

# GUIA DE LABORATORIO N° 5

## I. ENSAYO DE CONSOLIDACION

### Generalidades

Cuando se somete un suelo cohesivo saturado a un incremento de carga, ocurre un traspaso de esta carga del agua a la estructura de suelo en el tiempo. Inicialmente, de acuerdo a la teoría, ese incremento de carga exterior lo toma integralmente el agua debido a que, por una parte, es incompresible, y por otra, el suelo del que estamos hablando presenta una baja permeabilidad. Este incremento de carga tomado por el agua produce excesos en la presión neutra por sobre las presiones hidrostáticas. Al cabo de un tiempo  $t$ , parte de este exceso de presión neutra es disipado, transfiriéndose esa parte de la carga a la estructura de suelo, resultando en un incremento de tensiones efectivas. El resultado de este incremento gradual de tensiones verticales efectivas produce asentamientos en terreno.

Cuando el suelo es permeable, como es el caso de un suelo granular, o cuando la carga se aplica a un suelo fino seco (o con bajo grado de saturación), el proceso de deformación con reducción en el índice de vacíos tiene lugar en un período tan corto que es posible considerar el proceso como instantáneo. En estos casos existe una deformación vertical prácticamente inmediata, pero no se reconoce como consolidación.

### Procesos en la Consolidación

El proceso de consolidación se estudia en dos niveles:

#### (a) Consolidación Primaria

Permite estimar los asentamientos que se van a producir una vez que la carga es totalmente transferida a la estructura de suelo. Esta etapa que corresponde al fin de la consolidación primaria, se obtiene de este ensayo y es representada por la curva de consolidación. Es necesario decir que existe una consolidación secundaria y corresponde a las deformaciones acumuladas después de que se completa la consolidación primaria y ocurre no para incrementos de la tensión efectiva sino que para una tensión efectiva constante

#### (b) Proceso Transiente

Este proceso corresponde a la transferencia gradual de los excesos de presión neutra a la estructura de suelo en el tiempo, lo que nos permite calcular, a partir del ensayo de laboratorio, la variación de los asentamientos en el tiempo, así como las presiones neutras y tensiones efectivas en cada punto de la masa de suelo, igualmente en el tiempo.

Una arcilla puede encontrarse en terreno normalmente consolidada (arcilla NC) o preconsolidada (arcilla PC). Se dice que una arcilla es normalmente consolidada cuando nunca fue sometida en su pasado geológico a cargas mayores que las existentes ahora en terreno. Por otro lado, si la arcilla estuvo en el pasado cargada por estratos de suelo que fueron posteriormente erosionados, o por cargas de hielo en una época glacial, se la denomina preconsolidada (también existe la preconsolidación por secamiento o por descenso de la napa freática con posterior recuperación).

El ensayo permite igualmente conocer si se trata de una arcilla NC o PC tras comparar la tensión efectiva que la muestra tiene en terreno (a partir de la estatigrafía y profundidad de la muestra) con la presión de preconsolidación que, como se verá más adelante, se obtiene de la curva de consolidación.

## Equipos

- consolidómetro (también llamado edómetro)
- deformímetro
- equipo de cargas
- cronómetro
- elementos necesarios para el moldeo de la muestra

## Procedimiento

- 1 Moldee cuidadosamente una muestra dentro de un anillo de consolidación (consolidómetro); de la raspadura resultante del proceso de moldeo, tome una muestra representativa y utilícela para determinar el contenido de humedad,
- 2 coloque cuidadosamente la muestra de suelo en el anillo con piedras porosas saturadas en contacto con las caras superior e inferior; asegúrese de que las piedras porosas entren en el anillo y no haya posibilidad de contacto entre las piedras porosas y el anillo durante el proceso de carga,
- 3 coloque el consolidómetro en el aparato de carga y ajuste el deformímetro; recuerde que para las lecturas debe considerarse una posible compresión de la muestra de 4 a 12 mm.
- 4 aplique una carga de inicialización de  $0.05 \text{ kg/cm}^2$  para suelos blandos y de  $0.10$  para suelos firmes; verifique nuevamente que las piedras porosas no se apoyen sobre el anillo; coloque el deformímetro en 0,
- 5 aplique el primer incremento de carga (carga adicional suficiente para desarrollar el primer incremento de carga) y simultáneamente tome lecturas de deformación a tiempos de 0.25, 0.50, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120 min., y a continuación por ejemplo, 4, 8, 16, horas, etc. hasta que las variaciones de lecturas de deformación resulten muy pequeñas,
- 6 después de 24 horas o como se haya establecido, o cuando el  $\Delta H$  entre dos lecturas sea suficientemente pequeño, incrementar la carga y nuevamente tomar lecturas a intervalos de tiempo controlados como en el paso anterior; si se utiliza el proceso de ensayo “rápido”, se deben tomar suficientes tiempos en las lecturas en el tercero y cuarto incremento de carga, para establecer la pendiente que permitirá calcular la consolidación secundaria,
- 7 continúe incrementando cargas y tomando lecturas de deformación versus tiempo hasta llegar a la carga que el instructor les indique,

