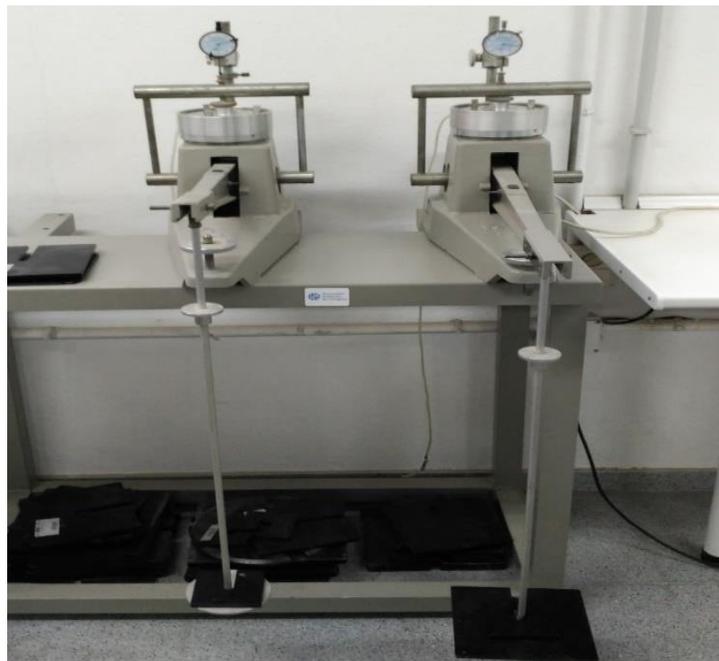


TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Civil

**Ensayo de consolidación en una arcilla
caolinítica tipo 0.63 con escalones de carga
no contemplados en la normativa. Análisis de
los resultados obtenidos mediante simulación
numérica**



Alumno: JOSÉ ÁNGEL ORTEGA GÓMEZ

Director: IVAN ALHAMA MANTECA

Codirector: GONZALO GARCIA ROS

Índice

1	Introducción.....	1
1.1	Resumen	1
1.2	Objetivos y alcance.....	2
2	Fundamentos teóricos	3
2.1	Teoría de consolidación y análisis de los asentamientos.....	3
2.2	Teoría de Terzaghi para la consolidación vertical.....	5
2.2.1	Deducción de la ecuación de comportamiento.....	5
2.2.2	Solución de la ecuación de comportamiento.....	10
3	Metodología del ensayo de consolidación.....	16
3.1	Aparato y procedimiento.....	16
3.2	Equipos y materiales utilizados.....	18
3.3	Determinación de parámetros.....	19
3.3.1.	Determinación de la humedad inicial, densidad seca inicial, densidad relativa de las partículas e índice de poros.....	19
3.3.2.	Búsqueda del límite líquido.....	25
3.4	Ensayo de consolidación.....	26
3.4.1.	Resumen de resultados.....	37
3.4.2.	Comparación y discusión de resultados	49
4	Simulación numérica.....	52
5	Conclusión	57
6	Bibliografía.....	58

1 Introducción.

1.1 Resumen

A la hora de observar una obra civil como puede ser un puente, una carretera, una presa, etc. lo que más nos fascina y en lo que siempre nos fijamos es en la parte constructiva que vemos a simple vista.

Uno de los aspectos menos visible y no por ello menos importante en la base de estas construcciones es el suelo, el cual, siempre ha estado dando problemas a lo largo de los inicios de la construcción.

La Geotecnia se ha encargado de solucionar dichos problemas mejorando las propiedades mecánicas, hidráulicas e ingenieriles de los materiales provenientes del medio geológico.

En este trabajo nos centraremos principalmente en el problema de consolidación. La consolidación es uno de los problemas más importantes del suelo, un proceso en el que se dan interacciones físico-químicas y mecánicas, las cuales, al ejercer un peso sobre el terreno, este producirá una reacción ante las cargas colocadas sobre él.

Un ejemplo del daño que puede producir este problema, podemos verlo a la hora de realizar una construcción sobre un terreno arcilloso saturado con agua. Cuando apliquemos la carga externa sobre el terreno, las capas del suelo sufrirán un incremento de presión que le hará trasladarse a los puntos sometidos a presión menor desde los de mayor presión, produciéndose una expulsión de agua intersticial. Esto causará una restructuración muy lenta del terreno, lo que podrá ocasionar daños en la estructura de nuestra construcción.

Por eso, para adelantarnos a estos problemas, necesitamos conocer el comportamiento que llevará el suelo cuando apliquemos diferentes cargas, sabiendo que, las deformaciones que se producirán, serán distintas para cada tipo de suelo y carga.

1.2 Objetivos y alcance.

Al realizar una construcción sobre un tipo de terreno como el del presente trabajo, la carga aplicada sobre el terreno, producirá un aumento o disminución de las tensiones internas. A la larga, estas variaciones de tensiones, ocasionarán asentamientos en el terreno que podrán ocasionar daños en la estructura de nuestra construcción.

En el presente trabajo, se ha realizado un ensayo de consolidación a una arcilla caolinítica tipo 0.63, con el fin de obtener los parámetros que nos permitirán conocer cómo se comportará el suelo tras la aplicación de sucesivas cargas y descargas.

En un primer lugar, conoceremos los fundamentos teóricos de la consolidación, basados en la teoría del problema de consolidación de Terzaghi (Terzaghi & Frölich, 1933) y las ecuaciones descritas por Berry (Mecánica de Suelos, P.L. Berry).

Después, cogeremos seis muestras de nuestro tipo de arcilla, y se le realizarán varios ensayos de consolidación unidimensional no standard, con saltos tensionales diferentes a los previstos en la normativa. A continuación, llevaremos a cabo unas comparaciones de nuestros resultados con los resultados obtenidos en el ensayo de consolidación estándar.

Finalmente, plantearemos un caso real con nuestro tipo de arcilla, el cual, realizaremos con un programa informático de simulación numérica mediante método de redes.

2 Fundamentos teóricos

2.1 Teoría de consolidación y análisis de los asentamientos.

Al someter un incremento de esfuerzos totales sobre un depósito de suelo, debido a una carga aplicada producida por ejemplo en la construcción de un edificio o de un terraplén, se produce en el suelo un exceso de presión intersticial. Puesto que el agua no puede resistir ningún tipo de esfuerzo cortante, el exceso de presión intersticial en los poros de suelo se irá disipando con el transcurso del tiempo mediante un flujo de agua desde el interior de la matriz de suelo hacia el exterior. El parámetro principal del que depende la velocidad del flujo de agua es la permeabilidad de la masa de suelo.

La disipación del exceso de presión intersticial debida al flujo de agua hacia el exterior se denomina consolidación, proceso con dos importantes consecuencias.

- 1) Nos lleva a una reducción del volumen de poros y, debido a ello, a una reducción del volumen total de la masa de suelo, lo cual repercute en el asentamiento de la superficie del terreno y por consiguiente en un asentamiento de la estructura colocada en ella.
- 2) Durante la disipación del exceso de presión intersticial, el esfuerzo efectivo en la masa de suelo aumenta incrementando debido a ello la resistencia al cortante. La consolidación y la resistencia al cortante están, por tanto, relacionados mutuamente.

De lo anterior podemos extraer que cuando un suelo se consolida se produce en él una disminución de la relación de vacíos la cual va acompañada por un incremento del esfuerzo efectivo.

En un suelo granular, como pudiera ser una arena, la permeabilidad es relativamente alta y por ello el exceso de presión intersticial se disipa de forma casi instantánea. En consecuencia, el asentamiento que ha de aparecer en el terreno bajo las cargas de una estructura por lo general aparece antes de finalizar la construcción. Opuestamente a esto, los depósitos de arcilla suelen tener una permeabilidad considerablemente baja y por ello la disipación del exceso de presión intersticial en los poros del suelo resulta ser un proceso muy lento. En consecuencia, una estructura ejecutada sobre un suelo de este tipo puede continuar asentándose durante varios años después de terminada la construcción.

El proceso de consolidación aparece en todos los tipos de suelos, sin embargo, en la práctica, solo tiene interés el caso de estructuras cimentadas sobre depósitos de arcilla. Para tales casos se necesita predecir:

- a) El asentamiento total de la estructura.
- b) La velocidad a la cual se produce dicho asentamiento.

Para predecir todos estos elementos la bibliografía técnica nos aporta una extensa teoría de la consolidación.

En general, el proceso de la consolidación involucra en tres dimensiones el flujo del agua intersticial y las deformaciones de la masa de suelo. Sin embargo, las teorías tridimensionales son muy complejas y difíciles de aplicar en la práctica. El caso más simple que puede tratarse matemáticamente es el caso unidimensional. Esta es la teoría que se utiliza con mayor frecuencia en la práctica y es la base de la casi totalidad de los cálculos de asentamientos.

2.2 Teoría de Terzaghi para la consolidación vertical.

2.2.1 Deducción de la ecuación de comportamiento.

A partir de la "Teoría de Terzaghi", deducimos la ecuación de comportamiento para consolidación vertical. Considérese un depósito de suelo homogéneo, saturado, de longitud lateral infinita y sometido a una carga uniforme "q" aplicada en toda el área superficial como se muestra en la Figura 2.1.

