

## **LABORATORIO 3: CONSOLIDACIÓN**

### **1. Ensayo de Consolidación**

#### **Introducción**

La integridad de la mayoría de las obras en la ingeniería civil se encuentra sujeta, entre otros factores, a su serviciabilidad, seguridad y estabilidad. Cuando se habla de los estados límites de serviciabilidad de una estructura, se hace referencia al valor límite de hundimiento, o asentamiento, a partir del cual se provocará un nivel de daño determinado. A modo de ejemplo, algunos autores apuntan que, para un edificio habitacional, un asentamiento total de entre 50 a 75 [mm] en arenas, provoca una falla en la conexión de alcantarillado; o bien, un asentamiento diferencial de entre 1/150 a 1/250 provoca daño estructural en sus elementos. Así, es necesario conocer y prever los asentamientos del suelo ante obras que se planeen ejecutar, realizando diseños ingenieriles capaces de incluir esta problemática, y analizar soluciones.

Es posible dividir los asentamientos en tres grandes categorías: 1) asentamientos instantáneos, 2) primarios, y 3) secundarios. Los asentamientos instantáneos se evidencian principalmente en suelos granulares y se asocian a la elasticidad del material. Se denotan como asentamientos elásticos. Los asentamientos primarios, y secundarios, se evidencian, principalmente, en suelos finos. El asentamiento primario se asocia al cambio de volumen de un suelo por la disipación del exceso de presión de poros en el tiempo debido a una sobre carga. El asentamiento secundario tiene lugar a una reorganización de la matriz y su desarrollo conlleva más tiempo.

Esto, sumado a otros desafíos interesantes en la ingeniería, motiva el estudio de los asentamientos mediante variados ensayos, siendo uno de los más populares el de consolidación unidimensional. El ensayo de consolidación busca determinar la tasa y magnitud de la consolidación del suelo bajo deformación lateral restringida, en condición drenada bajo la acción de una carga axial controlada.

En este contexto, esta guía establece el procedimiento para llevar a cabo este ensayo de laboratorio y el posterior manejo y desarrollo de datos.

#### **1.1. Montaje experimental**

Para la realización de este ensayo se requieren los siguientes implementos:

- Consolidómetro o edómetro.
- Diales.
- Equipo de cargas.
- Cronómetro.
- Elementos necesarios para el moldeo de la muestra.

- Suelo.
- Agua destilada.



Figura 1: Consolidómetro.

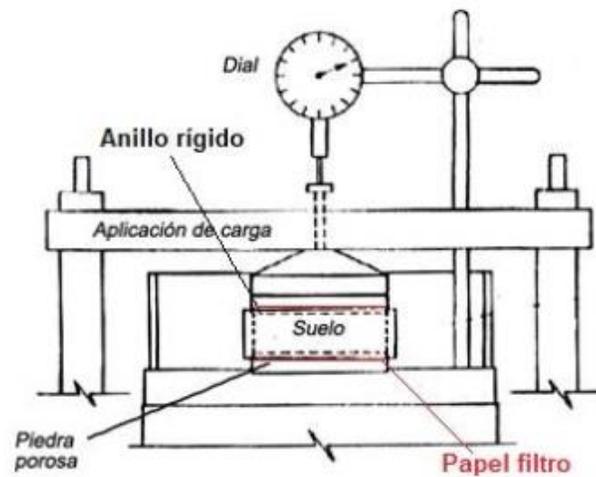


Figura 2: Montaje experimental ensayo de consolidación.

## 1.2. Procedimiento experimental

### 1.2.1. Probeta tallada

- Se pesa el anillo rígido a utilizar.
- Sobre una muestra de suelo inalterado, se talla una probeta con ayuda del anillo rígido y un cuchillo cartonero (Figura 3).
- Se pesa la probeta de suelo más anillo rígido.
- Sobre el plato de carga, se monta una piedra porosa, un papel filtro, la probeta con el anillo rígido, un papel filtro y nuevamente una piedra porosa en el tope.
- Se instala el dial y se ajusta el pistón de carga.
- La probeta se satura desde abajo hacia arriba permitiendo el escape de aire.
- Se aplican incrementos de carga según solicite el mandante y se toman las lecturas de deformación para tiempos dados. Se recomienda tomar suficientes medidas durante la etapa inicial de carga para verificar la consolidación primaria.
- Alcanzado el máximo incremento de carga, se ejecuta un proceso de descarga siguiendo las mismas instrucciones de toma de datos.
- Del material de suelo sobrante, se selecciona una muestra y se seca en horno para la obtención de la humedad.
- De forma análoga, del mismo material excedente se toma una muestra para someterla al ensayo de Gs.