- 8 al final del experimento, coloque la muestra en el horno, incluyendo todas las partículas que se hayan caído fuera del anillo, para obtener el peso de los sólidos  $W_s$  y obtenga por diferencias el volumen final de agua  $V_{wf}$ ; compare  $W_s$  con el valor calculado a partir del contenido de humedad inicial en el paso 1 (si se hizo la determinación del contenido de humedad).

## Consolidación Primaria

De acuerdo a los resultados del ensayo, se obtiene la curva de consolidación, (ver figura 1). Esta curva representa el fin de la transferencia de cargas desde los excesos de presión neutra a la estructura de suelo, o en otras palabras, el fin del proceso de consolidación primaria. A partir de esta curva – siempre que ella sea representativa del estrato de suelo, por lo que suele ser el resultado de varios ensayos de consolidación sobre diferentes muestras inalteradas del mismo estrato - se puede calcular el asentamiento final de un estrato de arcilla saturada normalmente consolidada sometida a un incremento de carga  $\Delta q = \Delta s'$ . El asentamiento está dado por:

$$S = \frac{H \cdot C}{1 + e_o} \text{Log} \left( \frac{s'_{vo} + \Delta s'}{s'_{vo}} \right)$$

donde

S: asentamiento del estrato de suelo (arcilla o suelo fino saturado)

H: espesor del estrato de suelo

$e_o$ : índice de vacíos inicial

$s'_{vo}$ : tensión vertical efectiva inicial (antes de la aplicación de sobrecarga)

$\Delta s'$ : incremento de tensión efectiva (o sobrecarga), la cual producirá la consolidación

$C = C_c$  índice de compresibilidad que es la inclinación de la recta virgen de la curva de consolidación en escala semi-logarítmica

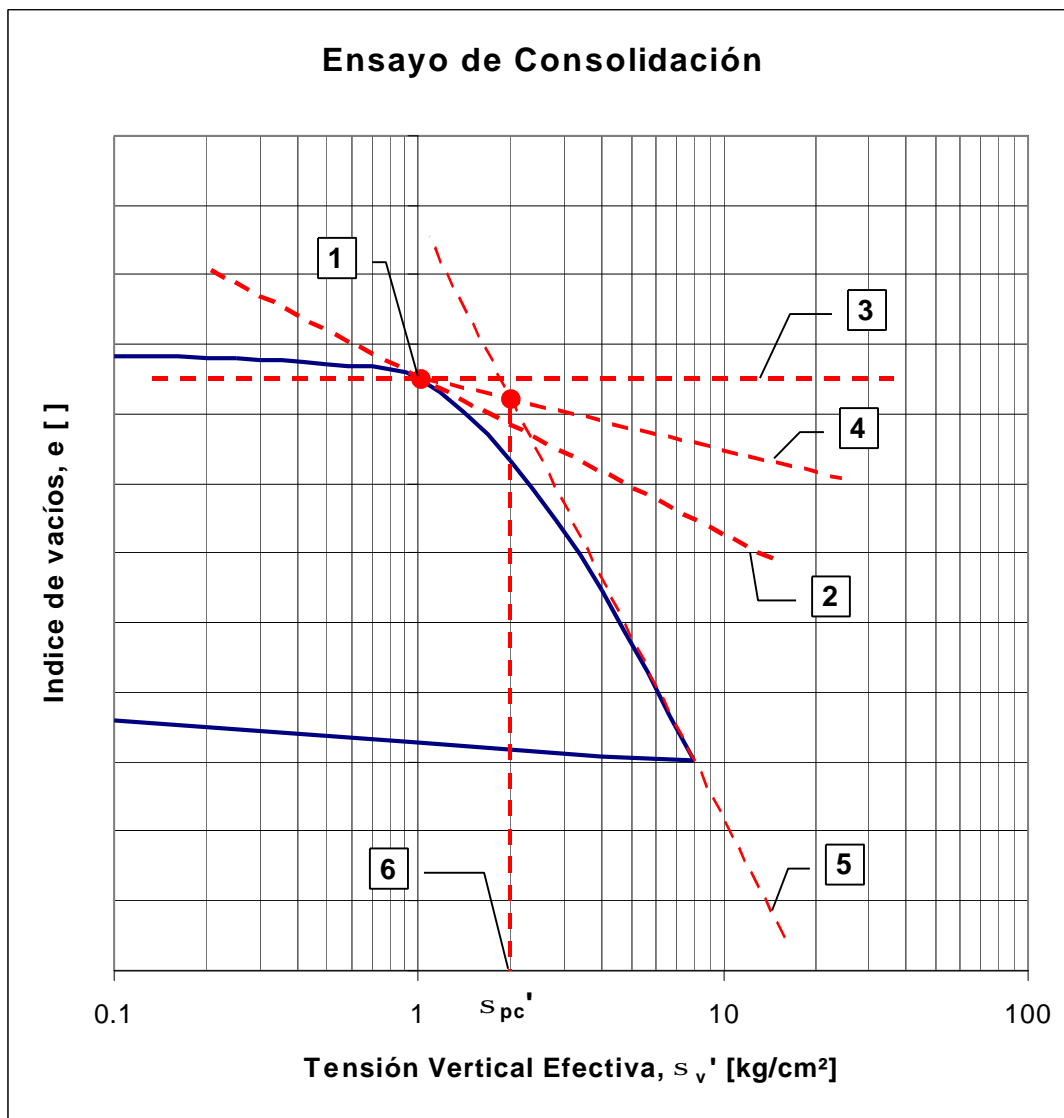
Para el caso de un estrato de arcilla preconsolidada, existirán dos casos posibles.