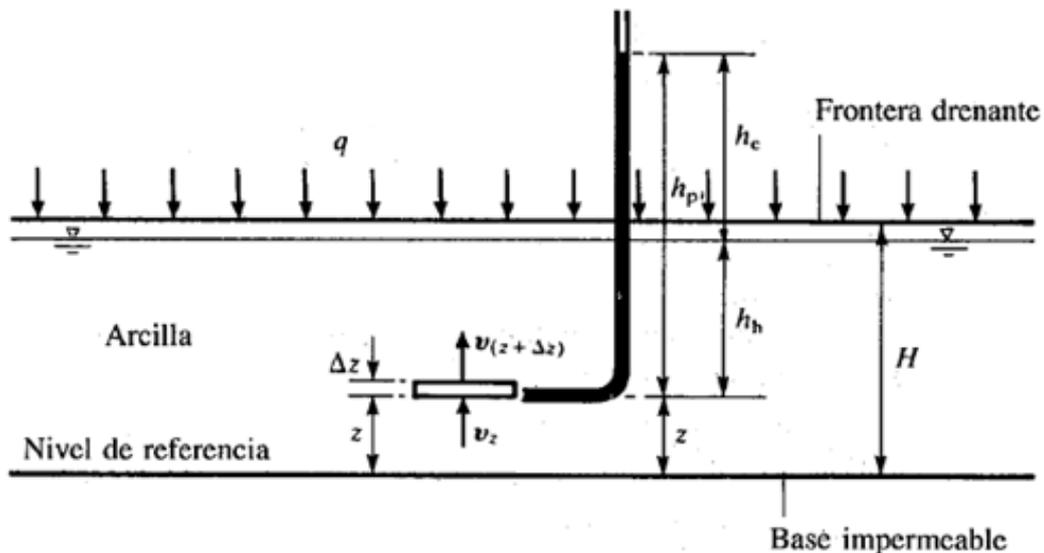


Figura 2.1 Consolidación vertical de una capa de suelo

El suelo reposa sobre una base impermeable y drena libremente por su cara superior. La disipación del exceso de presión intersticial en cualquier punto solo se producirá mediante el flujo del agua intersticial en sentido vertical ascendente hacia la superficie, ya que el gradiente hidráulico únicamente se presenta en la dirección vertical. Como resultado se producirán deformaciones en la dirección vertical. Por tanto, para un elemento de suelo se tiene:

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.

Obteniendo la siguiente expresión:

$$v_z + \Delta_z = v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} * \Delta_z$$

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

$$\begin{aligned} & \text{Flujo que sale por unidad de tiempo} - \text{Flujo que entra por unidad de tiempo} \\ & = \text{Velocidad de cambio de volumen del elemento} \end{aligned}$$

De esta forma:

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

Donde "A" sería el area plana del elemento y "V" es el volumen. Por tanto:

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

Suponiendo que las partículas de suelo y el agua intersticial son incompresibles, entonces la velocidad de cambio de volumen del elemento (termino derecho de la ecuación anterior) es igual a la velocidad de cambio de volumen de vacios. Quedando así:

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

Si "V_s" es el volumen de sólidos en el elemento y "e" es la relacion de vacios, entonces por definición:

$$V_v = e * V_s$$

Si se remplaza en la ecuación anterior y se tiene en cuenta que "V_s" es constante, se obtiene lo siguiente:

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

Dónde:

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

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

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

Donde “h” sería la cabeza total en el elemento y “k_z” el coeficiente de permeabilidad vertical del suelo (“k_v” según la notación de Terzaghi).

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

En la práctica, las deformaciones verticales suelen ser pequeñas y por tanto es razonable suponer que la permeabilidad del suelo permanece constante durante la aplicación del incremento de carga. Por tanto, se obtiene:

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

Tomando como nivel de referencia la base del suelo, la cabeza total “h” del elemento está dada por:

$$h = z + h_h + h_e$$

Donde “z” es la cabeza de posición, “h_h” es la cabeza hidrostática y “h_e” el exceso de cabeza de presión. En la teoría de pequeñas deformaciones puede suponerse que la cabeza de posición y la cabeza hidrostática permanecen constantes. Por lo que obtenemos la siguiente expresión:

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

El exceso de presión intersticial en el elemento viene dado por:

$$u_e = \rho_w * g * h_e$$

De esta forma obtenemos:

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

Reordenando términos se obtiene la siguiente expresión:

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

Se obtiene entonces una ecuación con dos incógnitas (“ u_e ” y “ e ”) y para plantear el problema completamente se necesita una ecuación adicional que relacione el exceso de presión intersticial y la relación de vacíos. Esta se obtiene al considerar el comportamiento del suelo bajo esfuerzo vertical – deformación. Terzaghi tomó este comportamiento como lineal para un incremento de carga en particular, como se puede ver en la Figura 2.2.

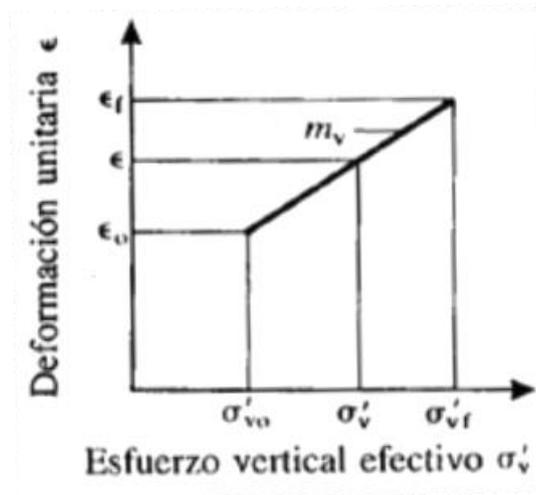


Figura 2.2 Deformación lineal unitaria para cada incremento de esfuerzo vertical efectivo

Puesto que el cambio de deformación es proporcional al cambio de relación de vacíos, esto también implica la existencia de una relación lineal entre “ e ” y “ σ'_v ”, como se puede ver en la Figura 2.3, lo cual es completamente razonable siempre que la relación de incremento de presión sea casi igual a la unidad. La pendiente de la línea se designa con “ a_v ” y se denomina “coeficiente de compresibilidad”. Se tiene entonces:

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

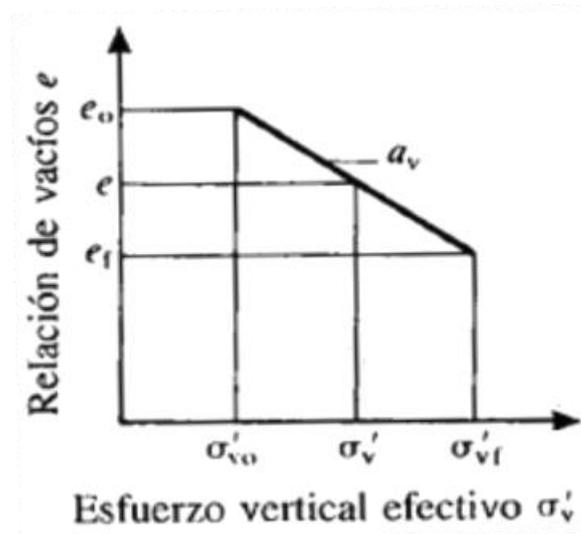


Figura 2.3 Relación de vacíos para cada incremento de esfuerzo vertical efectivo

La presión intersticial “ u ” está dada por la presión hidrostática “ u_h ” y por el exceso de presión “ u_e ”. Esto es:

$$\sigma_v = \sigma'_v + u_h + u_e$$

Derivando respecto del tiempo obtenemos:

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

Además:

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

Operando se obtiene:

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

Y sustituyendo:

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

De esta expresión obtenemos el denominado “coeficiente de consolidación vertical”:

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

Y la expresión final de la consolidación unidimensional, derivada por Terzaghi en 1923, quedaría finalmente de la siguiente manera:

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

El “coeficiente de compresibilidad volumétrica” por su parte se obtiene así:

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e}$$

2.2.2 Solución de la ecuación de comportamiento.

Para un área cargada de extensión ilimitada, la presión aplicada “q” es constante con la profundidad e inicialmente es absorbida por el agua intersticial en la forma de un exceso de presión “u_{0e}”. Se tiene entonces:

Condicion inicial para t = 0; u_e = u_{0e} = q; para 0 ≤ z ≤ H

Condicion de frontera para todo t: $\frac{\partial u_e}{\partial z} = 0$; en z = 0, u_e = 0 en z = H

Condicion final para t = ∞; u_e = 0; para 0 ≤ z ≤ H

La solución final de la ecuación está dada por:

$$\frac{u_e}{u_{0e}} = \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M} * \sin \left[M * \left(1 - \frac{z}{H} \right) \right] * \exp(-M^2 * T_v)$$

Dónde:

$$M = \frac{\pi}{2} * (2m + 1), \text{ con } m = 0, 1, 2, \dots, \infty$$

Donde "H" es la longitud máxima de la trayectoria de drenaje y "T_v" es un factor adimensional denominado "factor de tiempo vertical", definido como:

$$T_v = \frac{C_v * t}{H^2}$$

El "grado de consolidación", designado por "U_v", de un elemento de suelo quedaría definido por la siguiente expresión:

$$U_v = 1 - \frac{u_e}{u_{0e}}$$

Y el "grado de consolidación" es por tanto igual al "grado de disipación del exceso de presión intersticial":

$$U_v = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M} * \sin \left[M * \left(1 - \frac{z}{H} \right) \right] * \exp(-M^2 * T_v)$$

De esta ecuación podemos deducir una gráfica de triple entrada con "U_v" en función de "T_v" y "z/H", como la que se muestra en la Figura 2.4.

