciones colocamos el cuerpo sobre la base y seguidamente el dren perimetral. Antes de colocar la cubierta, llenamos su interior a rebosar de agua destilada y colocamos el diafragma llenándolo también completamente de agua destilada.

Una vez colocada la cubierta sobre el cuerpo, la atornillamos y saturamos el tubo que va a conectar el equipo de presión a la cubierta de la célula.

Una vez saturado, se conecta a la célula, con la válvula de entrada cerrada.

Conectamos el compresor con el globo interior del cilindro de presión y fijamos una presión de salida desde el compresor de 6 bares.

El equipo de presión lleva incorporado un regulador de entrada de presión. Antes de meter presión en el agua y por lo tanto de dar presión al agua del cilindro, abrimos la válvula de salida del equipo de presión y la válvula de entrada de la Célula Rowe.

Abrimos la válvula de entrada de aire al equipo de presión y desde cero vamos regulando y subiendo la presión hasta obtener la deseada.

Primero fijamos una presión de entrada a la célula de 0,5 bares. Conectamos el transductor de presión manual en las diferentes válvulas de salida situadas en la base de la célula y pudimos observar que la presión que marcaba era de 0,5 bares.

Posteriormente subimos la presión del globo a 1 bar y en los diferentes puntos de medida de presión intersticial de la base de la célula, pudimos comprobar que la presión era también de 1 bar.

Fuimos subiendo y bajando presiones y pudimos comprobar que la presión de entrada, al tener sólo agua en el interior de la célula siempre era la misma en los puntos de medida de presión intersticial.

Como vimos que todo era coherente y no había ninguna pérdida de agua concluimos que la Célula Rowe era completamente estanca.

Acabado el ensayo, desmontamos la célula y echamos agua destilada en todos los conductos interiores y en todas las piezas que la componen.

4.3.2 Primer ensayo de prueba con arcilla y drenaje radial exterior

Una vez realizado el primer ensayo de comprobación de estanqueidad con agua, decidimos empezar a trabajar con material arcilloso. Utilizamos arcilla con alto porcentaje en Moscovita que nos encargamos, siguiendo las instrucciones del apartado 3.4.2 de éste trabajo, de que estuviera al límite líquido para realizar en ensayo de consolidación (Figuras 4.5 y 4.6).



Figura 4.5 Determinación de la humedad de la muestra con el penetrómetro de cono



Figura 4.6 Determinación de la humedad de la muestra con el penetrómetro de cono

Seguidamente, volvimos a montar la Célula Rowe, primero atornillando el cuerpo a la base y después colocando el dren radial/perimetral para realizar drenaje radial hacia la periferia (Figura 4.7).

El dren estuvo media hora sumergido completamente en agua destilada para que el drenaje pudiera realizarse de manera adecuada.



Figura 4.7 Célula Rowe con el dren perimetral colocado

Una vez colocado el dren, saturamos todas las vías de medida de presión intersticial y los drenajes.

Con la ayuda de varios tipos de espátula, colocamos la muestra de arcilla (Figura 4.8), que tenía una altura de 4 centímetros medidos desde la base (Figura 4.9).

Después colocamos una placa rígida sobre la muestra, cerciorándonos de que la superficie de la muestra estaba al mismo nivel.

Saturamos completamente la muestra hasta rebosar y colocamos la cubierta, llenando posteriormente el diafragma.

Llenamos de agua el cilindro del equipo de presión por gravedad, saturamos la vía/tubo que iba conectado a la cubierta para introducir presión al diafragma, y la conectamos con la válvula de entrada a la célula cerrada a la cubierta de la célula.



Figura 4.8 Colocación de la muestra en el interior de la célula Rowe

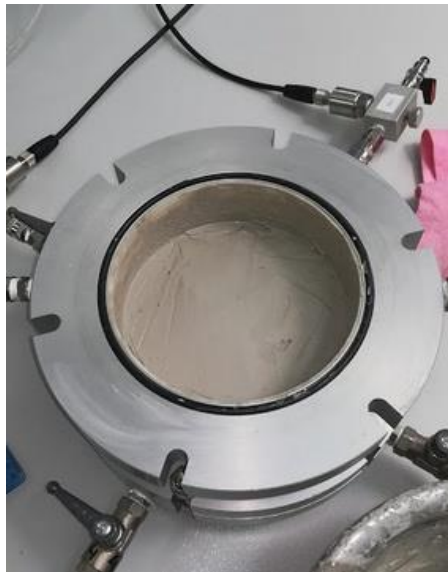


Figura 4.9Muestra en el interior de la célula Rowe

Una vez cerrada la célula y atornillada, le fuimos introduciendo presión al diafragma con la ayuda del compresor y con las dos válvulas de drenaje radial cerradas.

Fuimos midiendo la presión en los cuatro puntos de medida de presión y nos marcaba exactamente la misma presión que le estaba entrando al diafragma. Es lo lógico, pues al no drenar, es el agua la que soporta toda la presión.

$$\sigma_t = \sigma' + u_t$$

En nuestro caso, el agua coge toda la presión, por lo que:

$$\sigma_t = u_t$$

Decidimos, después de comprobar que se cumplía que la tensión efectiva era cero, abrir el drenaje y comprobamos que la presión intersticial comenzaba a caer.

Éste ensayo no fue registrado ya que no disponíamos ni de los transductores de presión ni del módulo Cyber-Plus Evolution de registro de datos.

Fue un ensayo para determinar si los demás ensayos iban a ser realizados con arcilla, con limos o con arenas y también para comprobar que la Célula Rowe funcionaba correctamente. En este sentido, el ensayo fue un completo éxito (y más teniendo en cuenta que era el primero que hacíamos con la célula, después de muchas horas de trabajo invertidas).

5 Ensayos registrados con la célula de Rowe

5.1 Selección de muestras

Para realizar los tres ensayos que van a ser descritos, se utilizó material arenoso procedente de la ribera del Mar Menor.

A su vez, se preparó material arcilloso con alto porcentaje en moscovita y material limoso cribado en el laboratorio de geotecnia.

5.1.1 Características de la arena suelta:

$$W_s = 95,65 \text{ g}$$

La muestra fue pesada en el interior de un cilindro metálico de diámetro 5 cm y de altura igual a 3 cm. Por lo tanto, el volumen de arena es:

$$V_{\text{arena}} = \frac{\pi \phi^2}{4} h = \frac{\pi 5^2}{4} 3 = 58,9 \text{ cm}^3$$

El peso específico es igual a:

$$\rho_d = \frac{W_s}{V_{\text{arena}}} = \frac{95,65 \text{ g}}{58,9 \text{ cm}^3} = 1,63 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Determinación de la densidad relativa de las partículas G_s :

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{W_s/V_s}{W_w/V_w} \quad \text{si } V_v = V_w \quad G_s = \frac{W_s}{W_w}$$

Realizando el ensayo del picnómetro (UNE-103-302 [1994]), que es el más sencillo al no tener que calcular el volumen de arena, obtenemos que:

$$M_1 = 170,02 \text{ g}$$

$$M_2 = 109,03 \text{ g}$$

$$M_3 = 120,12 \text{ g}$$

$$M_4 = 177,16 \text{ g}$$

$$G_s = \frac{(M_3 - M_2)}{((M_3 - M_2) + (M_1 - M_4))} = \frac{(120,12 - 109,03)}{((120,12 - 109,03) + (170,02 - 177,16))} = 2,81$$

Teniendo en cuenta que:

M_1 : Peso del picnómetro lleno de agua y enrasado.

M_2 : Peso del picnómetro lleno a la mitad de agua.

M_3 : Peso del picnómetro lleno a la mitad de agua añadiendo la arena

M₄ : El picnómetro lleno a la mitad de agua, tras añadir la arena y después llenarlo de agua hasta enrasar. Se pesa y obtenemos M₄.

Con los datos que hemos obtenido, ya podemos calcular el índice de poros inicial.

$$e_0 = \frac{G_s}{\rho_d} - 1 = \frac{2,81}{1,63 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} - 1 = 0,729$$

Finalmente, presentamos la curva granulométrica obtenida en laboratorio para esta arena (Figura 5.1), a partir de la cual es posible inferir la permeabilidad de la misma, oscilando entre 0,0003 y 0,0007 m/s. A la vista de la curva, se observa que se trata de una arena bastante uniforme.

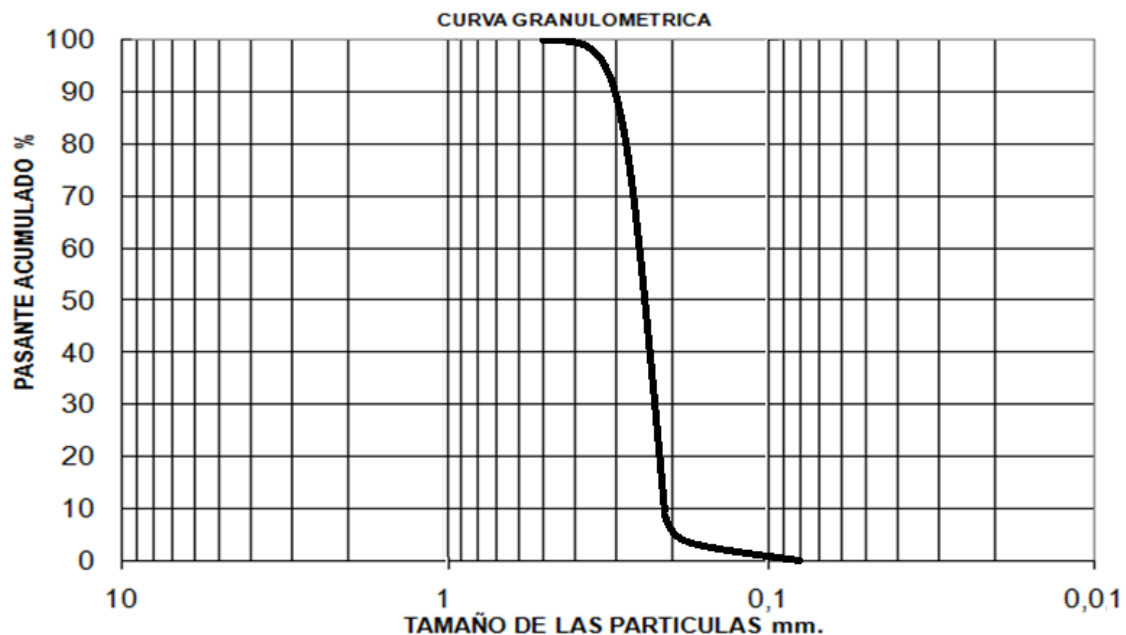


Figura 5.1 Curva granulométrica de la arena obtenida en laboratorio

5.2 Ensayos

5.2.1 Ensayo 01: Ensayo no drenado con arena ligeramente compactada

5.2.1.1 Descripción del ensayo

Éste ensayo fue el primero realizado tras el proceso de calibración de los transductores y del módulo de registro Cyber-Plus Evolution. Por lo tanto, fue el primer ensayo en el cual los datos quedaron registrados.

Al ser un ensayo no drenado, la presión de entrada o presión aplicada por el diafragma a la muestra arenosa debe ser igual a las presiones intersticiales que vamos a medir en los puntos 1 (central) y 4 (el más cercano al dren perimetral).

El punto 1 va a estar conectado al transductor CH7 y el punto 4 al CH8. El medidor de deformaciones (deformímetro) va a ir conectado al transductor CH3.

Tras colocar debidamente la muestra en el interior de la célula, medimos su altura que era de 29 mm.

La muestra fue sometida a tres tramos de carga/descarga desde 0 bares a 5 bares, con escalones de 0,5 bares e intervalos de tiempo variables.

La muestra estuvo sometida a una presión de 0,5 durante 1 minuto. A los 5 minutos, la presión aplicada ya era de 4 bares. A los 5 minutos y 35 segundos, era de 4,5 bares.

A los 20 minutos, la presión aplicada era de 1,5 bares en el primer tramo de descarga.

El segundo tramo de carga empezó a los 24 minutos y el tercero a los 32 minutos.

En las Figuras 5.2 y 5.3 podemos ver que no hay asentamiento alguno. Totalmente lógico, ya que al estar cerrado el drenaje, no sale agua del interior de la célula.

También se puede observar que la presión aplicada es exactamente la misma que la presión intersticial en los puntos 1 y 4. Esto se debe a que, al no haber caudal de salida de agua, es ésta la que (durante todo el proceso) soporta la totalidad de la presión aplicada a través del diafragma.