- El primero corresponde a un incremento de carga tal, que sumado a la tensión vertical efectiva existente (a la profundidad que se obtuvo la muestra) no supera la presión de preconsolidación (calculada gráficamente como se indica en Figura 1). En este caso se utiliza la misma fórmula anterior, pero con el valor de  $C = C_r$  (índice de recompresión)
- El segundo caso se refiere a un incremento de carga que sumado a la tensión vertical efectiva existente (a la profundidad de la muestra), supera la presión de preconsolidación. En este caso la fórmula contendrá dos términos, uno que corresponde a la deformación según la curva de recompresión y el otro a la deformación según la curva virgen.

- Método de Casagrande para la Determinación Gráfica de la Tensión de Preconsolidación,  $s_{pc}'$ .

En el gráfico  $e - \log s_v'$ :

1. Ubicar punto 1, punto de máxima curvatura
2. Trazar la recta 2, tangente por el punto 1
3. Trazar la recta 3, horizontal por el punto 1
4. Trazar la bisectriz de la recta tangente 2 y la horizontal 3
5. Prolongar recta de la curva virgen o curva normalmente consolidada
6. La intersección de las rectas 4 y 5 determina en abscisas el valor de  $s_{pc}'$



**FIGURA 1 CURVA DE CONSOLIDACION (Fin de Consolidación Primaria)  
Determinación Gráfica de la Presión de Preconsolidación,  $s_{pc}'$**