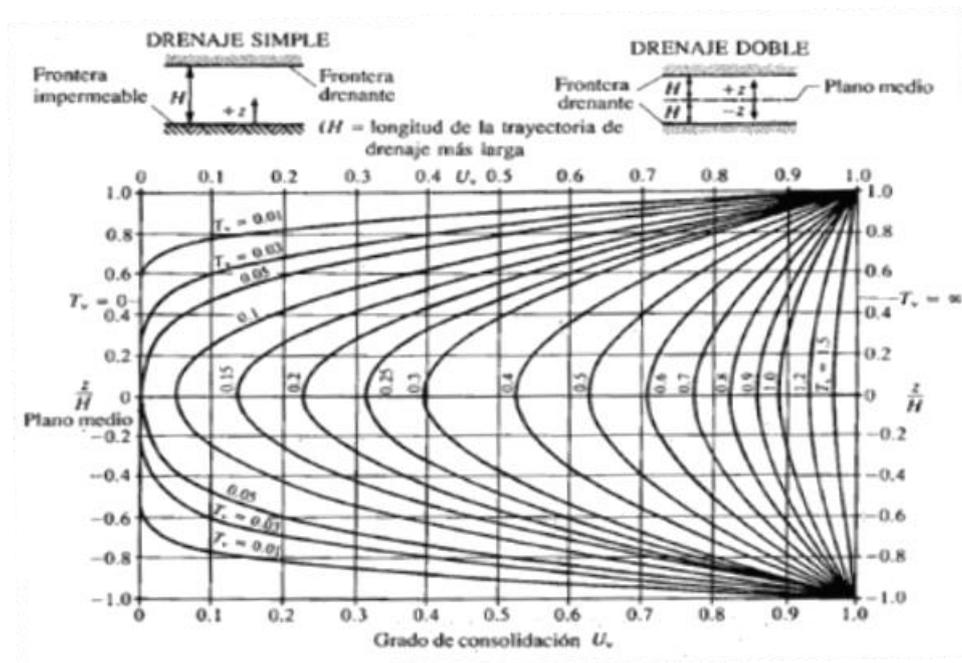


Figura 2.4 Grado de consolidación en función de "T_v" y "z/H"

Donde como hemos mencionado:

$$U_v = 1 - \frac{u_e}{u_{0e}}$$

En un caso como el considerado inicialmente, donde la lámina de suelo reposa sobre una frontera impermeable y el agua solo puede drenar hacia arriba (hacia la superficie), la distribución del grado de consolidación en función de la profundidad para varios valores del factor de tiempo está representada por la mitad superior de la gráfica. Este caso se denomina "drenaje simple".

Para una lámina de suelo que reposa sobre una frontera permeable, la distribución del grado de consolidación en función de la profundidad para varios valores del factor de tiempo vertical, está representada por la gráfica completa. Este segundo caso se denomina "drenaje doble". Se puede observar que la consolidación se produce con mayor rapidez en las proximidades de las fronteras drenantes y con menor rapidez en la frontera impermeable de una lámina con drenaje simple o en el plano medio de una lámina con drenaje doble.

Además de los valores del grado de consolidación, también es interesante el cálculo del "grado promedio de consolidación, \bar{U}_v " el cual refleja el asentamiento en la superficie de la capa y, por tanto, el asentamiento en la estructura ingenieril.

$$\bar{U}_v = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M^2} e^{(-M^2 \cdot T_v)}$$

La relación entre el "factor de tiempo vertical" y "el grado promedio de consolidación" puede observarse en la Figura 2.5.

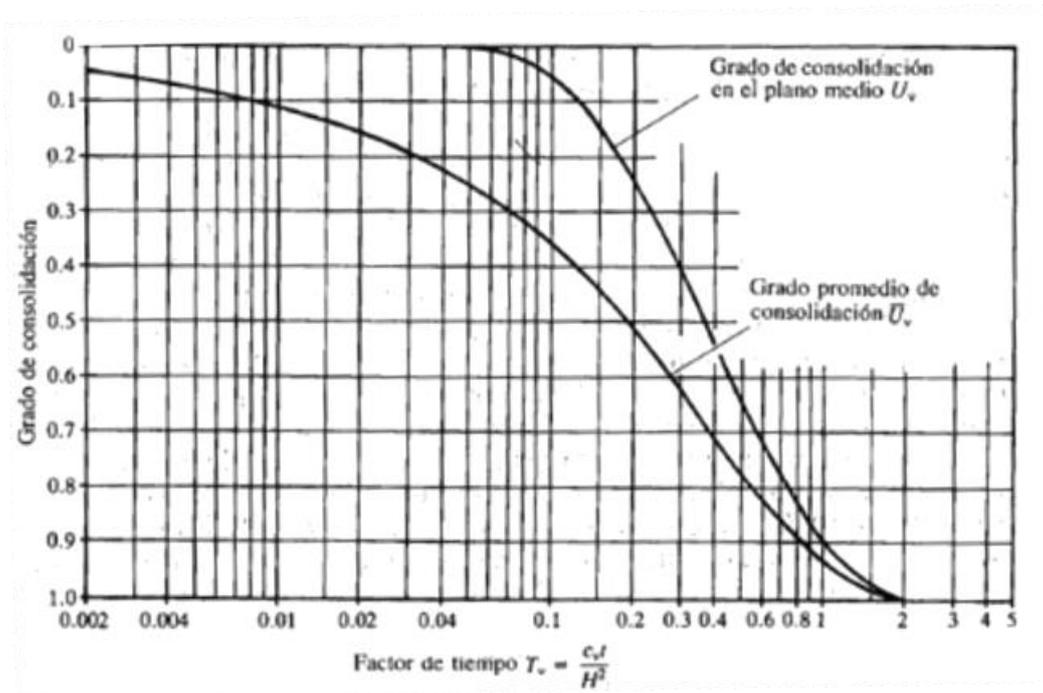


Figura 2.5 Relación entre el "factor de tiempo vertical" y "el grado promedio de consolidación"

Este es el caso teórico considerado por Terzaghi. Las deformaciones y el flujo intersticial se producen solo en la dirección vertical, y la capa de suelo se comporta como un elemento de suelo en el ensayo de consolidación de laboratorio. Entonces, a partir de la ecuación:

$$m_v = \frac{\Delta S}{\Delta D} * \frac{1}{\Delta \sigma'_v}$$

El asentamiento al final de la consolidación en la capa de suelo de un elemento como el de la Figura 2.6, está dado por:

$$\Delta S = m_v * \Delta D * \Delta \sigma'_v$$

Donde " $\Delta \sigma'_v$ " es el "incremento de esfuerzo vertical efectivo" en el elemento, " ΔD " es el "espesor" del elemento, y " m_v " es el "coeficiente de compresibilidad volumétrica" para el rango de esfuerzos efectivos correspondiente.

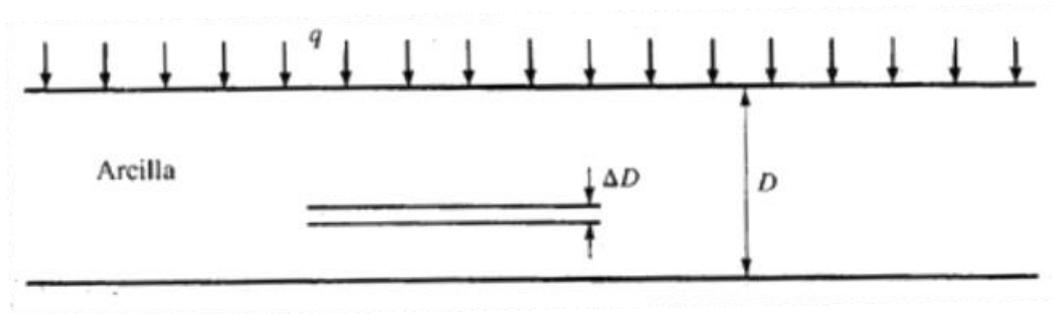


Figura 2.6 Área cargada de extensión infinita

Inicialmente se tiene que:

$$\sigma_{v0} = \sigma'_{v0} + u_h$$

Y al final de la consolidación se tiene:

$$\sigma_{vf} = \sigma'_{vf} + u_h$$

Entonces:

$$\Delta\sigma_v = \Delta\sigma'_v$$

Y por tanto:

$$\Delta S = m_v * \Delta D * \Delta\sigma'_v = m_v * \Delta D * \Delta\sigma_v$$

El asentamiento al final de la consolidación está dado por:

$$S = \sum \Delta S = \sum m_v * \Delta D * \Delta\sigma'_v = \sum m_v * \Delta D * \Delta\sigma_v$$

Se tiene además que el incremento de esfuerzos verticales totales " $\Delta\sigma_v$ " es constante con la profundidad e igual a la carga aplicada " q ". Por tanto no es necesario dividir el depósito de arcilla en varias subcapas y puede tomarse $\Delta D = D$, obteniéndose así:

$$S = m_v * \Delta D * \Delta\sigma'_v = m_v * D * \Delta\sigma'_v = m_v * D * q$$

Siendo " m_v " el valor promedio del "coeficiente de compresibilidad volumétrica" en todo punto a igual profundidad de la arcilla para el rango de esfuerzos aplicado.