### 1.2.2. Probeta remoldada

- Se siguen los mismos pasos descritos en 1.2.1 pero en lugar de tallar una probeta, se construye con el material excedente resguardando conseguir la misma densidad de la muestra tallada.



Figura 3: Tallado de probeta (izq.) y material de molde (der.)

## 2. Trabajo de Gabinete

### 2.1 Obtención de gráficos

A continuación, se detallan los pasos principales para la obtención de los gráficos enseñados en la de resultados:

- Obtener los índices de vacíos y deformación vertical final para cada nivel de esfuerzos.
- Graficar el índice de vacíos versus el esfuerzo vertical efectivo en escala logarítmica (Figura 7).
- Graficar la deformación vertical versus el esfuerzo vertical efectivo en escala lineal (Figura 7).
- Obtener los coeficientes  $C_c$ ,  $C_r$ ,  $m_v$  y  $m_{vr}$ .
- Determinar el coeficiente de consolidación  $C_v$  utilizando los métodos de Casagrande (Figura 4) y Taylor (Figura 5), que se describen en la siguiente sección.

### 2.2 Determinación del Coeficiente de Consolidación

#### 2.2.1 Método de Casagrande

En el gráfico deformación vertical versus  $\log(t)$  (Figura 4):

1. En la parte inicial parabólica de la curva marcar  $t_1$  (si la parte inicial no es parabólica, utilizar  $D_0$  asociado a  $t=0$  y seguir en el paso 4).
2. Marcar  $t_2 = 4t_1$ . Definidos  $t_1$  y  $t_2$ , ellos determinan sobre la curva la distancia vertical  $\Delta$ .
3. Dibujar la distancia  $2\Delta$  y encontrar  $D_0$  en el eje de las ordenadas.
4. Dibujar la proyección horizontal del final de la curva de deformación e intersectarla con el eje de las ordenadas, punto que define  $D_{100}$ .
5. Encontrar  $D_{50}$ , como la distancia promedio entre  $D_0$  y  $D_{100}$  en el eje de las ordenadas.
6. Proyectar  $D_{50}$  en la curva de deformación y encontrar  $t_{50}$  en el eje de las abscisas.
7. Finalmente, con la Ecuación 9, es posible determinar  $C_v$ .

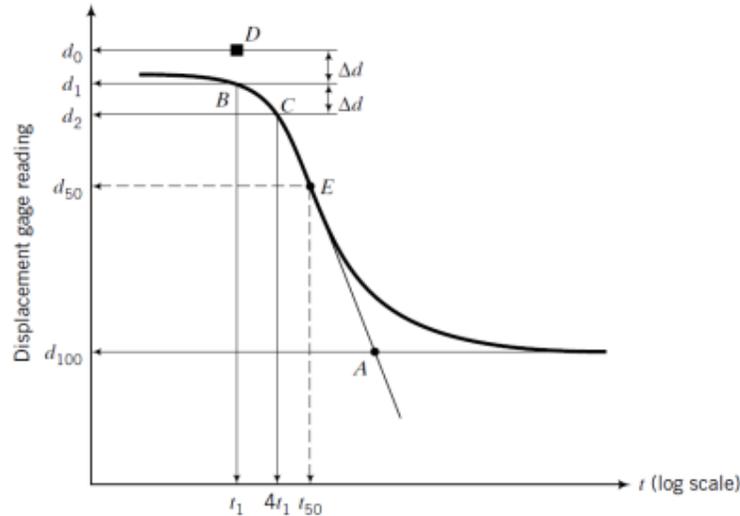


Figura 4: Método de Casagrande para la determinación de  $C_v$  (Budhu, 2011).

### 2.2.2 Método de Taylor

En el gráfico deformación vertical versus raíz cuadrada del tiempo (Figura 5):

1. Trazar la mejor recta que pasa por los primeros puntos del gráfico.
2. La intersección entre la recta definida en 1 con el eje de las abscisas define una distancia "A".
3. Definir en el eje de las abscisas el punto B distanciado del origen en  $1.15A$ .
4. Unir el punto O y B.
5. La intersección de esta recta con la curva define el valor en el eje de las abscisas.
6. Con este valor de  $t_{90}$  calcular el coeficiente de consolidación con la Ecuación 9.