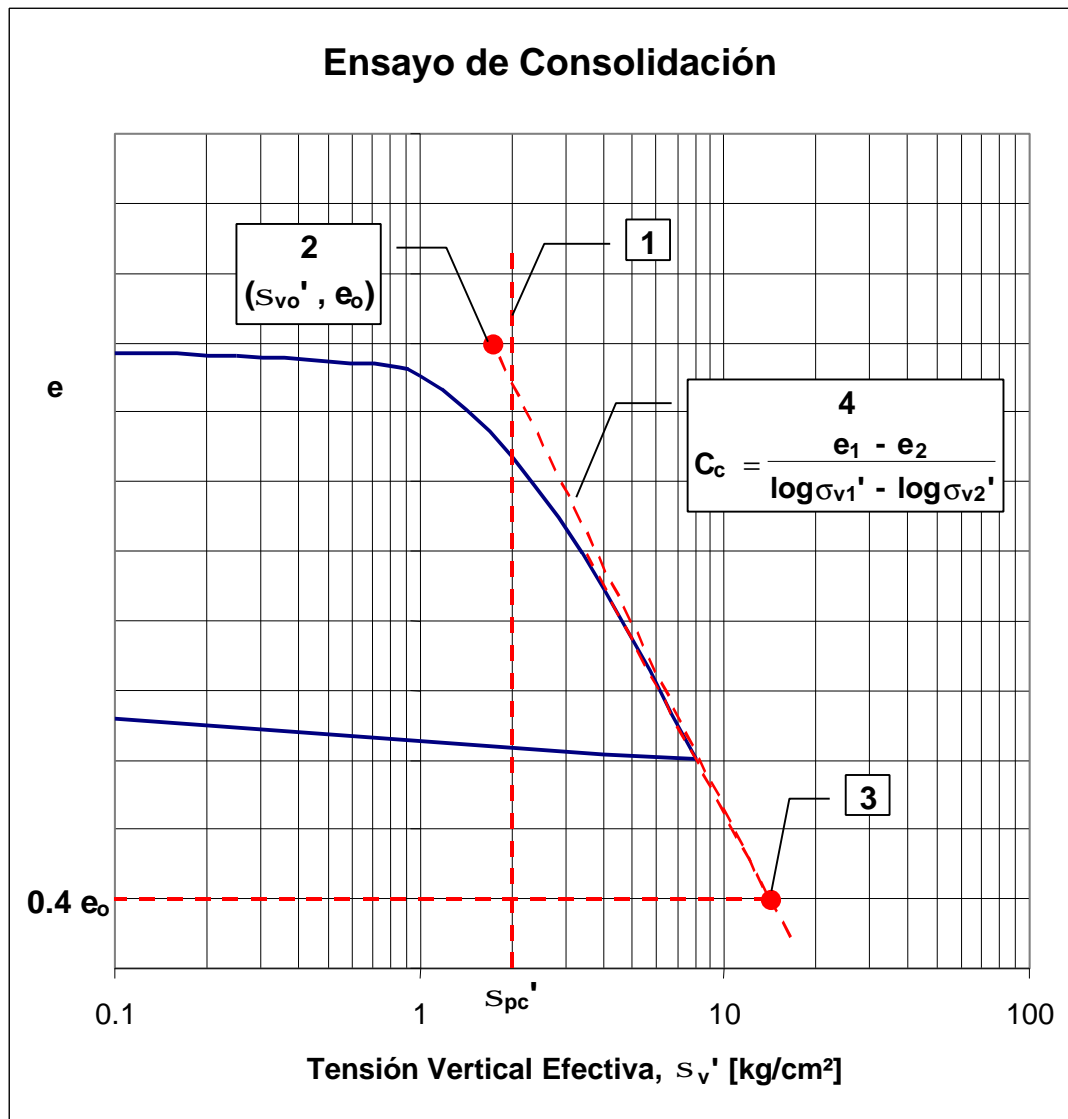
- **Estableciendo si la Arcilla es NC o PC**

Debemos comparar la tensión vertical efectiva de terreno,  $s_{vo}'$  con la tensión de preconsolidación,  $s_{pc}'$ , para saber si la arcilla está normalmente consolidado (NC) o preconsolidada (PC).

- Si  $s_{vo}' \sim s_{pc}'$  se trata de una arcilla NC  
Si  $s_{vo}' < s_{pc}'$  se trata de una arcilla PC, siempre que estas diferencias sean significativas

En la curva de consolidación (figura 2):

1. Ubicar  $s_{pc}'$ .
2. Ubicar el punto  $(s_{vo}', e_o)$ , tensión vertical efectiva de terreno e índice de vacíos en terreno.
3. Ubicar el punto  $0.4 e_o$  en la prolongación de la recta de carga normalmente consolidado, también denominada curva virgen.
4. Unir con una recta los puntos 2 y 3. El valor absoluto de la pendiente de esta curva es el Índice de Compresibilidad,  $C_c$ .



- **Métodos de Determinación del Coeficiente de Consolidación,  $c_v$**

**(a) Según método de Taylor**

En el gráfico deformación vs raíz cuadrada del tiempo (Figura 3):