Las condiciones teóricas de la deformación vertical y flujo vertical intersticial se aproximan bastante a las condiciones de campo cuando las dimensiones del área cargada son mucho mayores que la profundidad de la capa de arcilla. Por lo general este es el caso que se presenta en los terraplenes para vías y en los sistemas de aprovechamiento del terreno.

3 Metodología del ensayo de consolidación.

3.1 Aparato y procedimiento.

A través del ensayo de consolidación, simulamos las principales hipótesis de Terzaghi, es decir, la deformación vertical y el flujo vertical del agua intersticial, obteniendo así los parámetros de consolidación c_v y a_v .

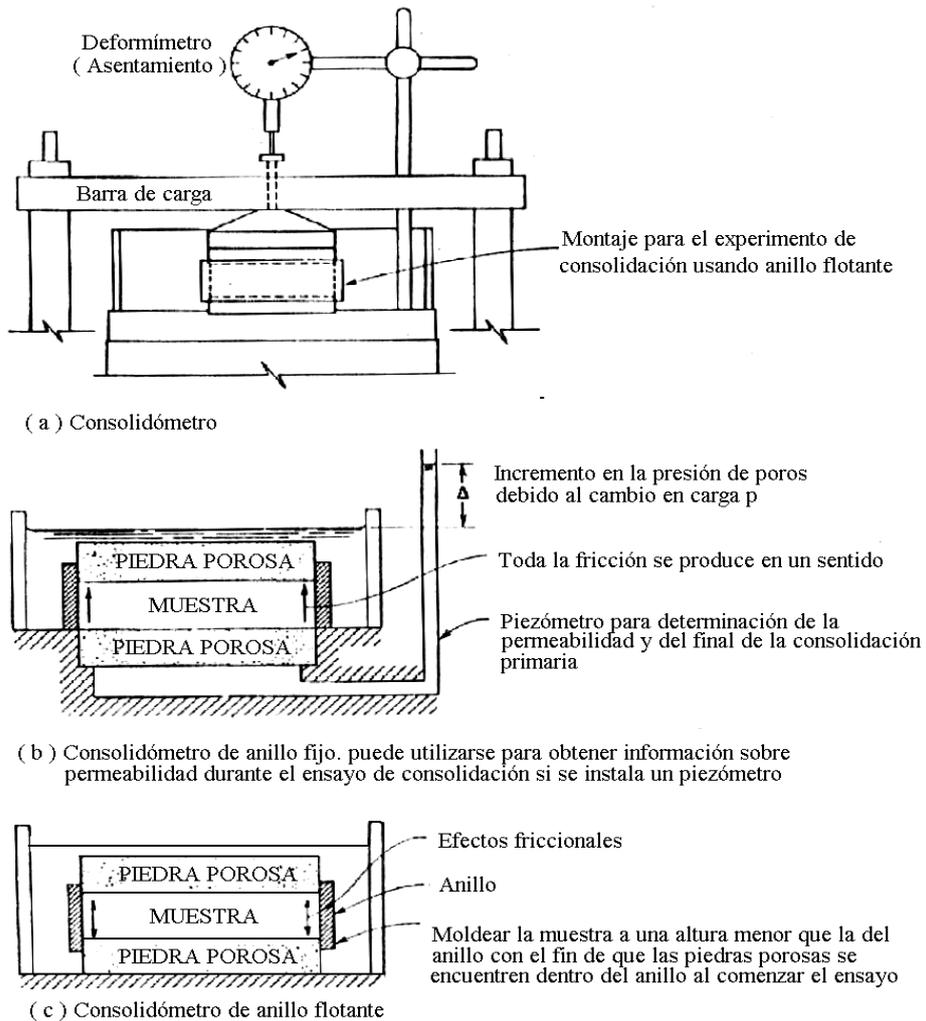


Figura 3.1 Celda de Terzaghi para consolidación con pesas.

Terzaghi, Casagrande et al, en la década de los años treinta desarrollaron la celda para la consolidación en el laboratorio que se muestra en la figura.

Como puede verse, la muestra de suelo está situada entre dos piedras porosas saturadas de agua. Dicha muestra va colocada en un anillo de 75 mm de diámetro y 20 mm de espesor.

En la parte superior de la imagen podemos ver el deformímetro, donde el aparato representa los milímetros que deforma la muestra. Se le aplica la carga por medio de una barra de carga y un brazo de palanca y pesas.

El ensayo se describe por completo en las normas BS 1377: 1975, Ensayo 17 y ASTM D-2435-70.

Rowe y Barden, en el año 1996, desarrollaron otra alternativa para medir la consolidación. La principal diferencia entre esta y la anterior es que la presión se aplica de manera hidráulica con un gato. Encima de la muestra encontramos un disco poroso donde se produce el drenaje de la muestra en sentido vertical.

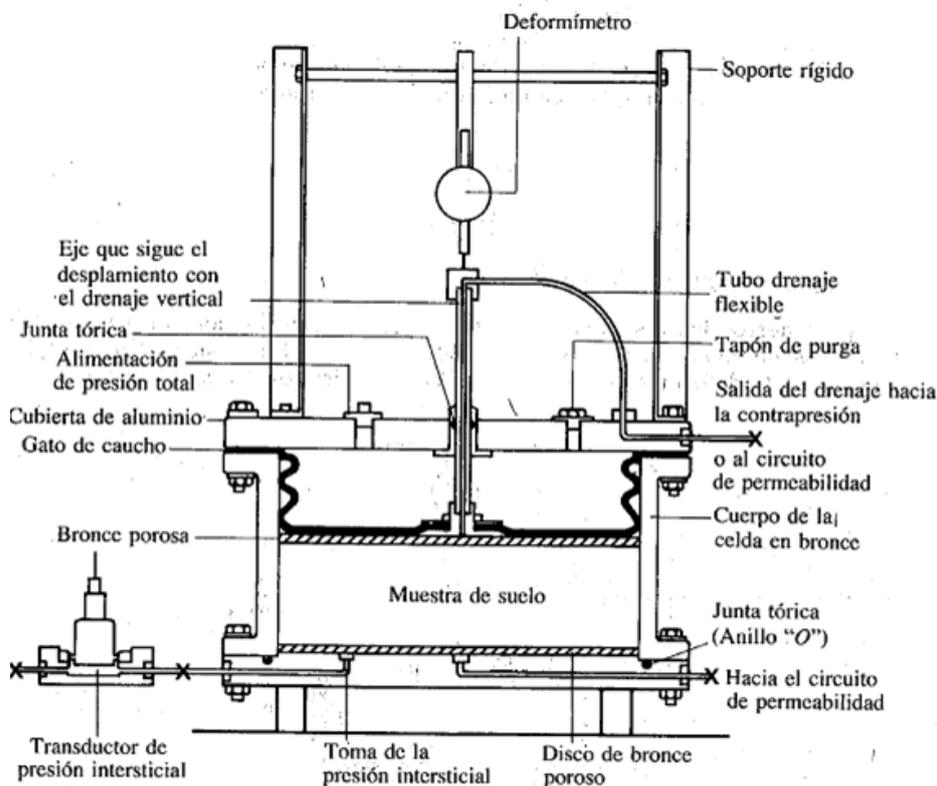


Figura 3.2 Celda hidráulica de consolidación de Rowe.

3.2 Equipos y materiales utilizados.

Para llevar a cabo el ensayo de consolidación, fueron utilizados una serie de equipos y materiales que describiremos a continuación:

- **Horno**: aparato que genera calor y lo mantiene. Nos sirve para determinar la humedad inicial, densidad seca, índice de poros, peso específico, etc.
- **Recipientes**: totalmente normalizados, para el contenido de humedad.
- **Herramientas de corte**: será necesario diferentes espátulas, sierras de alambre, así como otros elementos existentes en laboratorio para la preparación de muestras.
- **Cronometro**: elemento imprescindible para poder tomar las diferentes lecturas en los intervalos de tiempo indicados por el ensayo normalizado.
- **Piedras porosas**: con una constitución lo suficientemente fina evitando la intrusión del suelo. Estas podrán ser de óxido de aluminio, carburo de sílice o incluso algún metal que no sea atacado por la humedad ni por el suelo.
- **Dispositivos de carga**: suficientemente adecuado para mantener las cargas especificadas durante periodos prolongados, permitiendo variaciones en la carga.
- **Elementos de carga**: pesas u otros elementos para aplicar las cargas indicadas, por lo tanto, será necesario elementos de diferentes cantidades de carga.
- **Balanza**: Con una aproximación de 0,1 g o a 0,1% del peso total de la muestra.
- **Deformímetro**: donde el aparato representa la deformación producida, con una sensibilidad de 0,0025 mm (0,0001”).