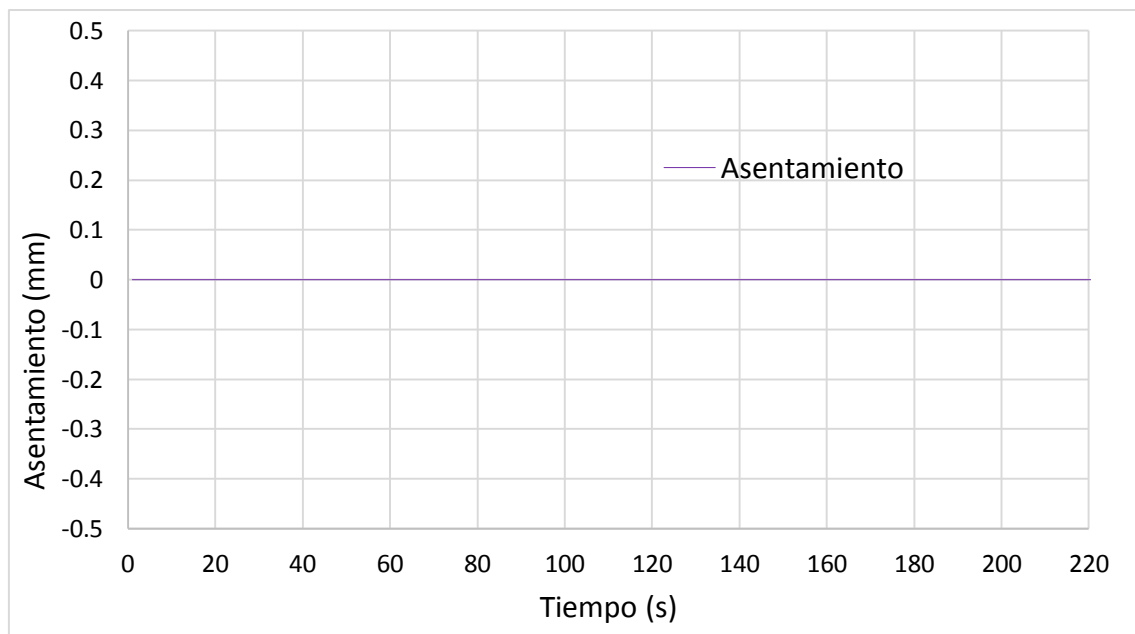


Figura 5.2 Asentamiento del ensayo no drenado con arena

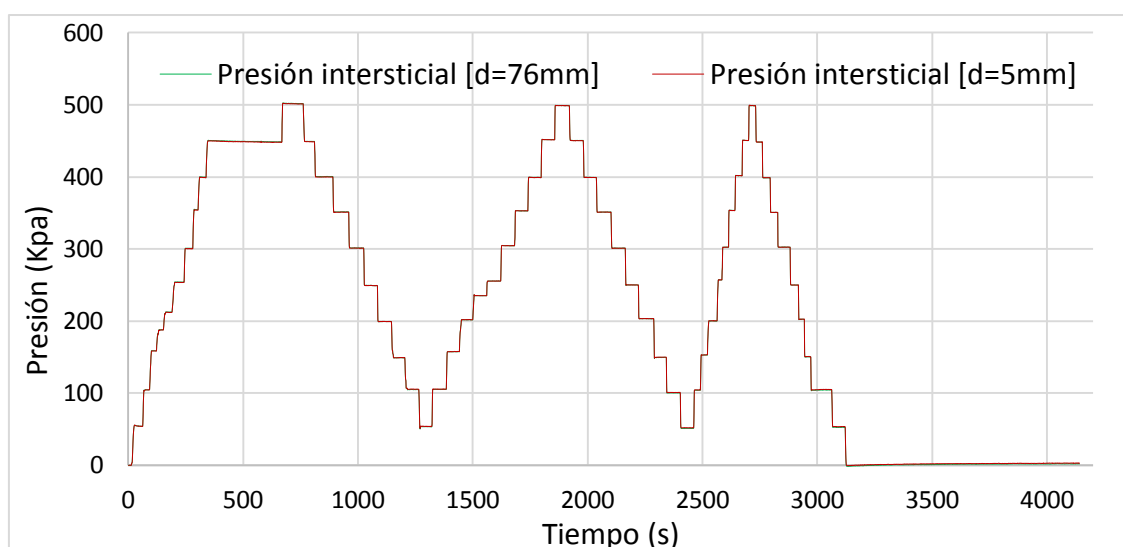


Figura 5.3 Presión intersticial (puntos 1 y 4) durante el ensayo no drenado con arena

5.2.2 Ensayo 02: Drenado a 0,5 bares

5.2.2.1 Descripción del ensayo

Para realizar éste ensayo, conectamos el punto 1 con el transductor CH7, el punto 2 con el transductor CH6. La presión de entrada al sistema fue registrada por el transductor CH8. La deformación por el CH3.

Por supuesto, los conductos de los puntos 3 y 4 fueron saturados para realizar el ensayo, así como las dos válvulas que permiten el drenaje.

La muestra tenía una altura medida desde la base de 26 mm.

La primera parte del ensayo fue el escalón fue para pasar de 0 bares a 0,5 bares. Se registraron datos cada segundo (Figuras 5.4 y 5.5).

Una vez alcanzados los 0,5 bares se abrió el drenaje hasta que se dejó de asentar la muestra, alrededor de 20 segundos. Se registraron datos cada 0,01 segundo. Ésta parte fue la segunda del ensayo (Figuras 5.6 a 5.10).

La tercera parte empezó una vez cerrado el drenaje (Figuras 5.11 y 5.12). Consistió en someter a la muestra a tres tramos de carga y descarga. Los escalones eran de 0,5 bares hasta llegar a los 5 bares. Desde los 5 se volvía a bajar a los 0,5 bares en escalones de 0,5 bares.

5.2.2.2 Parte 1

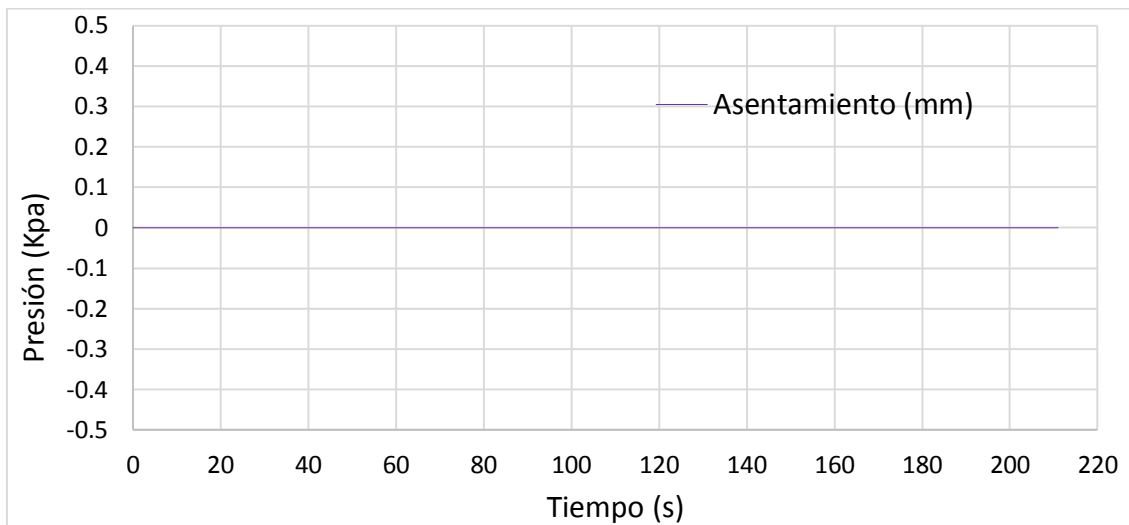


Figura 5.4 Asentamiento del tramo de carga sin drenar hasta 0,5 bares

En la Figura 5.4 se puede apreciar que, al no existir drenaje, no hay asentamiento.

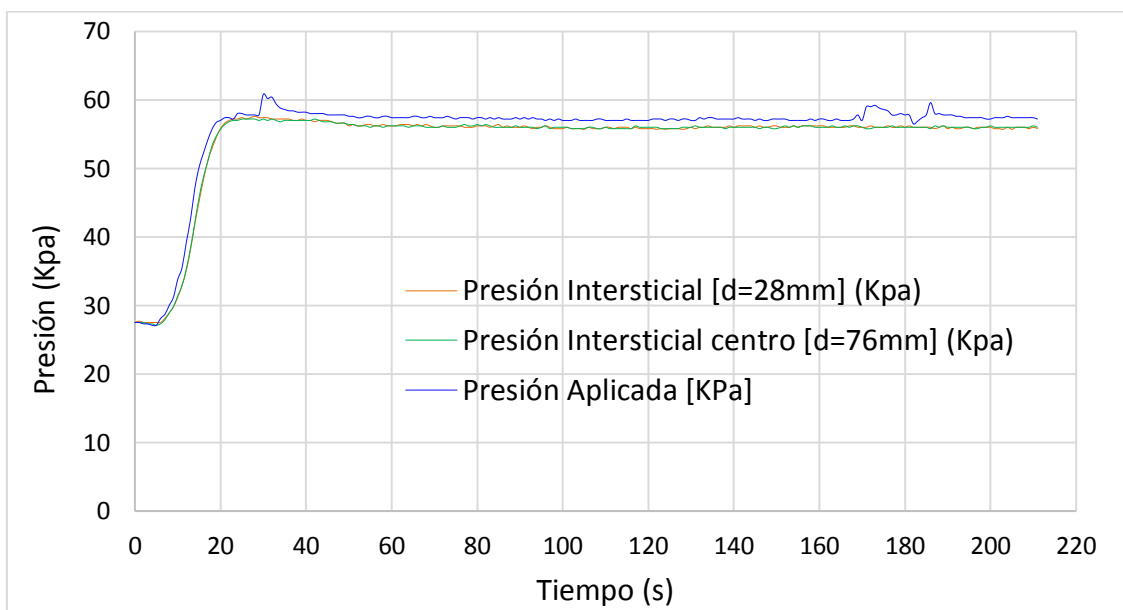


Figura 5.5 Presión aplicada y presiones intersticiales del tramo de carga sin drenar

5.2.2.3 Parte 2

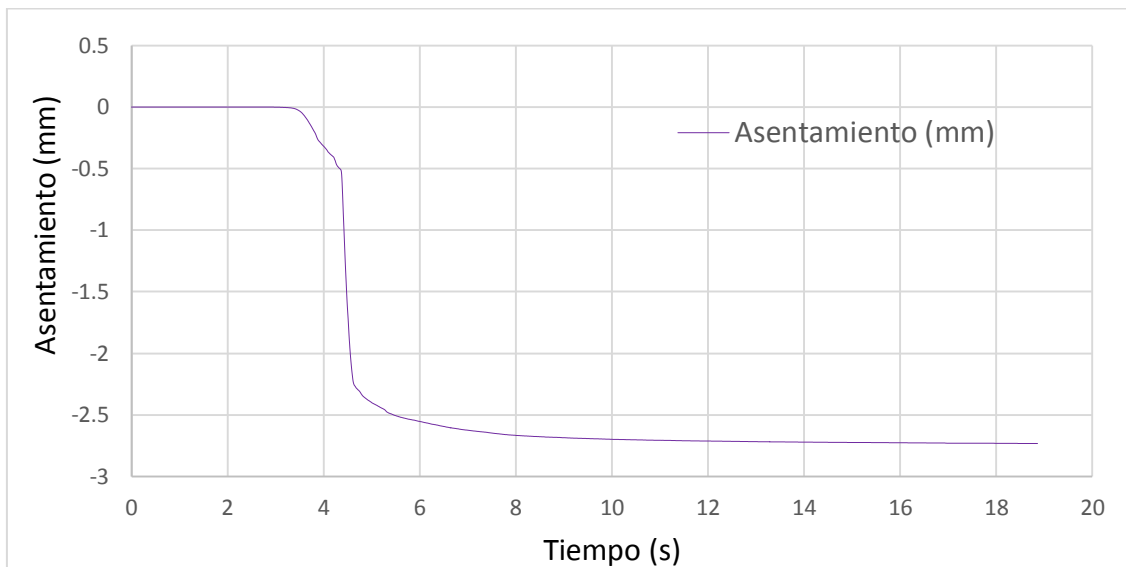


Figura 5.6 Asentamiento del ensayo tras abrir el drenaje a 0,5 bares

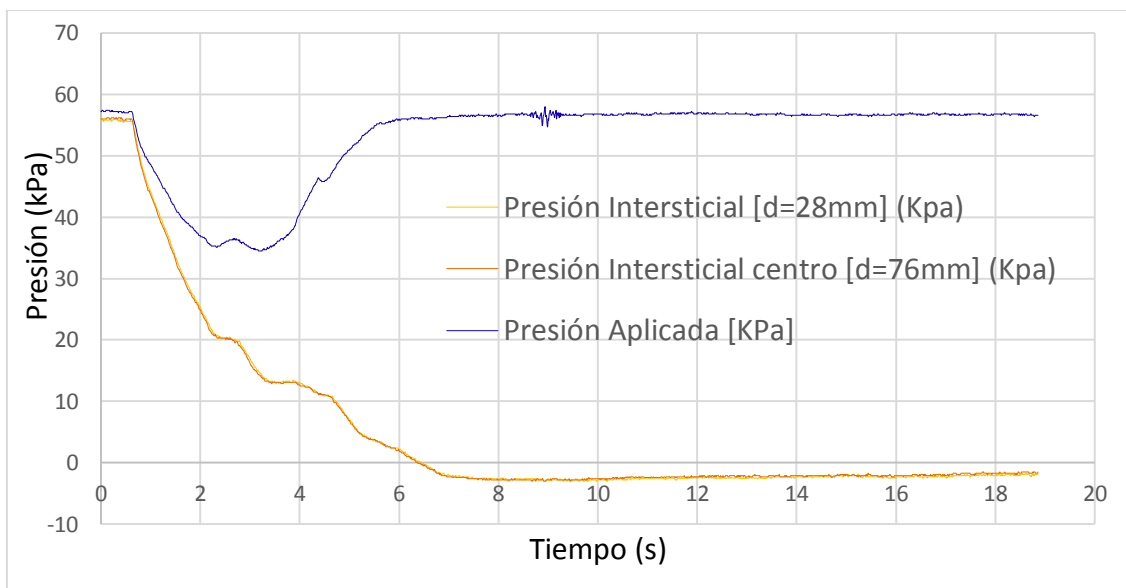


Figura 5.7 Variación de las presiones durante el drenaje a 0,5 bares

A partir de la Figura 5.8 (Berry y Reid [2000]) podemos obtener el factor de tiempo T_r , para un grado de consolidación radial del 50% ($T_{r,50}$).