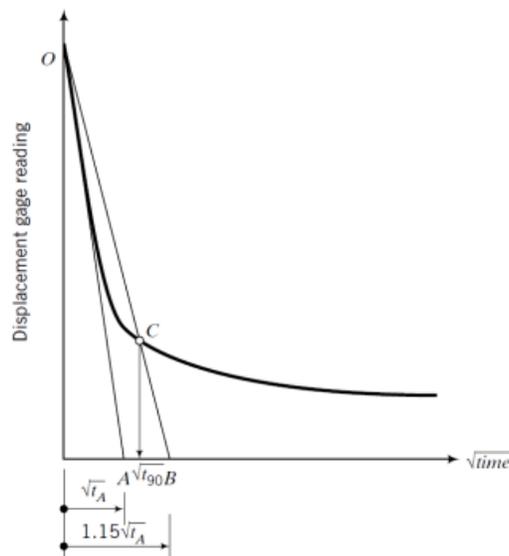


Figura 5: Metodología de Taylor para estimar el coeficiente de consolidación (Budhu, 2011).

## 2.3 Determinación del esfuerzo de Preconsolidación

### 2.3.1 Método de Casagrande (1936).

En el gráfico índice de vacíos versus esfuerzo efectivo (escala logarítmica) (Figura 6):

1. Identificar el punto de máxima curvatura, punto D, al inicio de la curva.
2. Dibujar una línea horizontal a través de D.
3. Dibujar una línea tangente a la curva en D.
4. Bisectar el ángulo formado por la recta tangente y la línea horizontal en D.
5. Extender hacia arriba la porción recta de la curva, BA, hasta intersectar la bisectriz en F.
6. La abscisa de F es el esfuerzo máximo de preconsolidación.

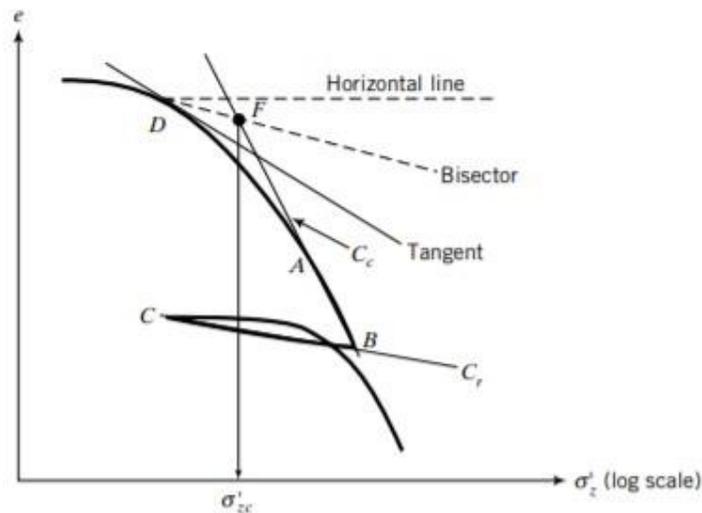


Figura 6: Metodología de Casagrande para determinar el máximo esfuerzo de preconsolidación (Budhu, 2011)

## 2.4 Fórmulas

### 2.4.1 Peso específico seco de la muestra, $\gamma_d$ [ $g/cm^3$ ]

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + \omega} \quad (1)$$

$\gamma_h$ : Peso específico húmedo de la muestra [ $g/cm^3$ ]

$\omega$ : Contenido de humedad [%]

### 2.4.2 Volumen de sólidos, $V_s$ [ $cm^3$ ]

$$V_s = \frac{\gamma_d \cdot V_0}{G_s \cdot \gamma_w} \quad (2)$$

$G_s$ : Gravedad específica [-]

$V_0$ : Volumen de la probeta [ $cm^3$ ]

$\gamma_w$ : Peso específico del agua [ $g/cm^3$ ]

### 2.4.3 Altura de sólidos, $H_s$ [cm]

$$H_s = \frac{V_s}{A} \quad (3)$$

A: Área transversal de la muestra [ $cm^2$ ]

### 2.4.4 Índice de vacíos en la etapa i, $e_i$ [-]

$$e_i = \frac{H_i - H_s}{H_s} \quad (4)$$

$H_i$ : Altura de la muestra en la etapa i [cm]

### 2.4.5 Variación de la altura de la muestra, $\Delta H$ [cm]

$$\Delta H = d - d_0 - d_a \quad (5)$$

d: Deformación de la muestra [cm]

$d_0$ : Deformación inicial de la muestra [cm]

$d_a$ : Corrección por deformación del aparato [cm]

### 2.4.6 Altura de la muestra en la etapa i, $H_i$ [cm]

$$H_i = H_0 - \Delta H \quad (6)$$

$H_0$ : Altura inicial del suelo [cm]

### 2.4.7 Deformación vertical de la muestra, $\varepsilon$ [-]

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (7)$$

#### 2.4.8 Módulo de compresibilidad de la muestra, $m_v$

$$m_v = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_0}{\sigma'_i - \sigma'_0} \quad (8)$$

$\varepsilon_i$ : Deformación unitaria en la etapa  $i$  [-].