3.3 Determinación de parámetros.

Normalmente, cuando se realiza un ensayo de consolidación, utilizamos muestras inalteradas de bloques sellados con parafina procedentes del campo, buscando que pierdan la mínima humedad posible. En este trabajo, hemos analizado un tipo de arcilla que se encontraba en el laboratorio, la cual queremos estudiarla.

Para ello, vamos a coger seis muestras de nuestro tipo de arcilla, realizaremos el ensayo de consolidación en el edómetro y conoceremos los valores de la humedad inicial, densidad seca, así como del peso específico relativo.

3.3.1. Determinación de la humedad inicial, densidad seca inicial, densidad relativa de las partículas e índice de poros.

- Calculo de la humedad inicial (W_0):

Cogeremos dos platos de laboratorio, uno para cada muestra, donde posteriormente echaremos la arcilla. Anteriormente habremos limpiado y pesado dichos platos de laboratorio. Una vez pesados los recipientes vacíos, vertimos las arcillas en los recipientes y anotamos la tara. Luego, introducimos dichos recipientes en la estufa durante 24 horas a 60 °C, de esta forma eliminaremos toda el agua y procederemos a calcular la humedad inicial. Una vez cumplido esta franja de tiempo, volvemos a pesar las muestras. De esta forma, habremos obtenido los siguientes resultados, calculando la humedad inicial en nuestras seis muestras.

Datos Muestra 1

Muestra antes de consolidar	
Humedad inicial (w_0)	
Peso anillo de corte	60,47 g
Peso anillo de corte + muestra (0h)	167,12 g
Peso anillo de corte + muestra (24h)	135,55 g
Peso muestra (0h)	106,65 g
Peso muestra (24h)	75,08 g
Peso del agua (W_w)	31,57 g
Peso del suelo (W_s)	75,08 g
Humedad inicial	42,0484816 %

Datos Muestra 2

Muestra antes de consolidar	
Humedad inicial (w_0)	
Peso anillo de corte	60,99 g
Peso anillo de corte + muestra (0h)	166,15 g
Peso anillo de corte + muestra (24h)	135,02 g
Peso muestra (0h)	105,16 g
Peso muestra (24h)	74,03 g
Peso del agua (Ww)	31,13 g
Peso del suelo (Ws)	74,03 g
Humedad inicial	42,0505201 %

Datos Muestra 3

Muestra antes de consolidar	
Humedad inicial (w_0)	
Peso anillo de corte	60,47 g
Peso anillo de corte + muestra (0h)	163,86 g
Peso anillo de corte + muestra (24h)	131,5 g
Peso muestra (0h)	103,38 g
Peso muestra (24h)	71,02 g
Peso del agua (Ww)	32,36 g
Peso del suelo (Ws)	71,02 g
Humedad inicial	45,5646297 %

Datos Muestra 4

Muestra antes de consolidar	
Humedad inicial (w_0)	
Peso anillo de corte	60,99 g
Peso anillo de corte + muestra (0h)	165,25 g
Peso anillo de corte + muestra (24h)	134,12 g
Peso muestra (0h)	104,26 g
Peso muestra (24h)	73,13 g
Peso del agua (Ww)	31,13 g
Peso del suelo (Ws)	73,13 g
Humedad inicial	42,5680295 %

Datos Muestra 5

Muestra antes de consolidar	
<u>Humedad inicial (w_o)</u>	
Peso anillo de corte	60,99 g
Peso anillo de corte + muestra (0h)	160,09 g
Peso anillo de corte + muestra (24h)	133,62 g
Peso muestra (0h)	99,1 g
Peso muestra (24h)	72,63 g
Peso del agua (Ww)	26,47 g
Peso del suelo (Ws)	72,63 g
Humedad inicial	36,4449952 %

Datos Muestra 6

Muestra antes de consolidar	
<u>Humedad inicial (w_o)</u>	
Peso anillo de corte	60,47 g
Peso anillo de corte + muestra (0h)	156,9 g
Peso anillo de corte + muestra (24h)	96,43 g
Peso muestra (0h)	71,19 g
Peso muestra (24h)	72,63 g
Peso del agua (Ww)	25,24 g
Peso del suelo (Ws)	71,19 g
Humedad inicial	35,4544178 %

- Calculo de la densidad seca inicial (ρ_d):

Una vez obtenidos los resultados anteriores, procedemos a calcular la densidad seca inicial (ρ_d).

Datos Muestra 1

Densidad seca inicial (ρ_d)	
Masa seca de la probeta (m_d)	75,08 g
Diámetro anillo de corte	5 cm
Área (A)	19,6349544 m ²
Altura del anillo (H_o)	3 cm
ρ_d	1,27459765 g/cm³

Datos Muestra 2

Densidad seca inicial (ρ_d)	
Masa seca de la probeta (m_d)	74,03 g
Diámetro anillo de corte	5 cm
Área (A)	19,6349544 m ²
Altura del anillo (H_o)	3 cm
ρ_d	1,25677229 g/cm³

Datos Muestra 3

Densidad seca inicial (ρ_d)	
Masa seca de la probeta (m_d)	71,02 g
Diámetro anillo de corte	5 cm
Área (A)	19,6349544 m ²
Altura del anillo (H_o)	3 cm
ρ_d	1,20567295 g/cm³

Datos Muestra 4

Densidad seca inicial (ρ_d)	
Masa seca de la probeta (m_d)	73,13 g
Diámetro anillo de corte	5 cm
Área (A)	19,6349544 m ²
Altura del anillo (H_o)	3 cm
ρ_d	1,24149342 g/cm³

Datos Muestra 5

Densidad seca inicial (ρ_d)	
Masa seca de la probeta (m_d)	72,63 g
Diámetro anillo de corte	5 cm
Área (A)	19,6349544 m ²
Altura del anillo (H_o)	3 cm
ρ_d	1,23300516 g/cm³

Datos Muestra 6

Densidad seca inicial (ρ_d)	
Masa seca de la probeta (m_d)	71,19 g
Diámetro anillo de corte	5 cm
Área (A)	19,6349544 m ²
Altura del anillo (H_o)	3 cm
ρ_d	1,20855896 g/cm³

- Calculo de la densidad relativa de las partículas (G_s):

Para el cálculo de la densidad relativa de las partículas (G_s), se utilizará el ensayo del picnómetro, método muy sencillo en el cual llenamos el picnómetro con agua hasta el enrase y tomamos la primera pesada (M1). Después vaciamos el picnómetro aproximadamente la mitad de lo anteriormente llenado y volvemos a pesar (M2). Más tarde, en el picnómetro vertimos la muestra seleccionada y pesamos (M3). Posteriormente eliminamos del picnómetro todas las burbujas, y dejamos reposar durante 24 horas. Finalmente, y pasado este espacio de tiempo introducimos agua hasta el enrase del picnómetro y lo pesamos (M4).

Una vez obtenidas estas medidas y partiendo de la teoría conocida durante las asignaturas correspondientes obtenemos:

$$\text{Masa del árido} = M3 - M2$$

$$\text{Volumen del líquido} = (M3 - M2) - (M4 - M1) / Q$$

Resumiendo:

$$G_s = (M3 - M2) / [(M3 - M2) + (M1 - M4)]$$

Densidad relativa de las partículas (G_s)	
M1	161,45 g
M2	104,66 g
M3	114,08 g
M4	167,18 g
G_s	2,55284553

- Cálculo del índice de poros inicial (e_0):

Ahora, recopilando los datos obtenidos anteriormente, calcularemos el índice de poros inicial (e_0) para cada una de las seis muestras.

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

Muestra	Índice de poros inicial (e_0)
1	1,002
2	1,031
3	1,117
4	1,056
5	1,070
6	1,112

3.3.2. Búsqueda del límite líquido.

Para comenzar a realizar el ensayo de consolidación, necesitamos buscar el límite líquido de las muestras a ensayar. Basándonos en la normativa británica y a través del penetrómetro buscamos una penetración del cono de unos 20 mm, transcurridos 5 segundos.



A continuación, mostraremos una tabla con las medidas tomadas por el penetrómetro para nuestras seis muestras:

Muestra	Medida del Penetrómetro(mm)
1	19,5
2	20,5
3	21,3
4	21
5	19,8
6	19,5

3.4 Ensayo de consolidación.

Acorde a la Norma UNE 103-405-9, debemos conocer antes de nada las medidas, así como el peso del anillo donde ira introducida la muestra. A continuación, procedemos a introducirla, volvemos a pesar y calculando así fácilmente la cantidad de muestra a ensayar.