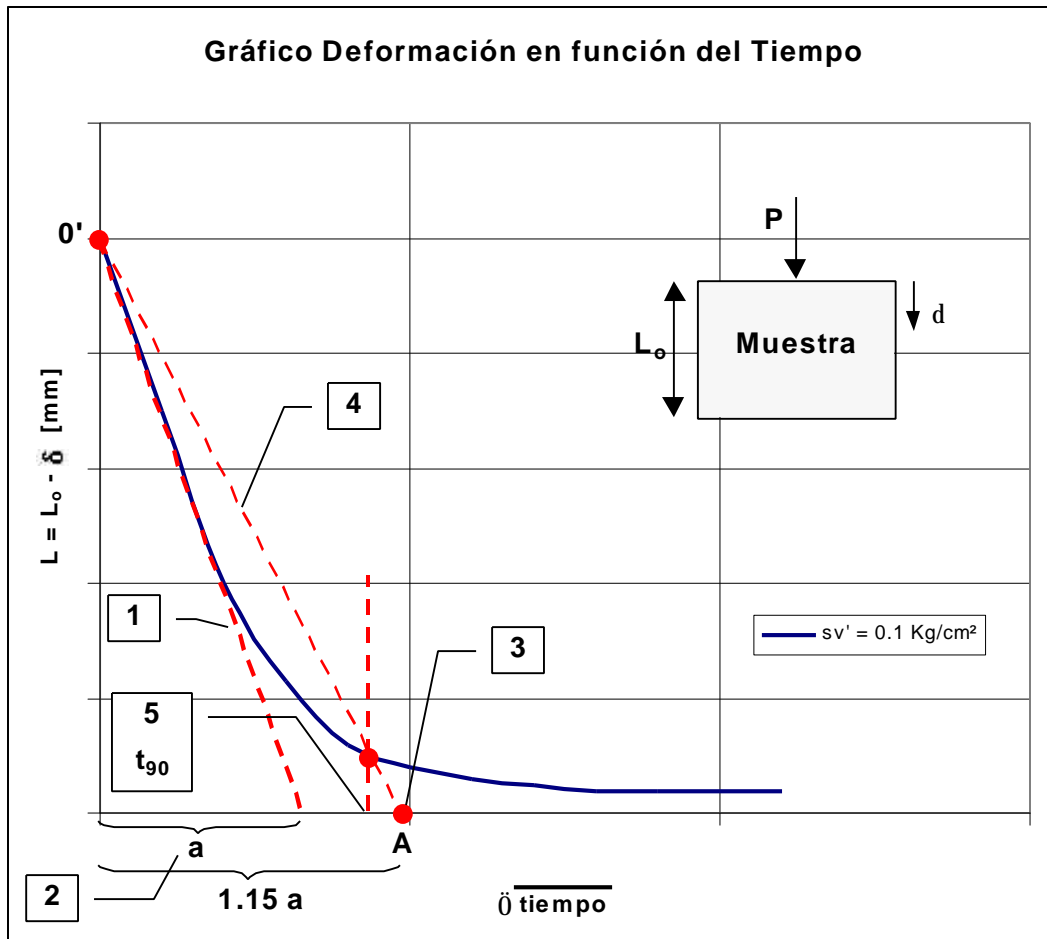
1. Trazar la mejor recta que pasa por los primeros puntos del gráfico
2. La intersección entre la recta definida en 1 con el eje de las abscisas, define una distancia “a”.
3. Se define en el eje de las abscisas el punto A distanciado del origen en  $1.15A$
4. Se une el punto  $O'$  y A.
5. La intersección de esta recta con la curva define el valor  $t_{90}$  en el eje de las abscisas.
6. Con este valor de  $t_{90}$  calcular el coeficiente de consolidación con la fórmula:

$$c_v = \frac{T_v(U=90\%) \cdot H^2}{t_{90}}$$

donde

$T_v$  (factor tiempo) para  $(U = 90\%) = 0.848$

$H = \frac{1}{2}$  la altura inicial de la muestra (ya que existe doble drenaje)



**FIGURA 3 CURVA DEFORMACION VERSUS RAIZ DE TIEMPO**  
**Determinación Gráfica según Taylor de  $t_{90}$**

$C_v$  se calcula para todos los incrementos de carga del ensayo, lo cual permite graficar  $c_v$  en función de  $s_v'$ . El valor de  $c_v$  a utilizar será aquel correspondiente al incremento de carga que se tendrá en terreno, es decir, desde  $s_{v0}'$  a la tensión vertical efectiva final.

#### **(b) Según método de Casagrande**

En el gráfico deformación vs  $\log t$  (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)