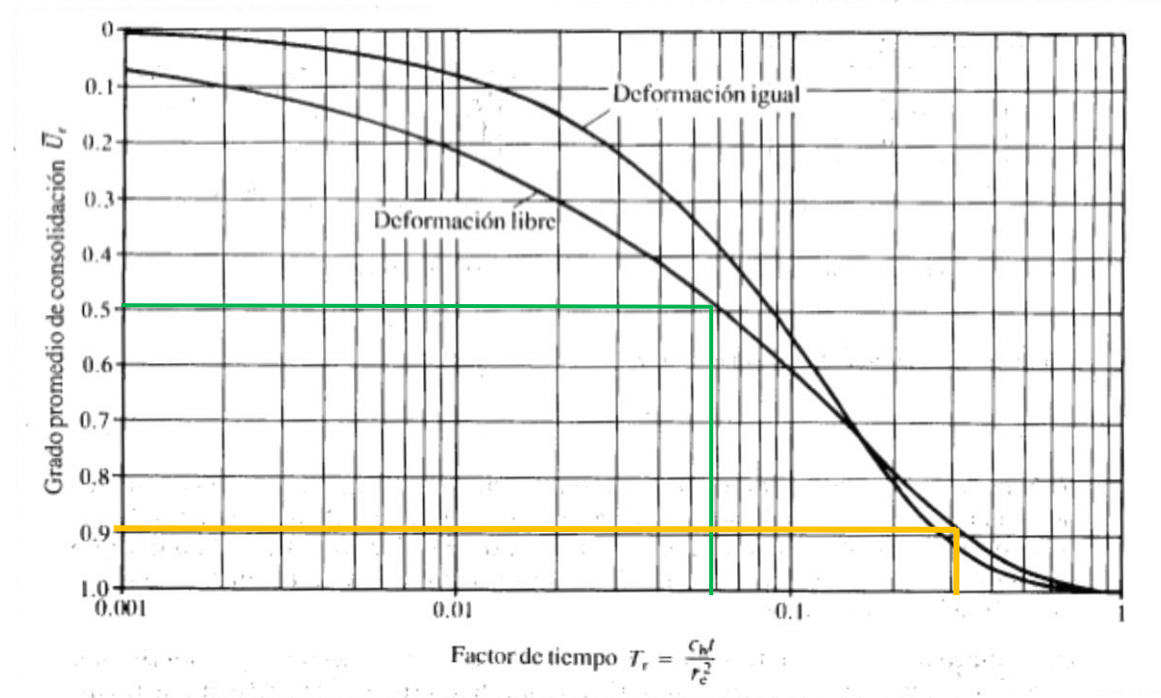


Figura 5.8 Grado medio de consolidación radial, U_r , en función del factor de tiempo T_r

En la gráfica anterior, para un grado promedio de consolidación de 0,5 obtenemos un T_r de 0,06. Con el t_{50} del proceso de consolidación, obtenido usando el método de Casagrande, podemos calcular finalmente c_h utilizando la siguiente fórmula:

$$T_r = \frac{c_h t}{r_c^2}$$

donde:

c_h : coeficiente de consolidación horizontal (radial)

t : tiempo de ensayo

T_r : factor de tiempo

r_c : radio de la muestra.

También vamos a utilizar el método de Taylor para obtener c_h . Para ello necesitamos el T_r para un grado de consolidación del 90% ($T_{r,90}$). En la Figura 5.8 podemos obtenerlo, teniendo un valor de 0,34.

5.2.2.4 Determinación de c_h

Para el cálculo de c_h , necesitamos la curva del asentamiento en función del tiempo.

Vamos a utilizar el método de Casagrande (Figura 5.9), quien propuso un método gráfico partiendo de los datos obtenidos del ensayo de consolidación realizado. En nuestro caso ha sido de consolidación radial hacia la periferia de la muestra utilizando la célula Rowe.

Se debe graficar la curva asentamiento vs logaritmo del tiempo.

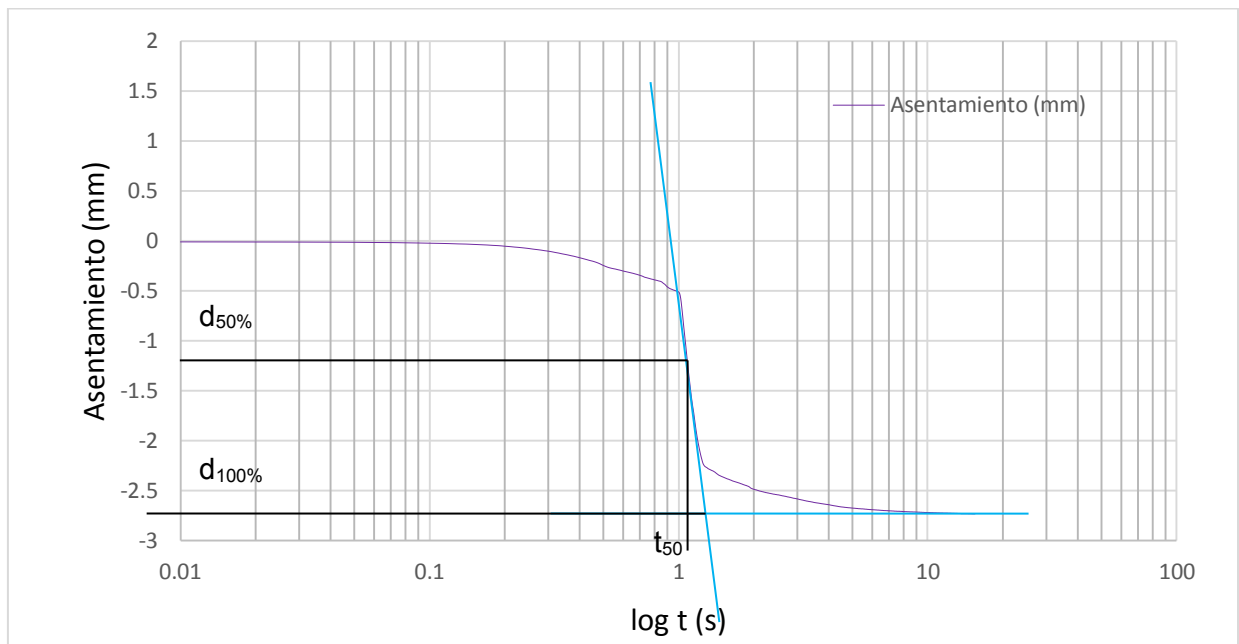


Figura 5.9 Determinación del t_{50} por el método de Casagrande

Vamos a determinar la deformación que corresponde al 100% de la consolidación primaria $d_{100\%}$. Es necesario extender la recta tangente a la parábola en el punto de inflexión y la recta tangente a los últimos puntos de la curva de consolidación. Ambas rectas se intersecan en un punto A cuya ordenada representa la deformación que corresponde al 100% de la consolidación primaria.

Finalmente, obtenemos el $d_{50\%}$, que es la mitad de del $d_{100\%}$.

$d_{100\%}$ es igual a -2,75 mm. Por lo tanto, el $d_{50\%}$ es igual a -1,375 mm. De esta manera, $t_{50} = 1,13$ segundos.

$$c_h = \frac{T_{r50} r_c^2}{t_{50}} = \frac{0,06 * 0,076^2}{1,13} = 3,067 * 10^{-4} \frac{m^2}{s} = 9671,78 \frac{m^2}{año}$$

Si utilizamos la formulación que aparece en la BS 1377-6 1990:

$$c_{ro} = \frac{0,026D^2}{t_{50}} = \frac{0,026 * 0,152^2}{1,13} = 5,32 * 10^{-4} \frac{m^2}{s} = 16764,43 \frac{m^2}{año}$$

Ahora vamos a calcular c_h utilizando el método de Taylor:

Para ello, en la Figura 5.10 vamos a dibujar la tangente inicial de la curva de consolidación, extendiéndola hasta ambos ejes. Llamamos A al punto de corte con el eje Y y B al punto de corte con el eje X.

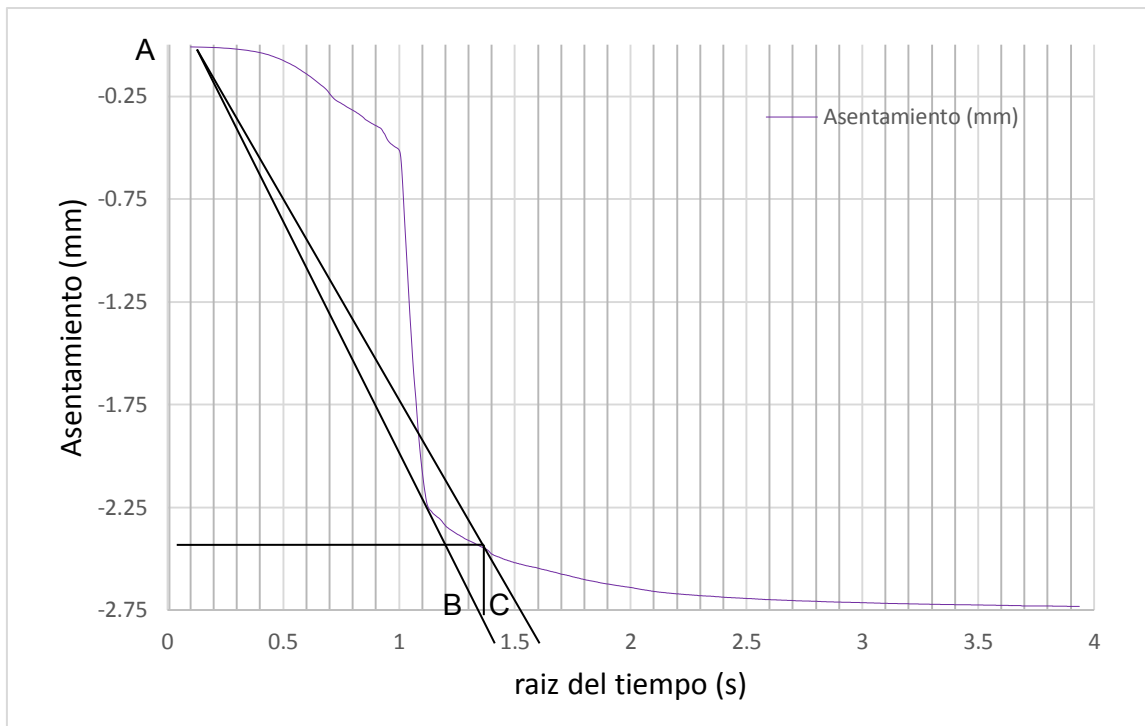


Figura 5.10 Determinación del t_{90} por el método de Taylor

B está a 1,32 segundos. Vamos a obtener el punto C que se encuentra a $1,15 \cdot B$ de distancia. $C = 1,52$ segundos.

El $d_{90\%} = -2,40$ mm (El t_{90} viene determinado por el punto en el que intersecan la recta AC y la curva de consolidación). Por lo tanto, el $t_{90} = 1,38$ segundos.

$$c_h = \frac{T_{r90} \cdot r_c^2}{t_{90}} = \frac{0,32 \cdot 0,076^2}{1,38} = 1,34 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} = 42238,13 \frac{\text{m}^2}{\text{año}}$$

5.2.2.5 Parte 3

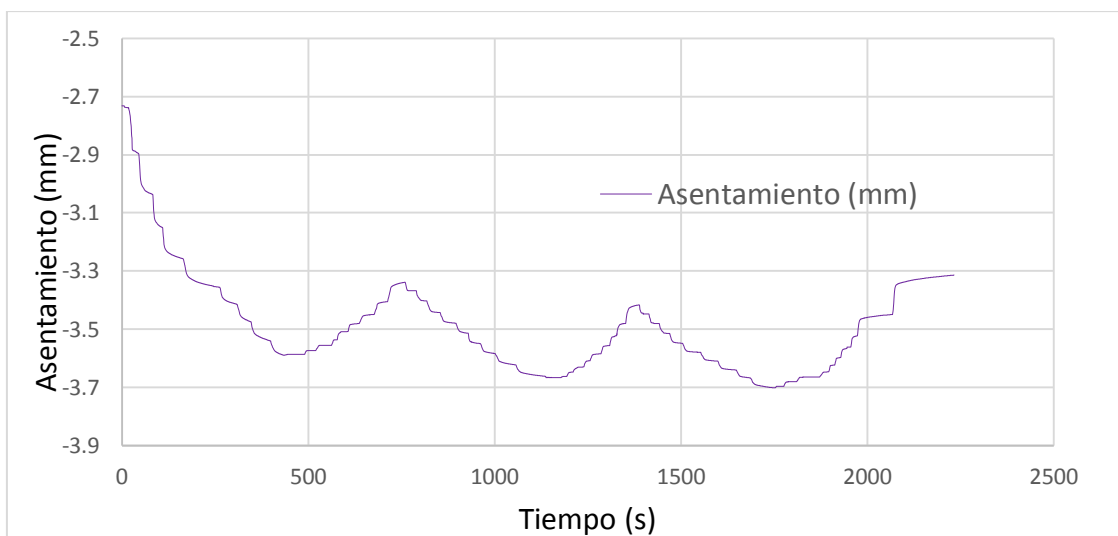


Figura 5.11 Asentamiento durante la tercera parte del ensayo

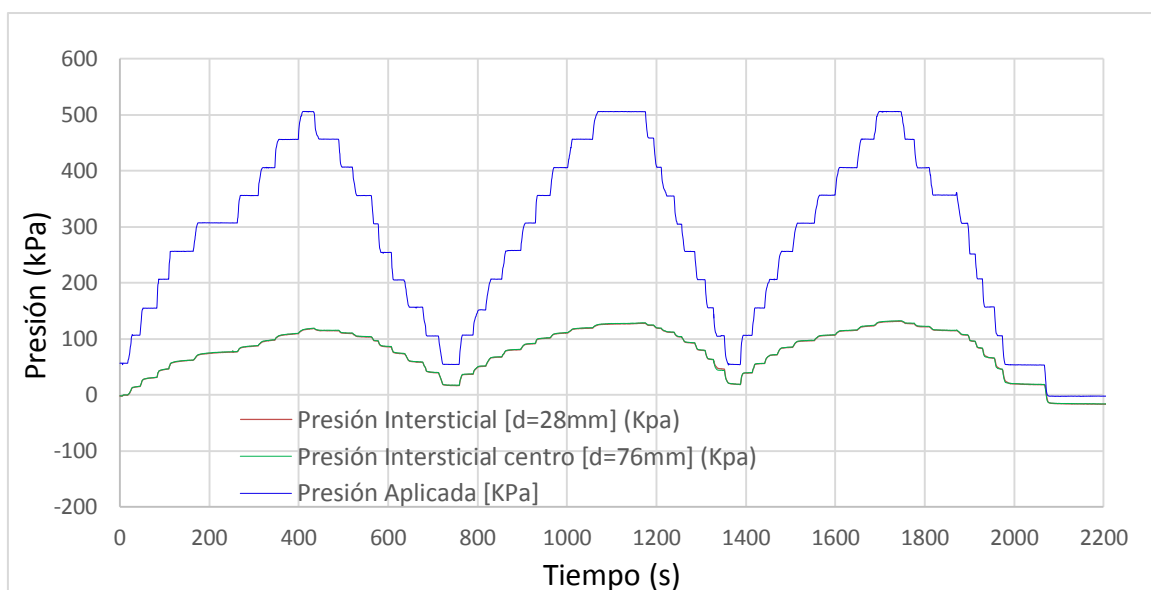


Figura 5.12 Presión aplicada e intersticial durante la tercera parte del ensayo

En la Figura 5.12 se puede apreciar que, tras el drenaje, el material arenoso soporta parte de la presión aplicada. La otra es soportada por el agua que queda en la muestra.