Como se ha visto anteriormente, la muestra estará rodeada de muestras porosas, las cuales saturaremos totalmente al llenar de agua la cámara de consolidación, habiendo previamente ajustado y nivelado la balanza de carga.

A continuación, ajustamos el micrómetro a 0 y comenzamos con el primer escalón o escalón de precarga. Este proceso lo haremos para las seis muestras de nuestro tipo de arcilla.

Para cada una de las seis muestras aplicaremos unas diferentes fases de precarga, carga y descarga. En la fase de precarga, introducimos una carga en el brazo multiplicador durante un periodo de 24 horas para que la arcilla asiente bien en el anillo del edómetro, y ésta esté preparada para los escalones de carga y descarga. Transcurridas las 24 horas, tomaremos nota de la medida y pasaremos al escalón de carga.

En los escalones de carga, aumentaremos la carga en el multiplicador, y atentamente con el cronometro listo y a la mano, comenzaremos a anotar medidas de deformación en los tiempos de 5, 10, 15, 20, 30, y 45 segundos., 1, 1`5, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 480, 900, y 1440 minutos, sobre una plantilla anteriormente realizada para facilitar la anotación de dichos datos, sobre todo en los intervalos de tiempo más breves.

En los escalones de descargar, disminuirémos la carga en el multiplicador y repetiremos el mismo proceso que se da en el escalón de carga.

En nuestro caso, vamos a realizar una serie de escalones para seis muestras de nuestro tipo de arcilla. A continuación, se mostrarán los diferentes tipos de carga aplicados.

Muestra 1

Escalones de carga		
	Carga inicial (kN/m ²)	Carga final (kN/m ²)
Precarga	0	25
Escalón de carga nº 1	25	200
Escalón de descarga nº 2	200	100
Escalón de descarga nº 3	100	25

Muestra 2

Escalones de carga		
	Carga inicial (kN/m ²)	Carga final (kN/m ²)
Precarga	0	25
Escalón de carga nº 1	25	100
Escalón de descarga nº 2	100	25
Escalón de descarga nº 3	25	12,5

Muestra 3

Escalones de carga		
	Carga inicial (kN/m ²)	Carga final (kN/m ²)
Precarga	0	25
Escalón de carga nº 1	25	200
Escalón de carga nº 2	200	400
Escalón de descarga nº 3	400	150
Escalón de descarga nº 4	150	25

Muestra 4

Escalones de carga		
	Carga inicial (kN/m ²)	Carga final (kN/m ²)
Precarga	0	25
Escalón de carga nº 1	25	150
Escalón de carga nº 2	150	300
Escalón de descarga nº 3	300	125
Escalón de descarga nº 4	125	25

Muestra 5

Escalones de carga		
	Carga inicial (kN/m ²)	Carga final (kN/m ²)
Precarga	0	12,5
Escalón de carga nº 1	12,5	37,5
Escalón de carga nº 2	37,5	62,5
Escalón de descarga nº 3	62,5	12,5

Muestra 6

Escalones de carga		
	Carga inicial (kN/m ²)	Carga final (kN/m ²)
Precarga	0	12,5
Escalón de carga nº 1	12,5	50
Escalón de carga nº 2	50	75
Escalón de descarga nº 3	75	25

Las mediciones se realizan hasta que la velocidad de deformación se reduzca prácticamente a cero, o sea cuando se haya sobrepasado la consolidación primaria y se encuentra la consolidación secundaria, lo que podrá determinarse en los gráficos de consolidación, realizados durante la ejecución del mismo.

Para la mayoría de las arcillas el período necesario de aplicación de la carga para obtener el cien por ciento de consolidación es de 24 horas. Tras obtener la lectura final de un escalón, se prosigue el ensayo aplicando cargas en una progresión, registrándose lecturas de tiempo y de deformaciones verticales como en el punto anterior.

Conocidos los datos e introducidos en la hoja programada para el trabajo, realizamos dos graficas en cada uno de los escalones, una para el Método del Logaritmo del Tiempo, y la otra para el Método de la raíz del Tiempo.

A continuación, vamos a ver dos ejemplos, un escalón de carga de la muestra 3 y otro escalón de descarga de la muestra 6.

Muestra 3. Escalón nº 2

Nos encontramos ante un escalón de carga. A continuación, explicaremos el procedimiento llevado a cabo en nuestra hoja de cálculo programada, donde lo hemos obtenido todo, coeficientes, graficas, etc.

En primer lugar, se muestra el escalón en el que estamos, la fecha en la que se realizó dicho escalón, así como la altura inicial, es decir, la altura obtenida después del escalón anterior.

Escalón de carga Nº	2	
Fecha	29/03/2017	
H muestra inicial	15,949	mm

A continuación, se muestra una tabla de las cargas aplicada en el escalón, así como su equivalencia real por el multiplicador de carga y la equivalencia en distintas unidades de presión aplicada.

Escalón de carga						
	Peso aplicado kg	Relación de carga	Carga aplicada kg	Presión kg/cm ²	Presión N/m ²	Presión kN/m ²
Carga inicial	4	10	40	2,037	199847,676	200
Incremento de carga	4	10	40	2,037	199847,676	200
Carga final	8	10	80	4,074	399695,352	400

Ejemplo de escalón de carga (Muestra 3, escalón nº2)

Como último apartado antes de aplicar los dos métodos para obtener los coeficientes, vamos a exponer una tabla resumen de los diferentes intervalos donde se toman las lecturas, así como las deformaciones producidas en cada intervalo y la altura instantánea.

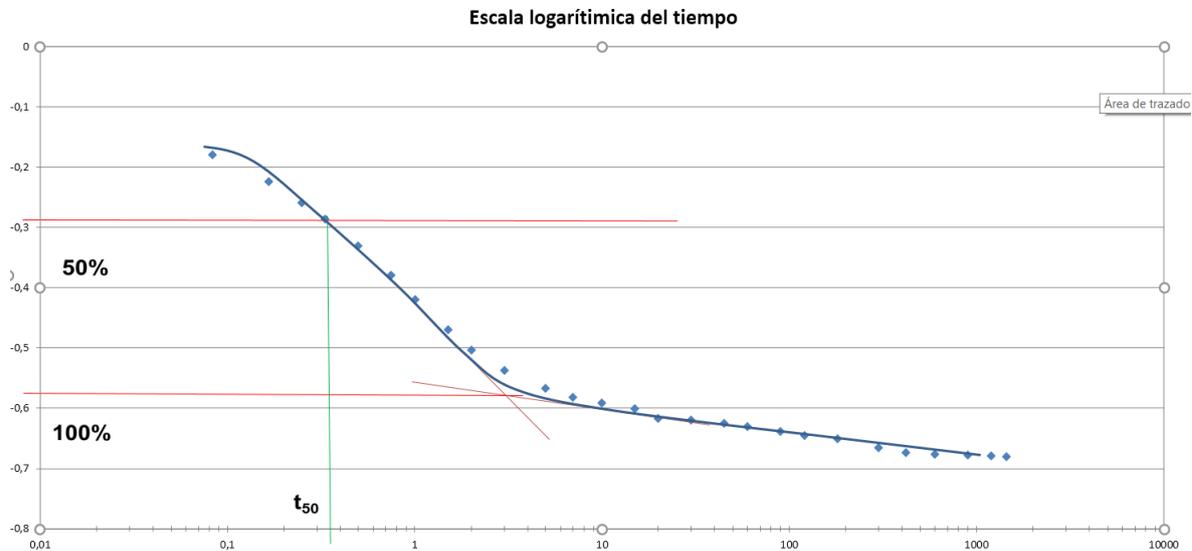
Tiempo		Tiempo (minutos)	Deformación muestra mm	H instantáneo mm
5	s	0,083333333	-0,179	15,77
10	s	0,166666667	-0,224	15,725
15	s	0,25	-0,259	15,69
20	s	0,333333333	-0,286	15,663
30	s	0,5	-0,331	15,618
45	s	0,75	-0,379	15,57
1	min	1	-0,419	15,53
1,5	min	1,5	-0,469	15,48
2	min	2	-0,504	15,445
3	min	3	-0,537	15,412
5	min	5	-0,567	15,382
7	min	7	-0,582	15,367
10	min	10	-0,591	15,358
15	min	15	-0,601	15,348
20	min	20	-0,617	15,332
30	min	30	-0,619	15,33
45	min	45	-0,625	15,324
1	hora	60	-0,63	15,319
1,5	horas	90	-0,638	15,311
2	horas	120	-0,645	15,304
3	horas	210	-0,651	15,298
5	horas	270	-0,666	15,283
7	horas	390	-0,674	15,275
10	horas	510	-0,676	15,273
15	horas	690	-0,677	15,272
20	horas	1200	-0,679	15,27
24	horas	1440	-0,68	15,269

Ejemplo de escalón de carga (Muestra 3, escalón nº 2)

Con los datos de esta última tabla construimos dos gráficas, una para cada método, las cuales vamos a comentar a continuación.