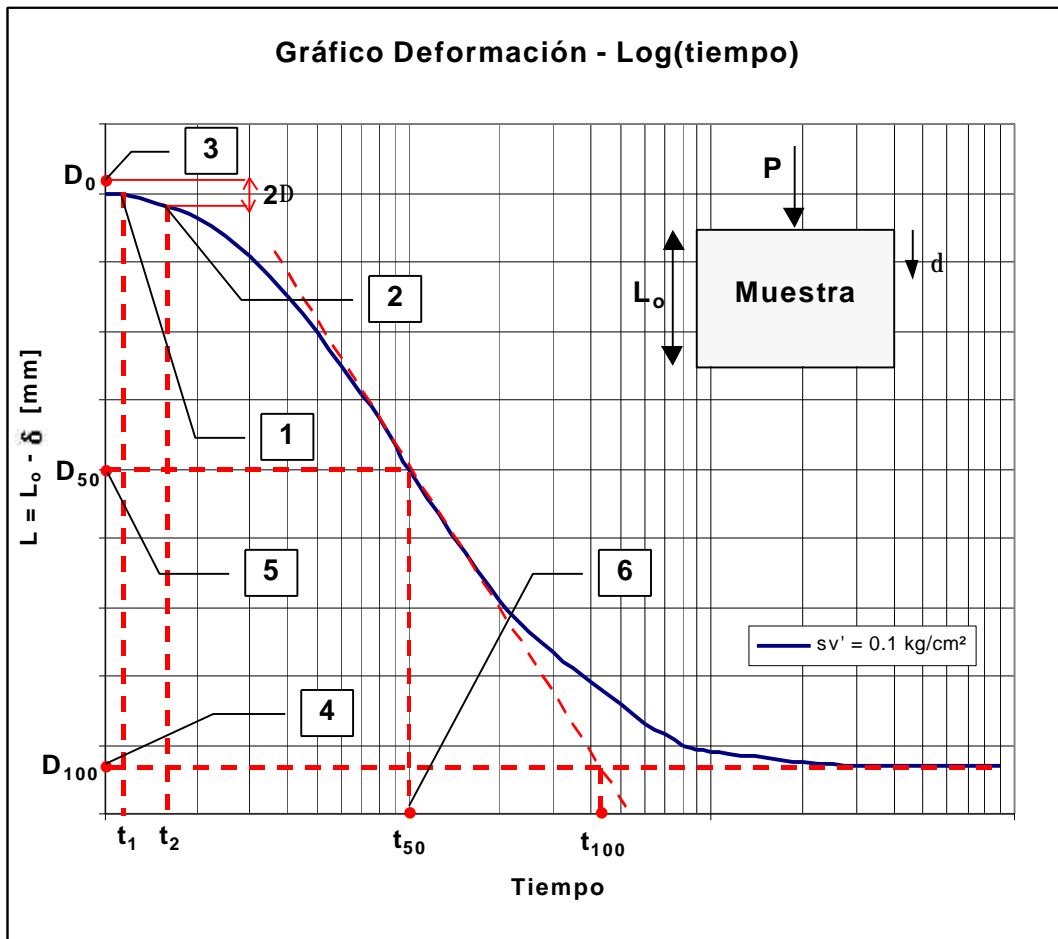
2. Marcar  $t_2 = 4 t_1$ . Definidos  $t_1$  y  $t_2$ , ellos determinan sobre la curva la distancia vertical ? .
3. Dibujar la distancia  $2D_0$ , y encontrar  $D_0$  en el eje de las ordenadas.
4. Dibujar la proyección horizontal del final de la curva de deformación e intersectarla con el eje de las 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. Calcular  $c_v$  como:

$$c_v = \frac{T_v(U = 50\%) \cdot H^2}{t_{50}}$$

donde

$T_v$  es el factor tiempo para  $U = 50\%$  y tiene el valor 0.197

$H = \frac{1}{2}$  la altura inicial de la muestra (doblemente drenada)



**FIGURA 4 CURVA DEFORMACION VERSUS LOGARITMO TIEMPO**  
**Determinación Gráfica según Casagrande de  $t_{50}$**

## II. PERMEABILIDAD DE UN SUELO

### Generalidades

La permeabilidad de un suelo se mide a través del coeficiente de permeabilidad  $k$ , que es un parámetro que define la mayor facilidad o dificultad que el suelo ofrece al flujo del agua. Fue Darcy, a mediados del siglo XIX, quien definió este parámetro para arenas. Posteriormente, se demostró que esta ley era igualmente válida para otros suelos, incluyendo suelos mucho menos permeables, tales como arcillas. Aunque la ley de Darcy se puede utilizar también para el flujo de otros líquidos, cuando en geotecnia se entrega un valor de  $k$ , se entiende que estamos hablando de su permeabilidad frente al flujo de agua.

La permeabilidad de los suelos varía varios órdenes de magnitud. Así, mientras que para una arena limpia, el coeficiente de permeabilidad,  $k$ , puede variar entre  $10^{-2}$  y  $10^{-4}$  cm/s, para una arcilla éste valor puede oscilar entre  $10^{-5}$  y  $10^{-8}$  cm/s.

Existen dos métodos generales de laboratorio para determinar directamente el coeficiente de permeabilidad de un suelo. Estos son el método de carga constante y el método de carga variable.