5.2.3 Ensayo 03: 1 bar drenado

Para éste ensayo, en la etapa de preparación, saturamos tanto los puntos 3 y 4 como los dos drenajes. En el punto 1 conectamos el transductor CH7 y en el punto 2 el CH6. El deformímetro, como no puede ser otra manera, fue conectado al transductor CH3. La presión de entrada fue registrada por el CH8.

La muestra arenosa, que era exactamente la misma que la utilizada en el ensayo de 0,5 bares drenado, tenía una altura sobre la base de 26 mm.

El drenaje fue hacia un recipiente lleno de agua destilada desaireada, al igual que en el ensayo 5.2.3.

La primera parte del ensayo consistió en subir la presión aplicada de 0 bares a 1 bar sin permitir el drenaje. Los datos se registran cada segundo (Figuras 5.13 y 5.14).

En la segunda parte (Figuras 5.15 a 5.18), abrimos el drenaje y lo cerramos cuando la muestra deja de asentarse. Los datos fueron registrados cada 0,001 segundo.

La tercera parte, con el drenaje ya cerrado estaba dividida en tres subidas y bajadas de presión, desde el 1 bar inicial hasta los 5 bares en escalones de 0,5 bares (Figuras 5.19 y 5.20).

En ésta parte, los datos fueron registrados cada segundo.

5.2.3.1 Parte 1

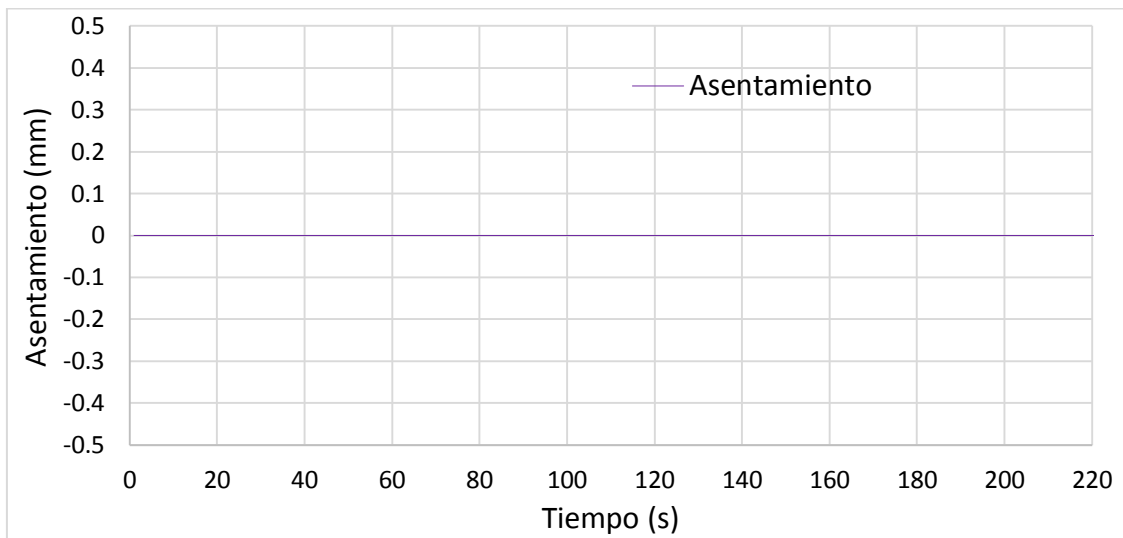


Figura 5.13 Asentamiento experimentado durante el primer tramo sin drenaje

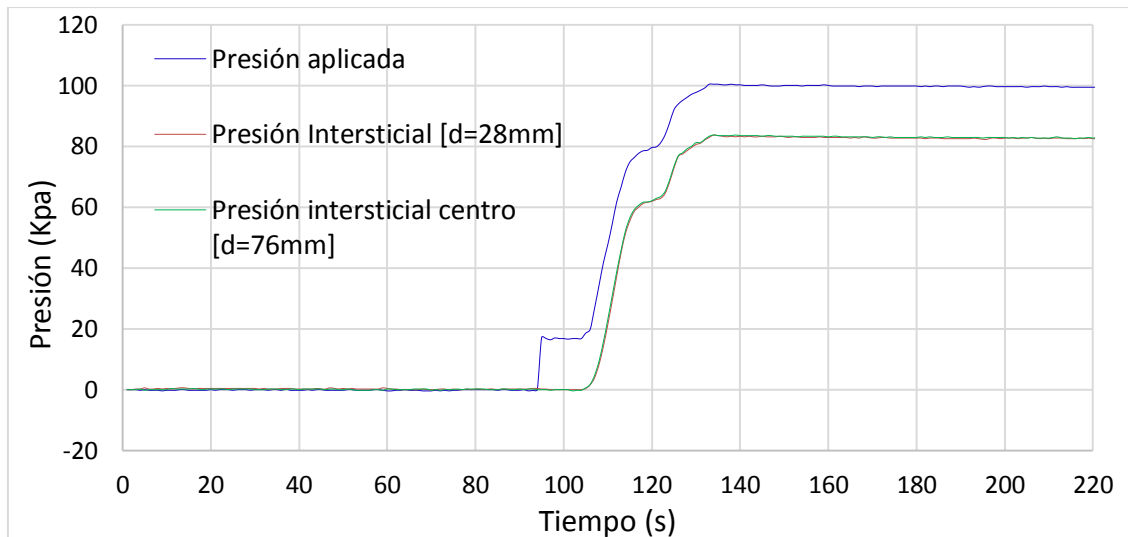


Figura 5.14 Subida de presiones en el primer tramo

No hay asentamientos debido a que el drenaje está cerrado. Toda la presión aplicada es soportada por el agua intersticial.

5.2.3.2 Parte 2

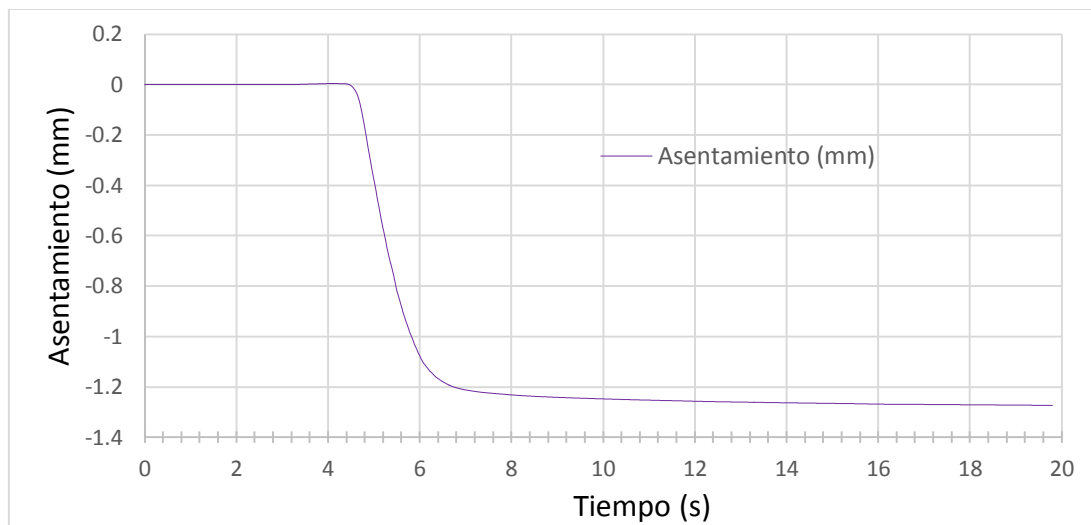


Figura 5.15 Asentamiento producido durante la segunda parte del ensayo

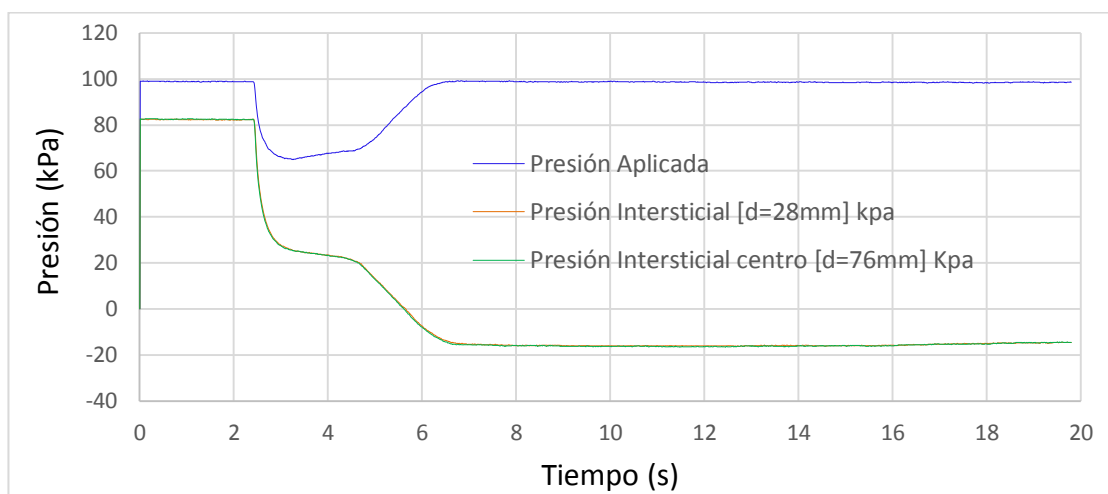


Figura 5.16 Caída de la presión intersticial con el drenaje abierto

Hay un pequeño tramo en el que la presión aplicada decae y luego vuelve a subir y a estabilizarse. Se debe a una apertura rápida de la válvula que permite el drenaje.

El asentamiento total es de -1,273 mm.

5.2.3.3 Determinación de c_h

Para el cálculo de c_h , necesitamos la curva del asentamiento en función del tiempo.

Vamos a utilizar el método de Casagrande. Casagrande propuso un método gráfico partiendo de los datos obtenidos del ensayo de consolidación realizado. En nuestro caso ha sido de consolidación radial hacia la periferia de la muestra utilizando la célula Rowe.

Se debe graficar la curva asentamiento vs logaritmo del tiempo (Figura 5.17).

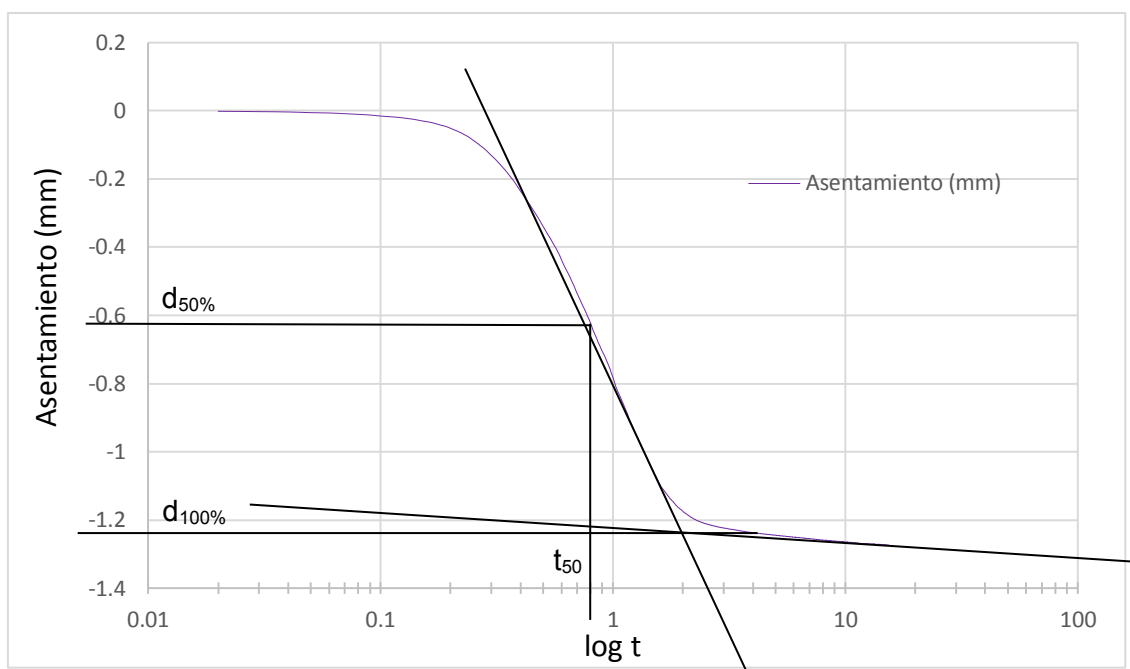


Figura 5.17 Determinación del t_{50} por el método de Casagrande

Vamos a determinar la deformación que corresponde al 100% de la consolidación primaria $d_{100\%}$. Es necesario extender la recta tangente a la parábola en el punto de inflexión y la recta tangente a los últimos puntos de la curva de consolidación. Ambas rectas se intersecan en un punto A cuya ordenada representa la deformación que corresponde al 100% de la consolidación primaria.