❖ Método del logaritmo del tiempo.

A partir de la gráfica de la deformación contra el logaritmo del tiempo, vamos a obtener el coeficiente de consolidación. Extraemos de cada uno el tiempo correspondiente al 50% de la consolidación primaria.



Ejemplo de escalón de carga (Muestra3, escalón nº 2)

Una vez obtenido el tiempo para un grado de consolidación promedio del 50%, se utiliza la siguiente expresión para la determinación del coeficiente de consolidación para cada incremento de carga:

$$C_v = \frac{0,197 H^2}{t_{50}}$$

Conocido t_{50} , a través de la gráfica, la única incógnita a descubrir sería H^2 ; esta se resuelve calculando la trayectoria de drenaje promedio más larga durante la consolidación. En nuestro caso al drenar por arriba y por abajo, sería:

$$H = \frac{H_{media}}{2} = \frac{\frac{H_{inicial} - H_{final}}{2}}{2} = \frac{15,949 - 15,269}{2} = 7,8045mm.$$

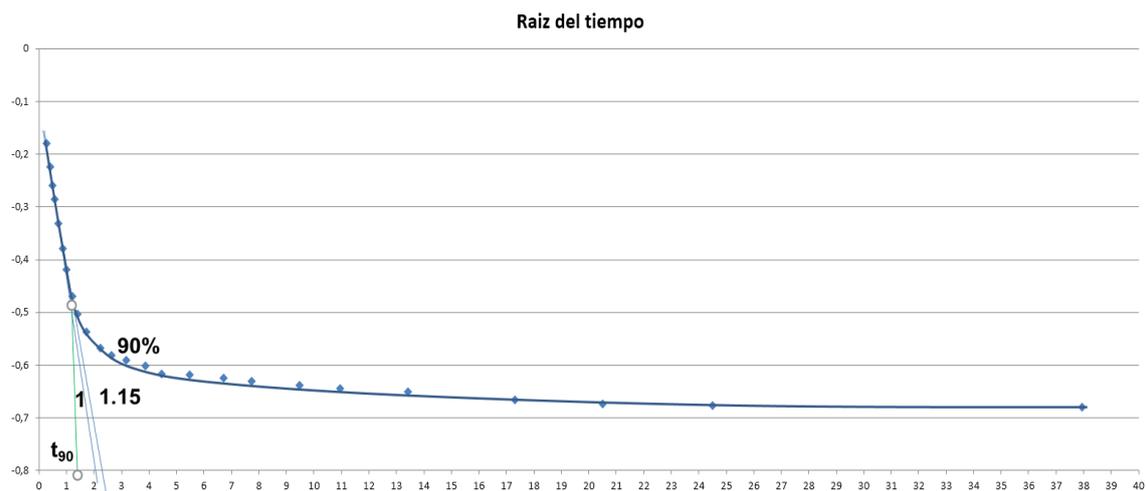
Por lo tanto, en este caso el valor de C_v , sería de:

$$C_v = \frac{0,197 * 7,8045^2}{0,4} = 29,998 \text{ mm}^2 / \text{min} = 15,767 \text{ m}^2 / \text{año}$$

❖ Método de la raíz del tiempo.

Este método fue propuesto por Taylor, en el cual dedujo que trazando una recta desde el origen pasando por el punto del 90% de consolidación, tiene una abscisa con un valor de 1,15 veces la abscisa correspondiente a la línea recta inicial.

Gráficamente, puede observarse de forma clara el procedimiento a llevar a cabo. Trazamos una tangente inicial, se prolonga hasta que corte al eje. Esa medida será multiplicada por 1,15 y se une esa nueva medida con el origen de la recta anterior. Esta nueva recta cortara la curva, considerando este punto el 90% de consolidación. Trazando una perpendicular al eje x, obtendremos el valor de t_{90} .



Ejemplo de escalón de carga (Muestra 3, escalón nº 2)

Una vez conocido el valor del tiempo, calculamos el coeficiente de la siguiente manera:

$$C_v = \frac{0,848 H^2}{t_{90}}$$

Considerando el valor de H el mismo para los dos métodos, el valor de C_v será por tanto en este caso de:

$$C_v = \frac{0,848 \times 7,8045^2}{1,96} = 26,353 \text{ mm}^2 / \text{min} = 13,851 \text{ m}_2 / \text{año}$$

Muestra 6. Escalón nº 3

Nos encontramos ante un escalón de descarga. A continuación, nuevamente explicaremos el procedimiento llevado a cabo en nuestra hoja de cálculo programada, donde lo hemos obtenido todo, coeficientes, graficas, etc.

En primer lugar, se muestra el escalón en el que estamos, la fecha en la que se realizó dicho escalón, así como la altura inicial, es decir, la altura obtenida después del escalón anterior.

Escalón de carga Nº	3	
Fecha	28/04/2017	
H muestra inicial	17,232	mm

Luego, al igual que en los escalones de carga, redactamos una tabla de las cargas aplicada en el escalón, así como su equivalencia real por el multiplicador de carga y la equivalencia en distintas unidades de presión aplicada.

Escalón de carga						
	Peso aplicado kg	Relación de carga	Carga aplicada kg	Presión kg/cm ²	Presión N/m ²	Presión kN/m ²
Carga inicial	1,5	10	15	0,764	74942,9	75
Incremento de carga	-1	10	-10	-0,509	49961,9	-50
Carga final	0,5	10	5	0,255	24981,0	25

Ejemplo de escalón de descarga (Muestra 6, escalón nº 3)

En el caso de los escalones de descarga, los intervalos de tiempo son similares a los escalones de carga, por lo que la deformación producida en este escalón se muestra en la siguiente tabla:

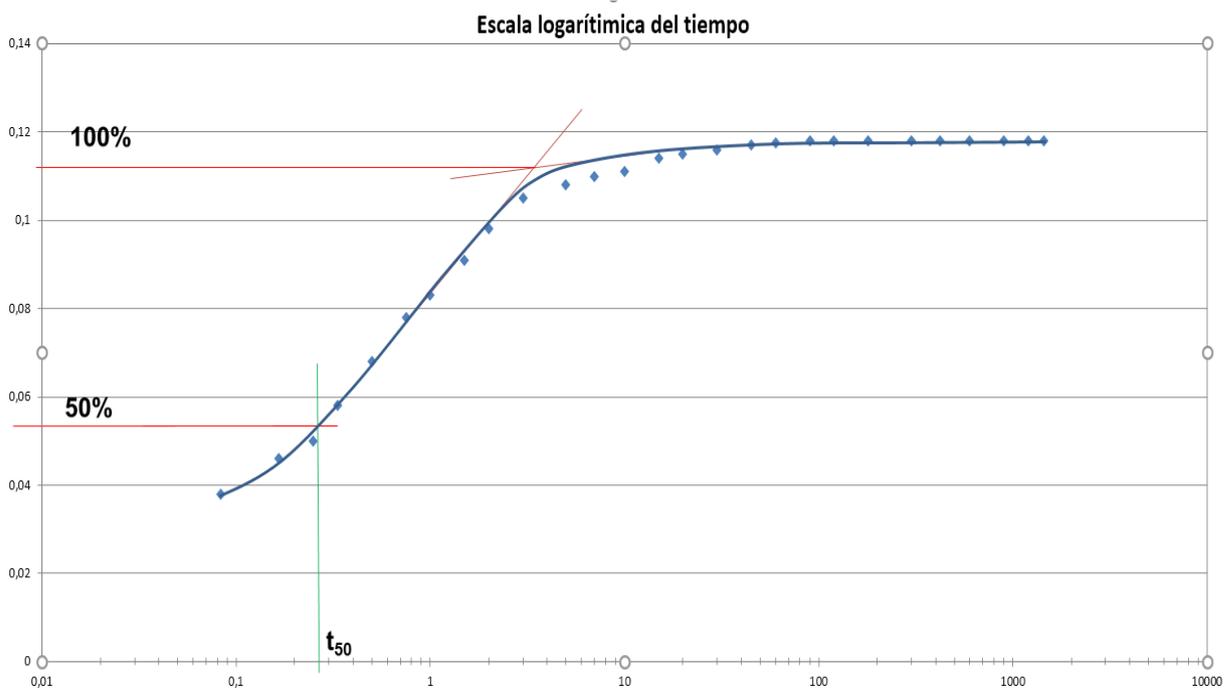
Tiempo		Tiempo (minutos)	Deformación muestra mm	Hinstantaneo mm
5	s	0,083333333	0,038	17,27
10	s	0,166666667	0,046	17,278
15	s	0,25	0,05	17,282
20	s	0,333333333	0,058	17,29
30	s	0,5	0,068	17,3
45	s	0,75	0,078	17,31
1	min	1	0,083	17,315
1,5	min	1,5	0,091	17,323
2	min	2	0,098	17,33
3	min	3	0,105	17,337
5	min	5	0,108	17,34
7	min	7	0,11	17,342
10	min	10	0,111	17,343
15	min	15	0,114	17,346
20	min	20	0,115	17,347
30	min	30	0,116	17,348
45	min	45	0,117	17,349
1	hora	60	0,1175	17,3495
1,5	horas	90	0,118	17,35
2	horas	120	0,118	17,35
4	horas	180	0,118	17,35
6	horas	300	0,118	17,35
8	horas	420	0,118	17,35
10	horas	600	0,118	17,35
12	horas	900	0,118	17,35
20	horas	1200	0,118	17,35
24	horas	1440	0,118	17,35

Ejemplo de escalón de descarga (Muestra 6, escalón nº 3)

Con los datos de esta última tabla construimos dos gráficas, una para cada método, las cuales vamos a comentar a continuación.