$\sigma'_i$ : Esfuerzo vertical efectivo en la etapa  $i$  [ $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ]

#### 2.4.9 Coeficiente de consolidación, $C_v$ [ $\text{cm}^2/\text{s}$ ]

$$C_v = \frac{T \cdot (H_D)^2}{t} \quad (9)$$

En la Ecuación 9,  $T$  es el factor adimensional de tiempo, para el método de Casagrande usar  $T = 0.197$  correspondiente a una consolidación del 50 %. Si se utiliza el método de Taylor, usar  $T = 0.848$  correspondiente a una consolidación del 90 %.  $H_D$  es la longitud de la vía de drenaje, para muestras con drenaje inferior y superior, usar la mitad del largo de la muestra; para drenaje por un solo lado, utilizar el largo total de la muestra, para ese incremento de carga.  $t$  es el tiempo correspondiente al grado de saturación requerido por el método, para Casagrande utilizar  $t_{50}$  y para Taylor  $t_{90}$  [s].

#### 2.4.10 Índice de compresibilidad del suelo normalmente consolidado (o preconsolidado)

$$C_c \text{ (ó } C_r) = \frac{e_i - e_0}{\log\left(\frac{\sigma'_i}{\sigma'_0}\right)} \quad (10)$$



### 3. Resultados Esperados

El informe de laboratorio debe contener:

- Gráfico de índice de vacíos vs esfuerzo vertical efectivo (Figura 7 a).
- Gráfico de índice de vacíos vs esfuerzo vertical efectivo en escala logarítmica (Figura 7 b).
- Gráfico de deformación vertical vs esfuerzo vertical efectivo (Figura 7 c).
- Cálculo de  $C_c$ ,  $C_r$ ,  $m_v$  y  $m_{vr}$ .
- Cálculo de  $C_v$  con sus dos métodos y desarrollo.
- Cálculo del esfuerzo de preconsolidación para la curva de índice de vacíos vs presión efectiva.

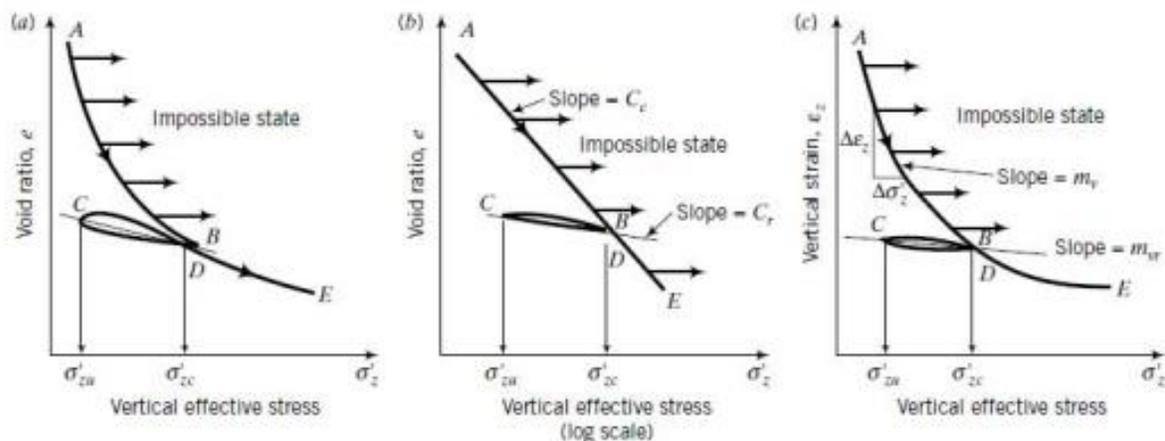


Figura 7: Gráfico  $e$  vs  $\sigma'$ ,  $e$  vs  $\sigma'$  escala semi logarítmica y  $\epsilon$  vs  $\sigma'$  (Budhu, 2011).

### 4. Referencias

- [1] ASTM D15577.(2011). Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. <http://www.astm.org>
- [2] BRAJA M. DAS. (2008). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica
- [3] BUDHU, MUNI. (2010). Soil Mechanics and Foundation. John Wiley Sons.
- [4] E. BOWLES, J. (1980). Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil, Bogotá: McGraw Hill.
- [5] KARL TERZAGHI, R.B. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley Sons.