Finalmente, obtenemos el $d_{50\%}$, que es la mitad de del $d_{100\%}$.

$d_{100\%}$ es igual a -1,22 mm. Por lo tanto, el $d_{50\%}$ es igual a -0,62 mm. Por lo tanto el $t_{50} = 0,8$ segundos.

$$c_h = \frac{T_{r50} * r_c^2}{t_{50}} = \frac{0,06 * 0,076^2}{0,8} = 0,0004332 = 13661,4 \frac{\text{m}^2}{\text{año}}$$

Si utilizamos la formulación que aparece en la BS 1377-6 1990:

$$c_{ro} = \frac{0,026 * D^2}{t_{50}} = \frac{0,026 * 0,152^2}{0,8} = 0,000751 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} = 23679,75 \frac{\text{m}^2}{\text{año}}$$

Ahora vamos a calcular c_h utilizando el método de Taylor:

Para ello, en la Figura 5.18 vamos a dibujar la tangente inicial de la curva de consolidación, extendiéndola hasta ambos ejes. Llamamos A al punto de corte con el eje Y y B al punto de corte con el eje X.

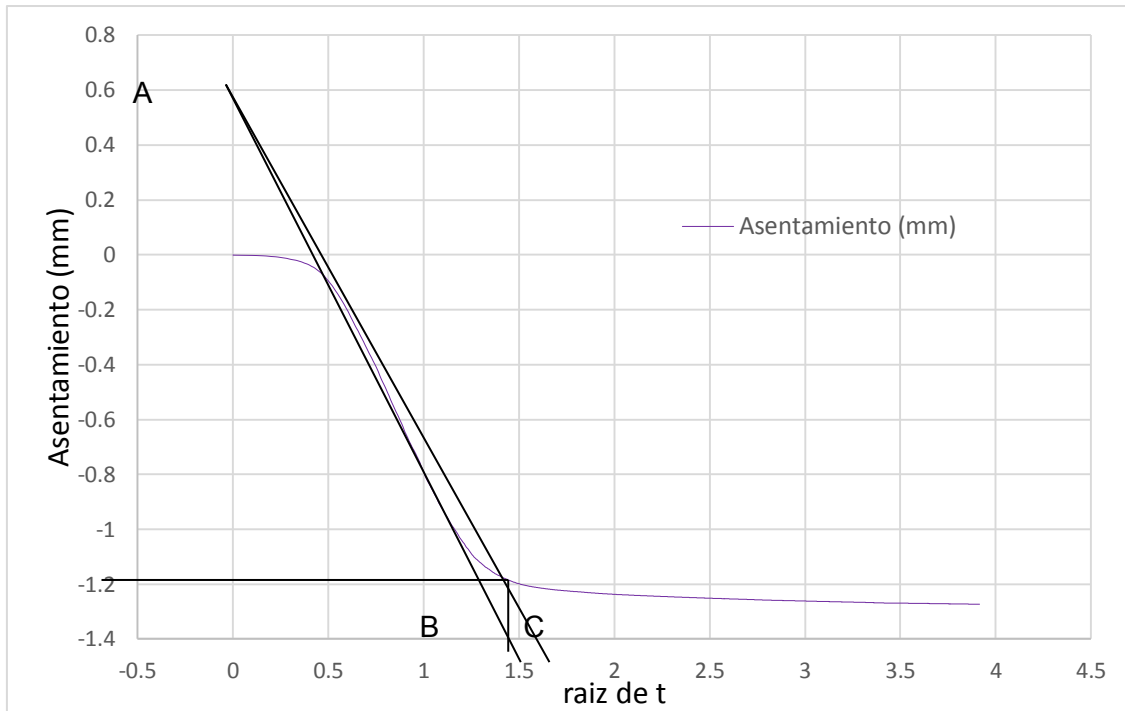


Figura 5.18 Determinación del t_{90} por el método de Taylor

B está a 1,4 segundos. Vamos a obtener el punto C que se encuentra a $1,15 \cdot B$ de distancia. $C = 1,61$ segundos.

El $d_{90\%} = -1,18$ mm (donde corta a la curva de consolidación la recta AC). Por lo tanto, el $t_{90} = 1,48$ segundos.

$$c_h = \frac{T_{r_{90}} \cdot r_c^2}{t_{90}} = \frac{0,34 \cdot 0,076^2}{1,48} = 0,00133 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} = 41845,71 \frac{\text{m}^2}{\text{año}}$$

5.2.3.4 Parte 3

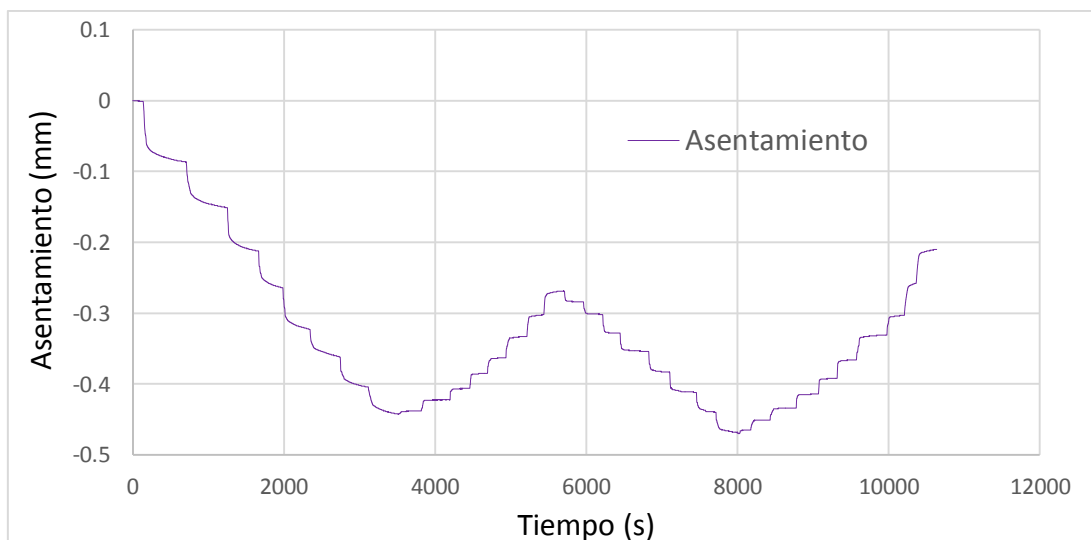


Figura 5.19 Asentamiento en los escalones de carga y descarga

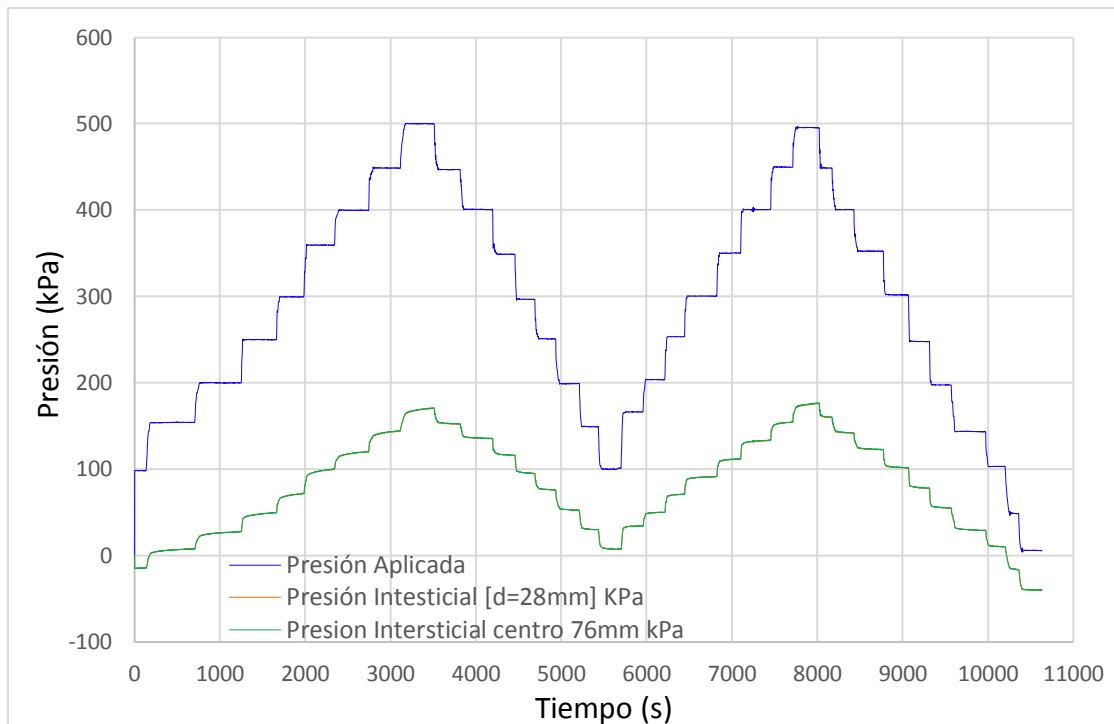


Figura 5.20 Escalones de presión, tanto aplicada como intersticial

5.2.4 Determinación de la permeabilidad en los ensayos drenados

La permeabilidad (Figuras 5.21 y 5.22) ha sido determinada acorde a la siguiente fórmula de la BS 1377-6 1990:

$$k_H = \frac{0,26q}{L[(p_1 - p_2) - p_c]} \log_e \left(\frac{D}{d} \right) R_t * 10^{-4}$$

Donde:

q: es el flujo medio de agua que sale de la muestra en mL/min.

L: Es la altura de la muestra en mm.

$(p_1 - p_2)$ es la diferencia entre la presión aplicada y la presión de salida en kPa.

p_c : es la presión perdida en sistema en kPa debido al flujo de agua.

R_t : es el factor corrector de temperatura para la viscosidad del agua.

D: es el diámetro de la muestra.

d: diámetro del dren central.

El caudal medio de salida de agua lo hemos determinado a partir del asentamiento. Es decir, hemos utilizado la expresión para obtener el volumen de un cilindro. Del cilindro que ocupaba la altura de agua que ha salido.

$$\text{Volumen de salida} = \pi r^2 * \text{Asentamiento}$$

Dividiendo el volumen de salida entre el intervalo de tiempo que ha tardado en salir, obtenemos el caudal de salida.

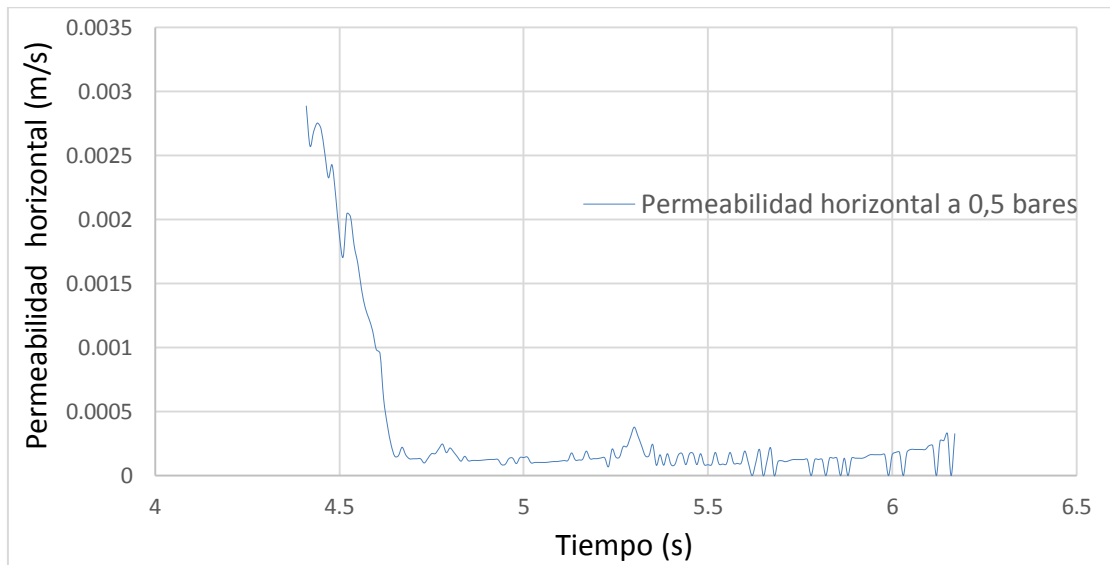


Figura 5.21 Variación de la permeabilidad horizontal durante la consolidación a 0,5 bares