La permeabilidad de un suelo medida en laboratorio, sea a través del ensayo de carga constante, sea el de carga variable, puede diferir del valor que ese suelo tiene en terreno. Entre las razones de estas diferencias, podemos mencionar las siguientes:

1. El suelo que se utiliza en el laboratorio nunca es perfectamente representativo del suelo que se tiene en el terreno. A esto se suma el hecho que el agua buscará precisamente caminos en terreno determinados por los sectores donde el suelo se presente más permeable.
2. La orientación preferencial del flujo in situ puede diferir de la orientación impuesta en el laboratorio.
3. Las condiciones de borde en laboratorio difieren de las de terreno. Las paredes lisas del molde de permeabilidad facilitan caminos del flujo si comparados a los caminos naturales en el terreno. Si el suelo tiene estratificación vertical, el flujo en los diferentes estratos será diferente y esta condición de borde es casi imposible de reproducir en laboratorio.
4. La carga hidráulica  $\Delta h$  puede ser diferente en el laboratorio, lo cual puede producir un arrastre, aunque leve, del material fino hacia los bordes con una posible reducción en el valor de  $k$ . El gradiente hidráulico, definido como  $i = \Delta h/l$ , obtenido en el terreno varía entre 0.5 y 1.5, mientras que en el laboratorio suele ser mayor a 5. Existe evidencia obtenida en diferentes investigaciones que hace pensar que la ley de Darcy,  $v = k \cdot i$ , no es una relación lineal para todos los valores de  $i$ , especialmente para valores grandes (Mitchell y Younger (1967)). Por otra parte, existe también evidencia de que en suelos finos (arcillas), puede existir un gradiente límite por debajo del cual no hay flujo. (Terzaghi (1925)).

5. El suelo en la naturaleza, a pesar de estar por debajo del nivel freático, no se encuentra necesariamente 100% saturado. Existe una cierta cantidad de aire atrapado. Lo mismo puede ocurrir en laboratorio. La existencia de burbujas de aire, aunque pequeñas, afecta la permeabilidad.

Por estas razones, en los proyectos de ingeniería de importancia, tales como presas de tierra y grandes excavaciones, se hace necesario realizar mediciones de permeabilidad a través de ensayos en terreno, tales como pruebas de bombeamiento.

## Definiciones

Ley de Darcy.

$$v = k \cdot i$$

y el caudal correspondiente del flujo es:

$$q = k \cdot i \cdot A$$

donde:

q = cantidad de flujo por unidad de tiempo

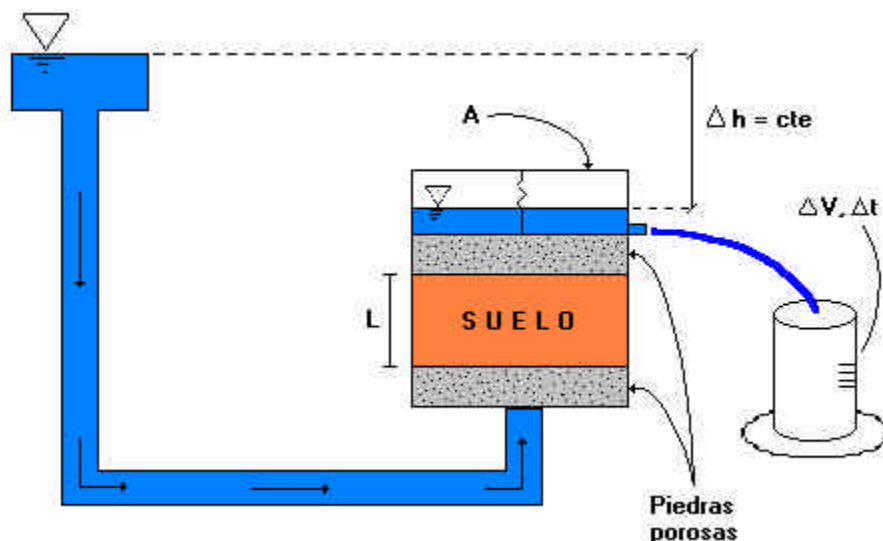
k = coeficiente de permeabilidad (unidades de velocidad)

i = gradiente hidráulico =  $\Delta h/L$

$\Delta h$  = carga hidráulica a lo largo de la muestra

L = Longitud de la muestra a través de la cual se mide h

A = área de la sección transversal del suelo en consideración



**Figura 1 Ensayo de Carga Constante**

El coeficiente de permeabilidad de una masa de suelo homogénea e isotrópica depende de los siguientes factores:

1. La viscosidad del agua en los poros, ya que a medida que la temperatura aumenta, la viscosidad del agua disminuye y por lo tanto, la permeabilidad aumenta. Por ello, el coeficiente de permeabilidad se ha normalizado a 20 ° C, de forma que este coeficiente, medido a otra temperatura T, se pueda expresar en relación a  $k_{20}$ , por medio de la siguiente ecuación:

$$k_{20} = k_T \cdot \frac{h_T}{h_{20}}$$

donde  $\eta_T$  y  $\eta_{20}$ , son las viscosidades del agua a la temperaturas T (del ensayo) y a 20°C, respectivamente.