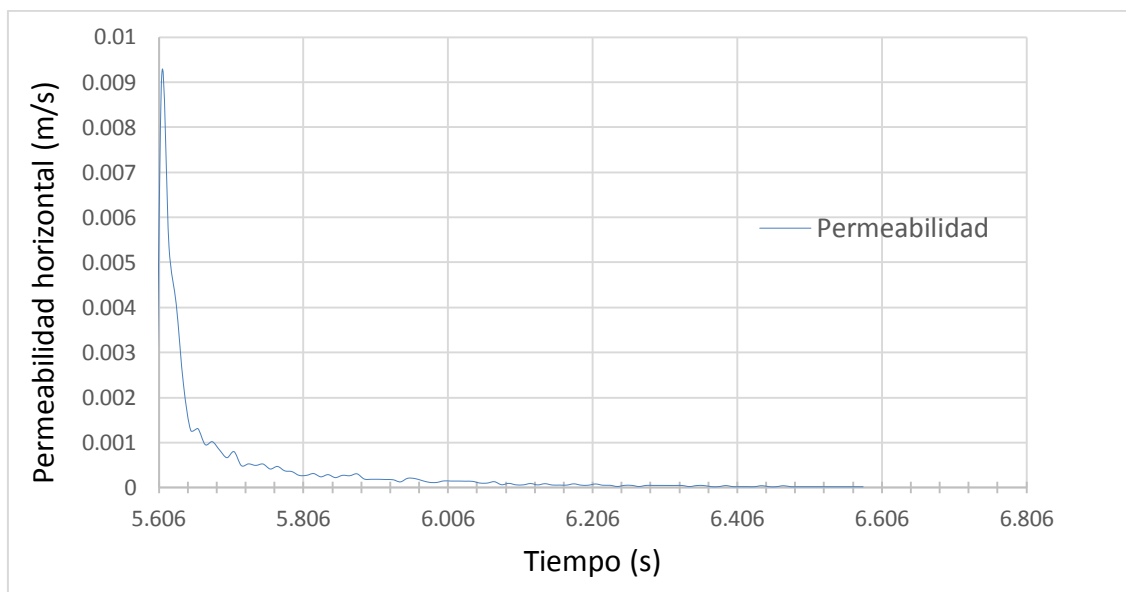


Figura 5.22 Variación de la permeabilidad horizontal durante la consolidación a 1 bar

5.2.5 Determinación de las curvas edométricas

5.2.5.1 Curva edométrica

Para obtener la curva edométrica (Figuras 5.23 a 5.28) necesitamos obtener el valor del índice de poros en cada instante. A su vez también necesitamos conocer la tensión efectiva en el centro de la base.

$$\frac{V}{V_0} = \frac{H}{H_0} = \frac{1 + e}{1 + e_0}$$

$$\frac{\Delta H}{H_0} = \frac{H_f - H_0}{H_0} = \frac{1 + e}{1 + e_0} = \frac{(1 + e_f) - (1 + e_0)}{(1 + e_0)} = \frac{e_f - e_0}{1 + e_0}$$

Para conocer la tensión efectiva en el centro de la base en cada instante, vamos a utilizar la siguiente formulación:

$$\sigma'_v = \sigma_t - u_{t \text{ en el centro}}$$

Para obtener el índice de poros en cada instante, utilizamos la siguiente expresión:

$$e = \frac{H_0 + H_t}{H_0} (1 + e_0) - 1$$

5.2.5.1.1 Ensayo drenado a 0,5 bares parte 1

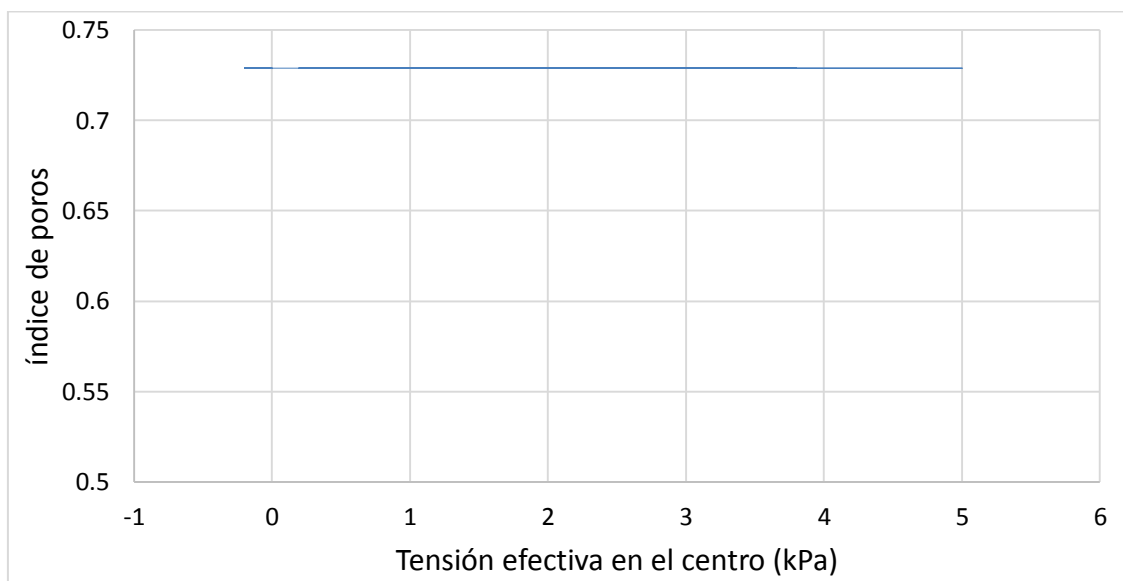


Figura 5.23 Curva edométrica ensayo drenado a 0,5 bares parte 1

5.2.5.1.2 Ensayo drenado a 0,5 bares parte 2

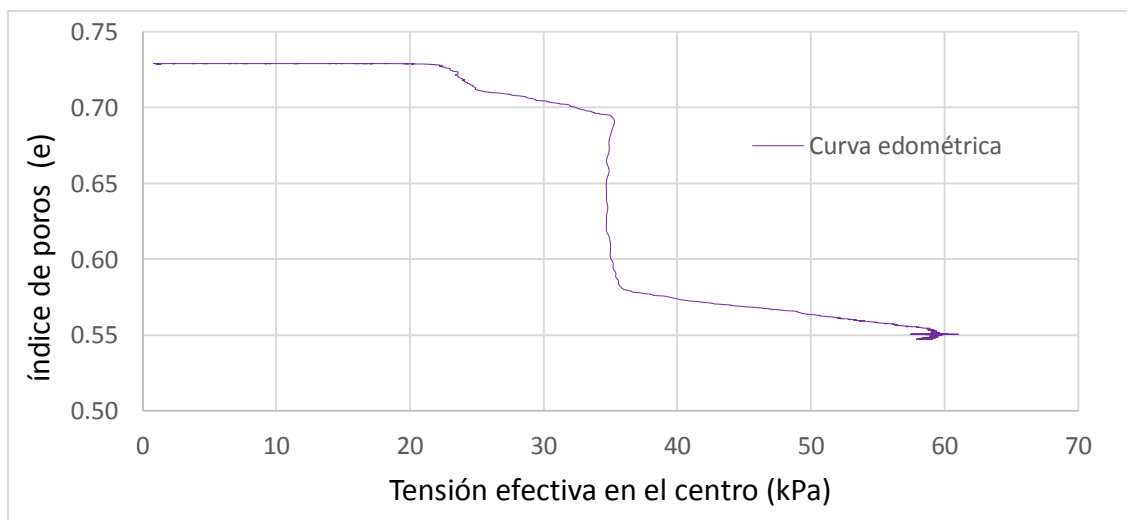


Figura 5.24 Curva edométrica ensayo drenado a 0,5 bares parte 2

5.2.5.1.3 Ensayo drenado a 0,5 bares parte 3

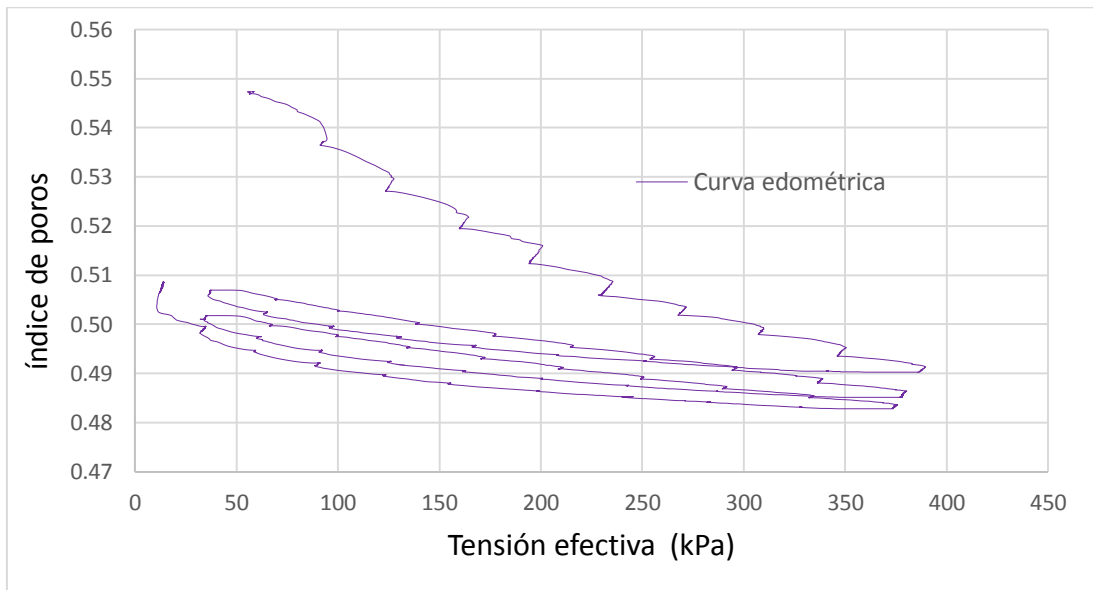


Figura 5.25 Curva edométrica ensayo drenado a 0,5 bares parte 3

5.2.5.1.4 Ensayo drenado a 1 bar Parte 1

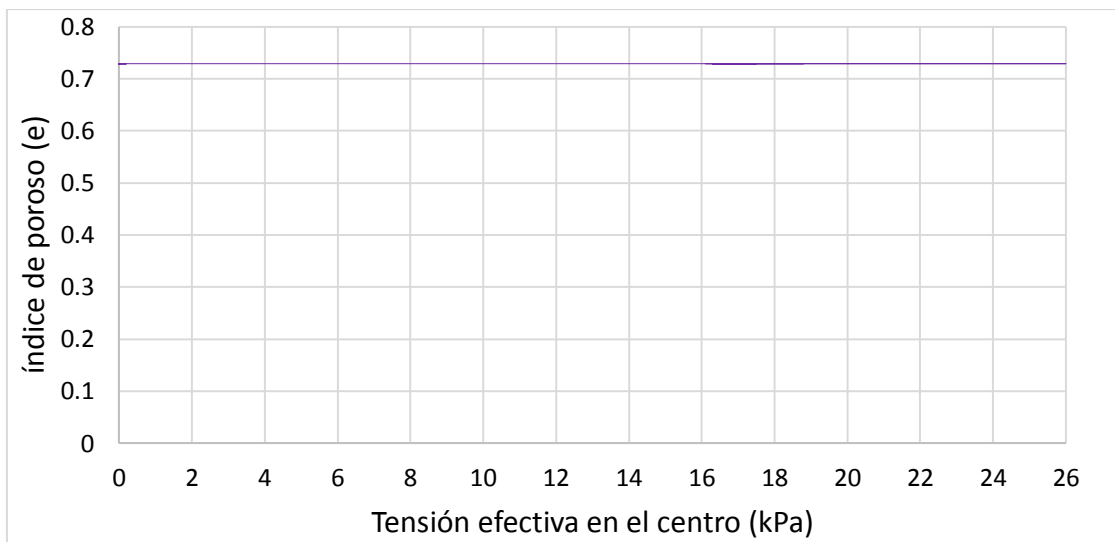


Figura 5.26 Curva edométrica ensayo drenado a 1 bar parte 1

5.2.5.1.5 Ensayo drenado a 1 bar Parte 2

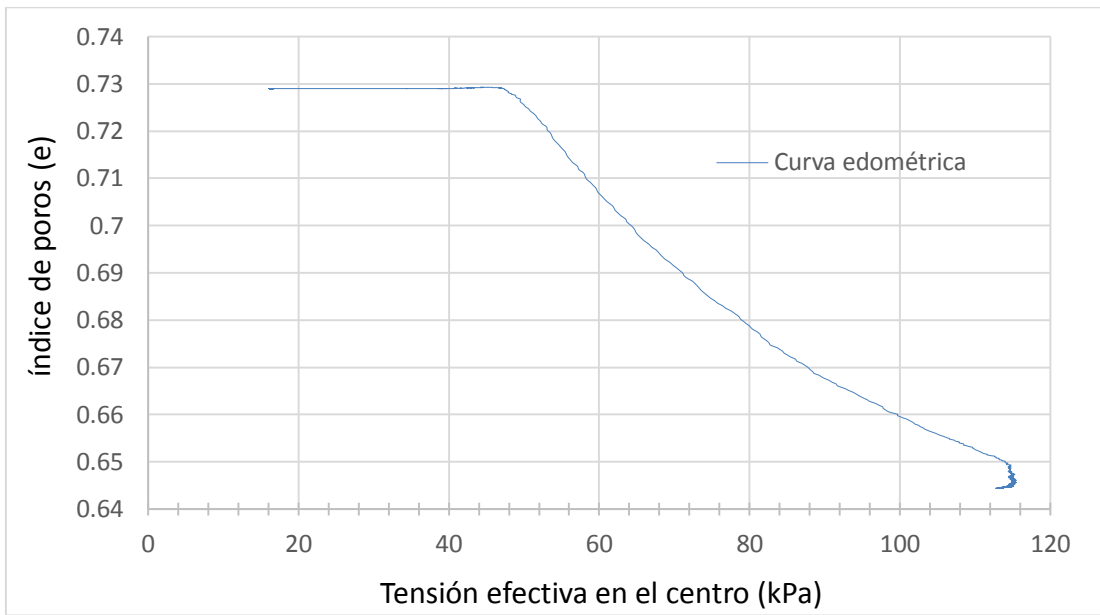


Figura 5.27 Curva edométrica ensayo drenado a 1 bar parte 2

5.2.5.1.6 Ensayo drenado 1 bar parte 3

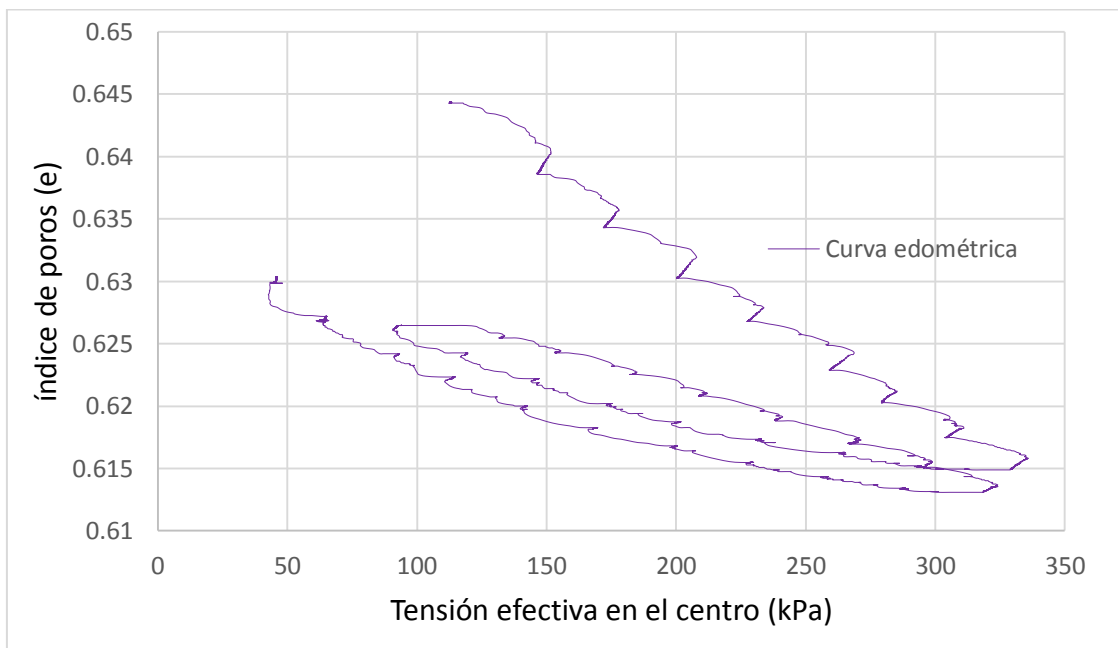


Figura 5.28 Curva edométrica ensayo drenado a 1 bar parte 3

5.2.6 Fotos realizadas durante el ensayo no drenado

A continuación, se muestran una serie de fotos (Figuras 5.29 a 5.34) tomadas durante el ensayo no drenado.

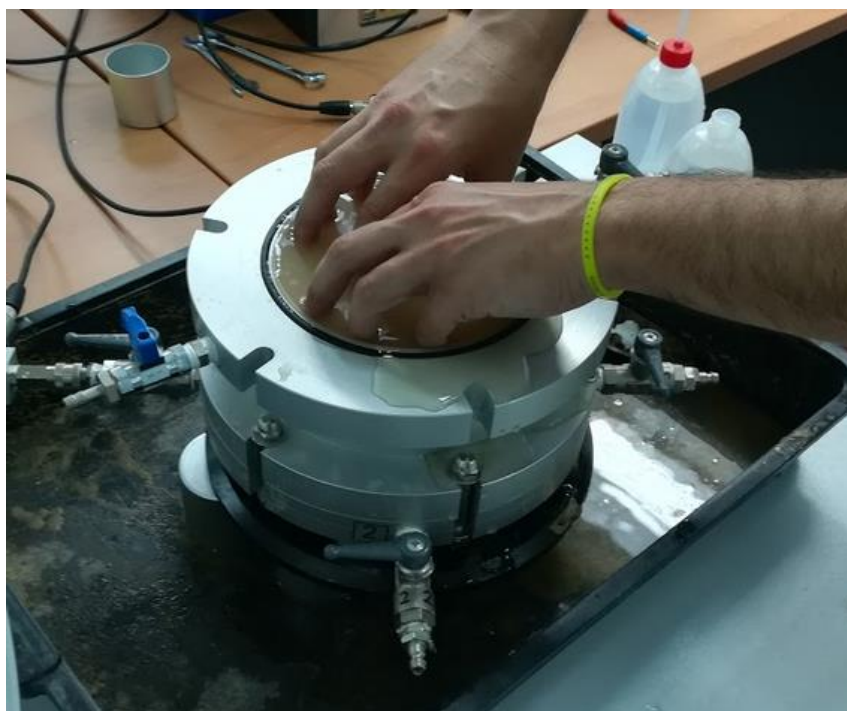


Figura 5.29 Colocación de la muestra de arena suelta

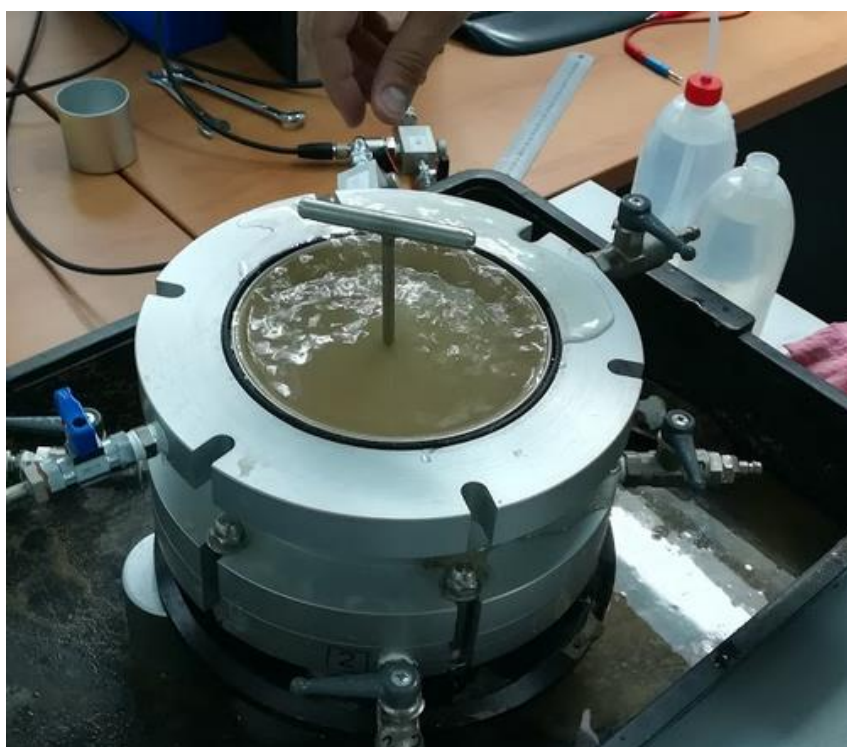


Figura 5.30 Colocación de los discos rígidos

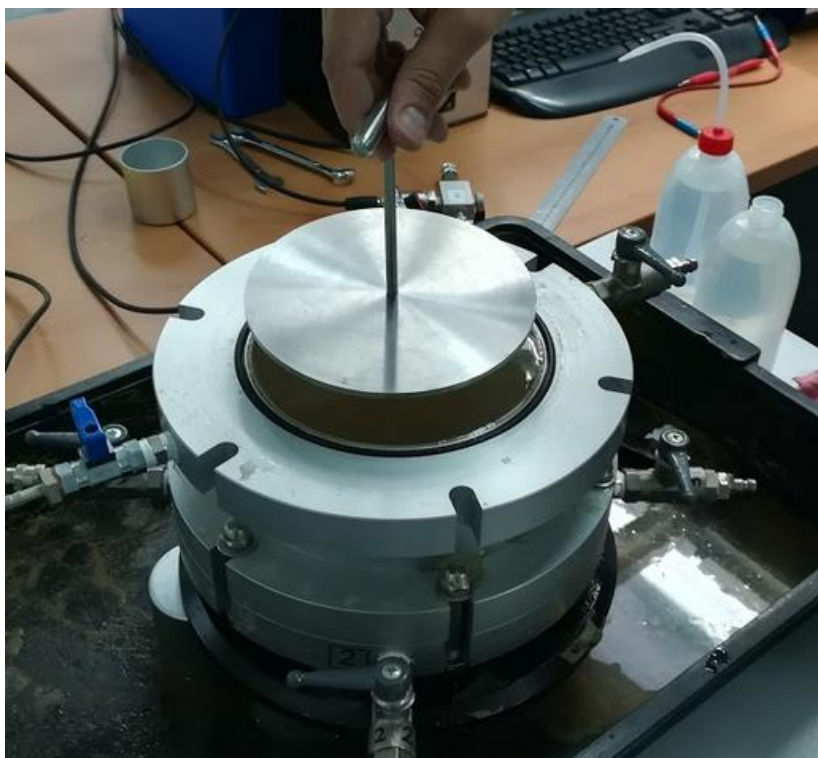


Figura 5.31 Colocación del disco rígido superior



Figura 5.32 Colocación del diafragma

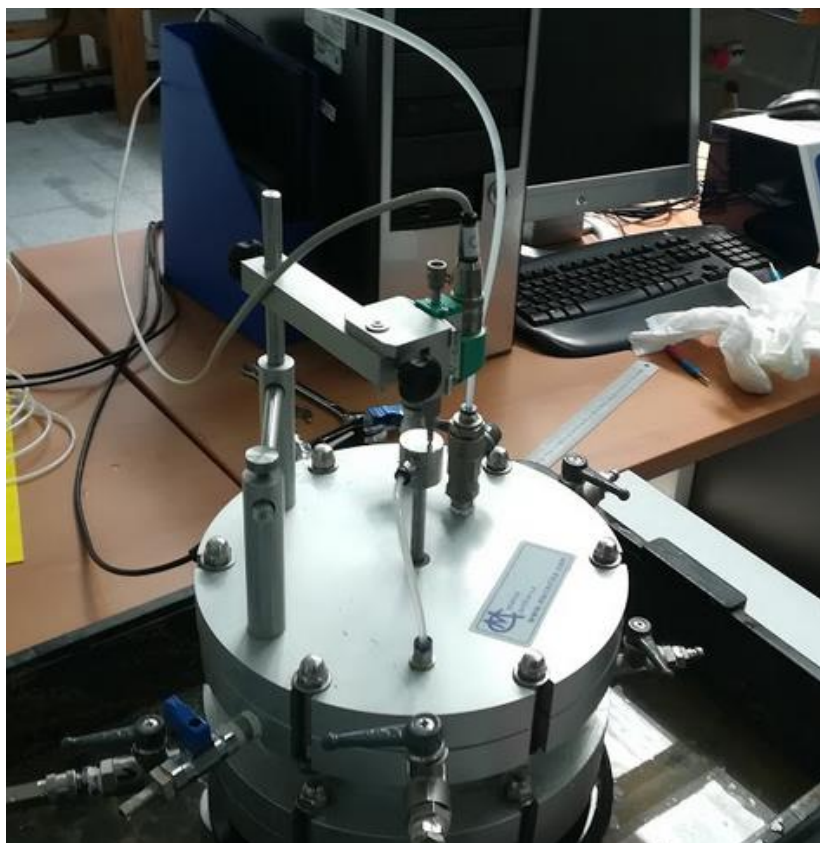


Figura 5.33 Deformímetro conectado a CH3



Figura 5.34 Registro de datos en módulo Cyber-Plus Evolution

5.2.7 Fotos realizadas durante el ensayo drenado a 0,5 bares

A continuación, se muestran una serie de fotos (Figuras 5.35 y 5.36) tomadas durante el ensayo drenado a 0,5 bares.



Figura 5.35 Colocación de la muestra para el ensayo

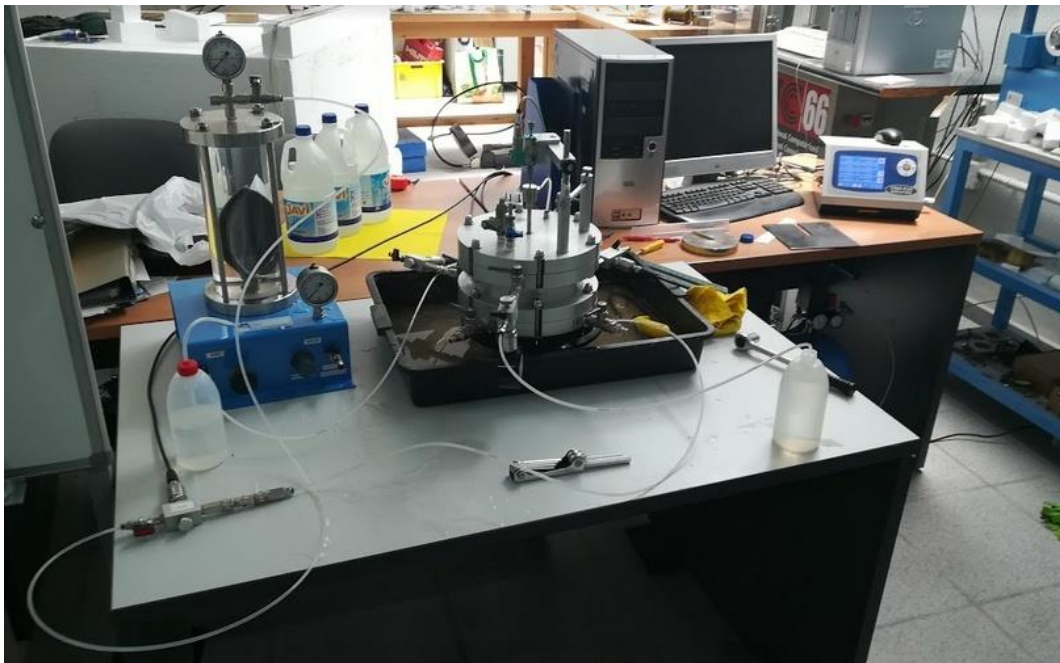


Figura 5.36 Montaje listo para realizar el ensayo

5.2.8 Fotos realizadas durante el ensayo drenado a 1 bar

A continuación, se muestran una serie de fotos (Figuras 5.37 y 5.40) tomadas durante el ensayo drenado a 1 bar.