2. El índice de vacíos e, del suelo. Es claro que la permeabilidad para un mismo suelo será mayor cuanto mayor sea su índice de vacíos. Se han hecho varios intentos para correlacionar el coeficiente de permeabilidad del suelo con el índice de vacíos y se ha observado que la permeabilidad varía con una potencia del índice de vacíos.
3. El tamaño y forma de los granos de suelo. Allan Hazen estudió el uso de arenas en filtros para obras hidráulicas y concluyó que para arenas limpias y gravas el coeficiente de permeabilidad puede expresarse aproximadamente como:

$$k = 100 \cdot D_{10}^2 \quad \text{cm/s} \quad \text{para un rango de D entre } 0.1 < D_{10} < 3.0 \text{ mm}$$

El  $D_{10}$  que se utiliza es el diámetro correspondiente al 10 % más fino de la muestra, obtenido de la curva de distribución granulométrica y expresado en cm. La presencia de partículas angulares y laminares en un suelo tiende a reducir k si comparado con suelos compuestos predominantemente por partículas redondeadas y esféricas.

4. El grado de saturación. A medida que aumenta el grado de saturación, el coeficiente de permeabilidad aparente también se incrementa. En parte, este aumento se debe a la distribución de tensiones superficiales. El origen del resto del aumento se desconoce, pues es difícil determinar k a menos que se considere continuidad de flujo a través del medio. El flujo a través de un medio poroso puede obtenerse únicamente considerando iguales la cantidad de agua que entra y sale de la masa de suelo, es decir en régimen permanente. Las muestras en laboratorio generalmente se saturan para evitar variaciones con respecto al patrón de suelo saturado.

## Equipo

- Aparato de permeabilidad
- Cronómetro
- Termómetro
- Cilindro graduado

- Vara pequeña de madera graduada

## **Procedimiento**

1. Pesar el recipiente de material (granular) que será utilizado en el experimento.
2. Armar el aparato de permeabilidad hasta donde se necesite para colocar el suelo para el ensayo. Determinar el volumen del molde.
3. A partir de la densidad natural especificada, calcular el peso total de suelo a utilizar y compactar el suelo en 3 capas iguales utilizando la vara de madera graduada para medir el espesor de cada capa.
4. Armar el aparato. Orientar las tuberías de entrada y salida convenientemente para la recolección de agua y para la saturación y drenaje iniciales.
5. Conectar la entrada del agua al recipiente de suministro. A continuación dejar saturar lentamente la muestra (por observación visual) y estabilizar la condición de flujo permitiendo que fluya agua por un tiempo. A continuación cerrar la válvula de entrada y salida.
6. Utilizar un recipiente de 500 o 1000 ml (mayor si es posible) para recibir el agua a la salida del permeámetro. Registrar el tiempo necesario para acumular entre 750 y 900 ml de agua. Registrar también la temperatura del agua y repetir dos o tres veces mediciones similares adicionales utilizando un tiempo constante ( $t = \text{constante}$ ). La cantidad de agua recogida en ensayos sucesivos es decreciente; esto debe ser analizado en la discusión del informe.
7. Calcular el coeficiente de permeabilidad  $k$  utilizando la ley de Darcy, promediando los resultados obtenidos. Expresar los resultados en cm/s.

## **Preguntas**

1. Se observa que existe disminución en la cantidad de agua que fluye a través de la muestra para cada repetición sucesiva del proceso. En su opinión, esto se debe a la formación de una barrera en el filtro por acumulación de finos o a la eliminación de aire en solución en el agua a través de repeticiones de este proceso. Comente.
2. ¿Qué puede hacerse para lograr producir una condición de caudal constante?
3. Discuta los cambios que a su juicio convendría realizar para mejorar este experimento práctico.
4. Ud. desea construir una cancha de tenis en el patio de su casa (cancha de arcilla). Aplicando los conocimientos adquiridos en el curso en lo que se refiere a filtros ¿con qué materiales y de qué manera diseñaría la red de drenaje de la cancha?

## **Bibliografía**

1. Bowles, Joseph E. Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil. Biblioteca IDIEM.
2. Lambe, T. W. (1951) Soil Testing for Engineers. Biblioteca IDIEM.