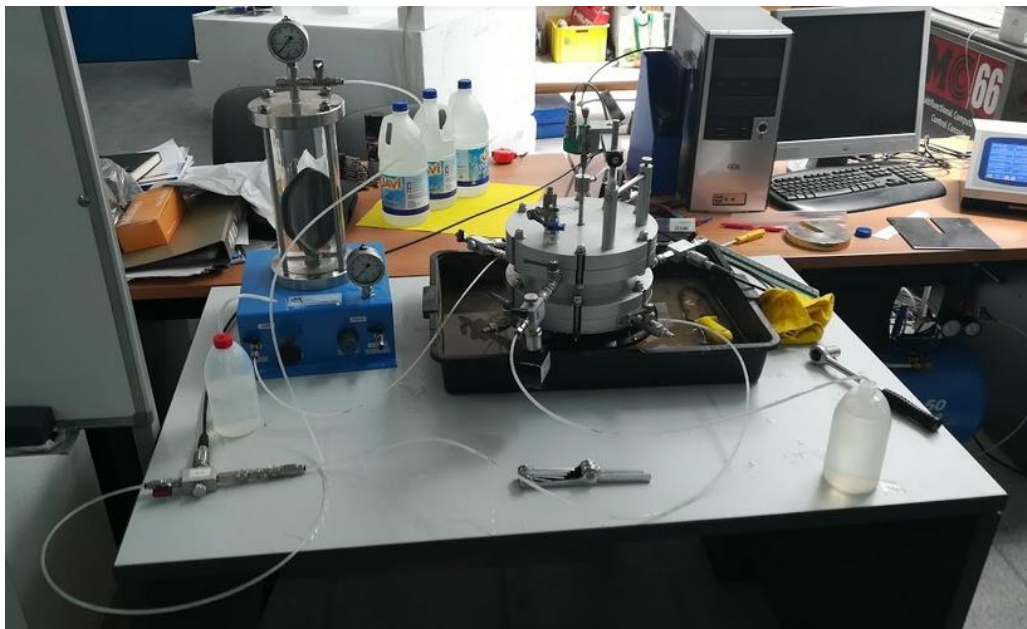


Figura 5.37 Montaje preparado para la realización del ensayo



Figura 5.38 Muestra colocada en el interior de la Célula Rowe



5.39 Muestra completamente saturada, antes de colocar la cubierta

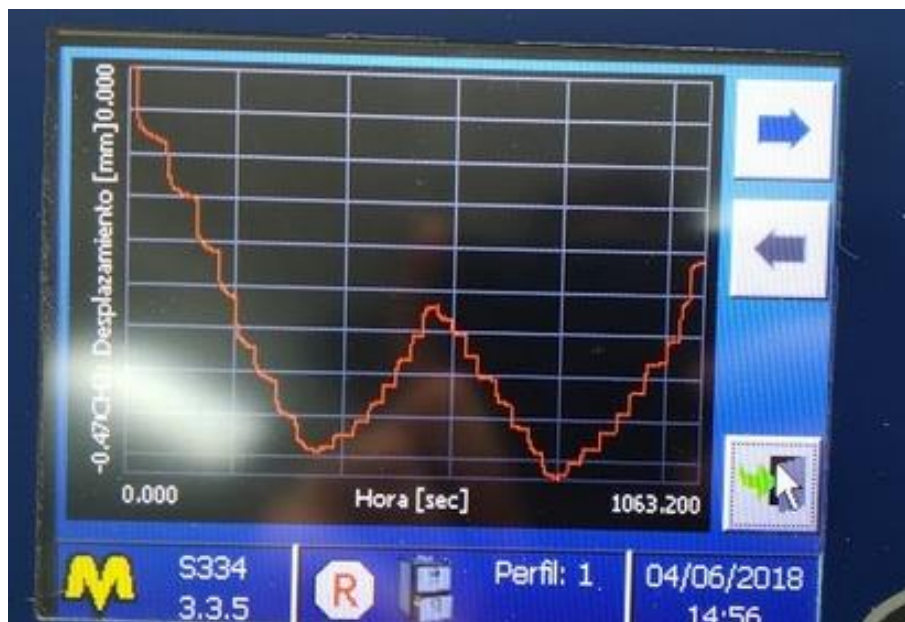


Figura 5.40 Asentamientos en la tercera fase en el módulo Cyber-Plus Evolution

6 Análisis y discusión de resultados

En este capítulo se procede a analizar y comentar los resultados que se han obtenido de los tres ensayos descritos anteriormente, realizados sobre una muestra de arena suelta.

6.1 Ensayo no drenado

Del ensayo no drenado podemos decir que los resultados son los esperados. No ha habido asentamiento (Figura 5.2), puesto que el caudal de salida de agua por drenaje era nulo. Además, las presiones intersticiales en los dos puntos de medida eran exactamente iguales entre sí e iguales a la presión aplicada por el diafragma (Figura 5.3).

6.2 Ensayo drenado a 0,5 bares

En la primera parte de este ensayo, no hay nada que destacar. Al no haber drenaje, en el tramo de subida de presión de 0 a 0,5 bares, no hay asentamiento (Figura 5.4). La presión aplicada es igual a la presión intersticial en los dos puntos de medida (Figura 5.5).

Durante la segunda parte del ensayo, ocurre un fenómeno que cabe comentar. Y es que la presión total aplicada decae (tras la apertura del drenaje), volviendo a estabilizarse transcurridos unos 5 segundos (Figura 5.7). Este fenómeno puede deberse a que la muestra ha sido sometida previamente a un escalón de carga sin permitir el drenaje. También puede deberse al tiempo de apertura de la válvula de drenaje, que ha sido inmediato. La explicación más probable de esta bajada y posterior subida de la presión aplicada se deba a la inercia del sistema y, quizá, a las características y propiedades del equipo de presión.

Al haber caudal de salida durante esta parte, se produce asentamiento, cuyo transitorio dura unos 20 segundos y es de -2,732 mm (Figura 5.6). También cabe destacar que se observa un retraso del inicio del asentamiento con respecto a la caída de la presión intersticial. Éste fenómeno puede deberse a los siguientes factores:

- Los granos soportan la carga, es decir, asumen la tensión. Pero la compresión no tiene lugar hasta cierto tiempo después. Los granos soportan la carga a través de sus puntos de contacto, pero colapsan (con cierto retraso) debido al desgaste de los mismos.
- Debido a la rapidez del proceso. El desgaste anteriormente descrito precisa un determinado umbral de tiempo para producirse.
- Debido al hecho de la bajada y posterior subida de la presión total aplicada por el diafragma. Se observa que hasta que no se empieza a recuperar el valor la presión aplicada, no se manifiesta el asentamiento.

La presión intersticial va cayendo hasta llegar a valores cercanos a cero (Figura 5.7).

En la tercera parte de este ensayo, se puede observar que la muestra arenosa es capaz de absorber (o soportar) parte de la presión aplicada (Figura 5.12), a pesar de

encontrarnos en condiciones no drenadas. Por lo tanto, el incremento de tensión total aplicada en éste caso no es igual al incremento de presión intersticial, si no que la arena soporta parte de ese incremento de tensión en forma de tensión efectiva.

Aunque no haya drenaje, en los periódicos escalones de subida y bajada de presión de 0,5 a 5 bares, si se registra un ligero asentamiento (Figura 5.11) que va desde -2,732 mm a -3,314 mm.

6.3 Ensayo drenado a 1 bar

En las tres partes de este ensayo, ocurre lo mismo que en el ensayo drenado a 0,5 bares, pero con valores diferentes. La primera parte está representada por las Figuras 5.13 y 5.14, la segunda por las Figuras 5.15 y 5.16 y la tercera por las Figuras 5.19 y 5.20.

En la segunda parte, el asentamiento es de -1,273 mm (Figura 5.15). En la tercera parte, correspondiente a escalones de carga y descarga periódicos en condiciones no drenadas, pasa de -1,273 a -1,483 mm (Figura 5.19).

6.4 Propiedades del suelo obtenidas de los ensayos con la célula de Rowe

A la vista de los valores obtenidos, se puede inferir que los resultados para las distintas propiedades geotécnicas del suelo son coherentes. Con ello, podemos afirmar que los ensayos han sido realizados correctamente, aplicando adecuadamente los procedimientos descritos en la Norma BS 1377 6, así como las fórmulas en ella propuestas.

En relación al coeficiente de consolidación horizontal (o radial), c_h , se han obtenido valores en torno a 10.000 m²/año (orden de magnitud), los cuales, tratándose de una arena que apenas ha tardado 10-20 segundos en consolidar en laboratorio, son completamente correctos. Recordemos que el c_h para una arcilla suele encontrarse, habitualmente, en el orden de magnitud de 1 m²/año; cuando éstas suelen tardar en consolidar 24 horas en el laboratorio, es decir, unas 10.000 veces más que la arena ensayada.

En relación a la permeabilidad horizontal, k_h , se han obtenido valores para la misma del orden de magnitud de 0,001 m/s. Como previmos a partir de la curva granulométrica de la arena, los valores de la permeabilidad podían oscilar entre 0,0003 y 0,0007 m/s, de manera que los valores obtenidos con la célula de consolidación hidráulica de Rowe son coherentes.

El comportamiento observado del asentamiento, tanto en condiciones drenadas como en condiciones no drenadas, es también coherente con el tipo de suelo ensayado (arenas).

Por todo ello, concluimos que los ensayos realizados con la célula de Rowe, así como la determinación de los parámetros geotécnicos de interés, desde el punto de vista de la consolidación de suelos, han sido satisfactorios.

7 Conclusiones y comentarios finales

1. La teoría de consolidación ha sido revisada, tanto para consolidación unidimensional como para consolidación radial. A su vez, ha sido revisada la norma UNE 103-405-94 para la realización de ensayos de consolidación unidimensional.
2. La célula Rowe ha sido correctamente montada, tras familiarizarnos con todas las piezas de las que se compone. En primer lugar se comprobó que estaban todas las piezas necesarias, aprendiendo cuáles eran sus funciones principales. En segundo lugar, se comprobó que el equipo de presión funcionaba correctamente (aprendiendo a manipularlo convenientemente) y se añadió un racor macho-macho que nos permitió intercalar un transductor de presión intersticial a la salida del equipo de presión para medir y registrar la presión aplicada por el diafragma a la muestra de estudio.
3. La norma BS 1377-6 1990 ha sido leída y comprendida para, posteriormente, traducir al castellano las partes más relevantes para nuestro trabajo, quedando reflejadas en esta memoria. Nos ha servido como base para realizar los primeros ensayos y para comprender el funcionamiento y la utilidad de la célula de consolidación hidráulica.
4. La célula Rowe ha sido puesta a punto, con dos ensayos de previos de comprobación. El primero para comprobar su estanqueidad y el segundo para observar su comportamiento con muestras arcillosas.
5. Se ha sintetizado, en una especie de guía, la forma en la que se ha de proceder para utilizar la célula Rowe. Tanto desde el punto de vista de conocer todas las partes que la integran como desde el punto de vista de su funcionamiento. También se hace referencia a las distintas normativas necesarias para la realización completa y correcta de los ensayos.
6. Se han realizado 3 ensayos sobre una arena suelta, tanto en condiciones drenadas (drenaje radial exterior) como no drenadas, analizando de forma exhaustiva la variación de las presiones intersticiales en el interior de la muestra y los asentamientos observados.
7. A su vez, estos ensayos han servido para determinar las principales propiedades geotécnicas de interés desde el punto de vista de la consolidación radial, como son la permeabilidad horizontal, el coeficiente de consolidación radial y las curvas edométricas que relacionan el índice de poros con la tensión efectiva.
8. La puesta en funcionamiento de la célula de consolidación hidráulica de Rowe-Barden ha sido realizada con éxito.

8 Referencias

- Barron, R.A. Consolidation of fine grained soils by drain wells. *Transactions of the ASCE*, 113, 718-742 (1948)
- Carrillo, N. Simple two and three dimensional cases in the theory of consolidation of soils. *Journal of Mathematics and Physics*, 21(1), 1, 1-5 (1942)
- Iglesias Pérez, C. *Mecánica del suelo*. Madrid: Ed. Síntesis (1997)
- McKinlay, D.G. A laboratory study of rates of consolidation in clays with particular reference to conditions of radial pore water drainage. *Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris*, 1, 225-228 (1961)
- Reid, D. y Berry, P.L. *Mecánica de suelos*. Department of Civil Engineering, University of Salford: McGRAW-HILL (2000)
- Rendulic, L. *Der hydrodynamische spannungsausgleich in zentral entwässerten Tonzylindern*. Doctoral dissertation, Fanto (1935)
- Scott, R.F. *Principles of Soils Mechanics*. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts (1963)
- Standard, B. *1377 Methods of test for soils for civil engineering purposes*. British Standards Institution, London (1990)
- Taylor, D.W. *Fundamentals of Soil Mechanics*. New York: JOHN WHILEY & SONS, INC.(1960)
- Terzaghi K. Die Berechnung der Durchlässigkeitszifferdes tones aus dem verlauf der hydrodynamischen spannungserscheinungen. *Akademie der Wissenschaften in Wien*, Technical report II a, 132 N 3/4, 125-138. Sitzungsberichte Mathnaturwiss Klasse Abt (1923)
- UNE 103-302-94. Determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo
- UNE 103-405-94. Ensayo de consolidación unidimensional de un suelo en edómetro