❖ Método del logaritmo del tiempo.

A partir de la gráfica de la deformación contra el logaritmo del tiempo, vamos a obtener el coeficiente de consolidación. Extraemos de cada uno el tiempo correspondiente al 50% de la consolidación primaria. Utilizamos el mismo procedimiento que con los escalones de carga, pero considerando el 100% en la parte superior de la gráfica, al obtener una gráfica inversa como podemos ver a continuación.



Ejemplo de escalón de descarga (Muestra 6, escalón nº 3)

Conocido t_{50} , a través de la gráfica, la única incógnita a descubrir sería H^2 ; esta se resuelve calculando la trayectoria de drenaje promedio más larga durante la consolidación. En nuestro caso al drenar por arriba y por abajo, sería:

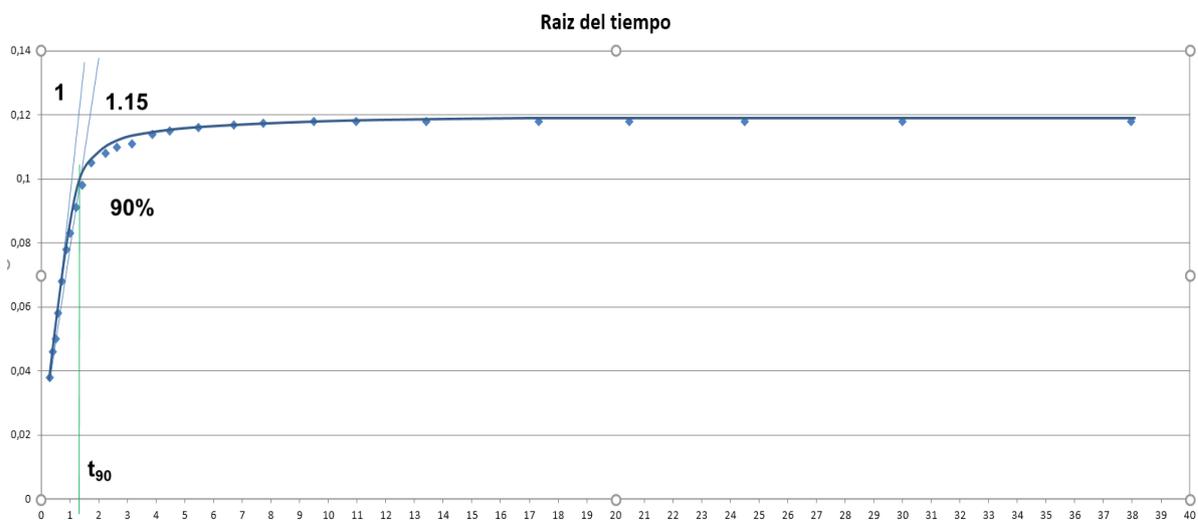
$$H = \frac{H_{media}}{2} = \frac{H_{inicial} - H_{final}}{2} = \frac{17,232 - 17,35}{2} = 8,6455 \text{ mm.}$$

Por lo tanto, el valor del coeficiente de consolidación será de:

$$C_V = \frac{0,197 \times 8,6455^2}{8} = 52,588 \text{ mm}^2 / \text{min} = 27,640 \text{ m}_2 / \text{año}$$

❖ Método de la raíz del tiempo.

En el caso de los escalones de descarga, y al igual que sucede en el método anterior; vamos a obtener una gráfica inversa a la escala de carga. Por lo tanto seguiremos el mismo procedimiento pero bastara con trazar la tangente hacia el eje superior y repetir el procedimiento, como se observa en el grafico del ejemplo.



Ejemplo de escalón de descarga (Muestra 6, escalón n°3)

Una vez conocido el valor del tiempo, calculamos el coeficiente de la siguiente manera:

$$C_V = \frac{0,848 H^2}{t_{90}}$$

De esta forma, el valor del coeficiente es de:

$$C_V = \frac{0,848 \times 8,6455^2}{1,3225} = 47,927 \text{ mm}^2 / \text{min} = 25,190 \text{ m}_2 / \text{año}$$

3.4.1. Resumen de resultados.

A continuación, mostraremos el resumen de los resultados obtenidos en cada una de las seis muestras ensayadas.

➤ **Muestra 1**

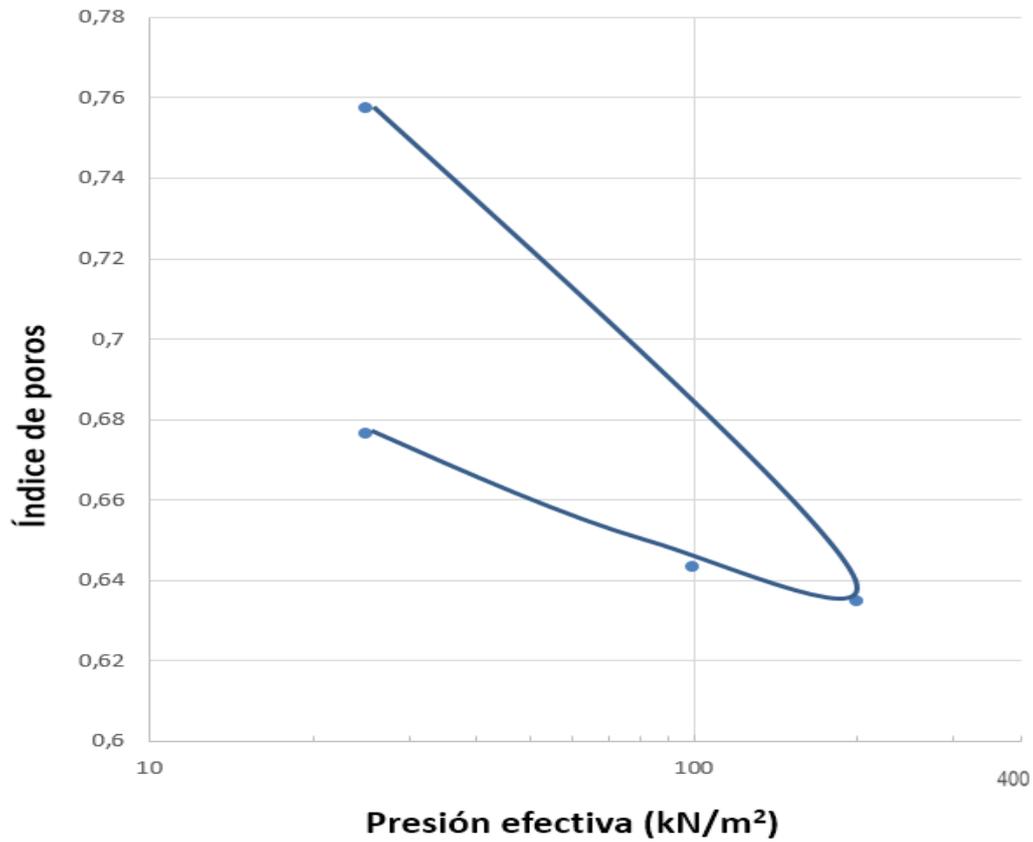
❖ ***Coefficientes de consolidación.***

Coeficiente de consolidación c_v					
Escalon	Logaritmo del tiempo	Raiz del tiempo	Media	σ'_o (kN/m ²)	σ'_f (kN/m ²)
1	12,803	11,060	11,932	25,0	200
2 (cs)	57,784	13,266	35,525	200	100
3 (cs)	12,698	9,447	11,073	100	25

Tabla resumen de coeficientes de consolidación (Muestra I)

❖ ***Curva edométrica.***

Muestra 1	H_f (mm)	σ' (kN/m ²)	e
Inicio	20	0	1,002863831
Precarga	17,55	24,9809595	0,757513012
Escalón 01	16,324	199,847676	0,634737459
Escalón 02	16,4095	99,92383799	0,643299702
Escalón 03	16,739	24,9809595	0,676296883



Curva Edométrica (Muestra 1)

❖ ***Coefficiente de compresibilidad, índice de poros y permeabilidad.***

	a_v (m²/kN)	c_v (m²/año)	e (e_m)	γ_w (KN/m³)	k_v (m/año)
Escalón 01	0,000702109	11,93	0,70	9,8	0,048402788
Escalón 02	8,56877E-05	35,52	0,64	9,8	0,018200847
Escalón 03	0,000440298	11,07	0,66	9,8	0,028785577

➤ **Muestra 2**

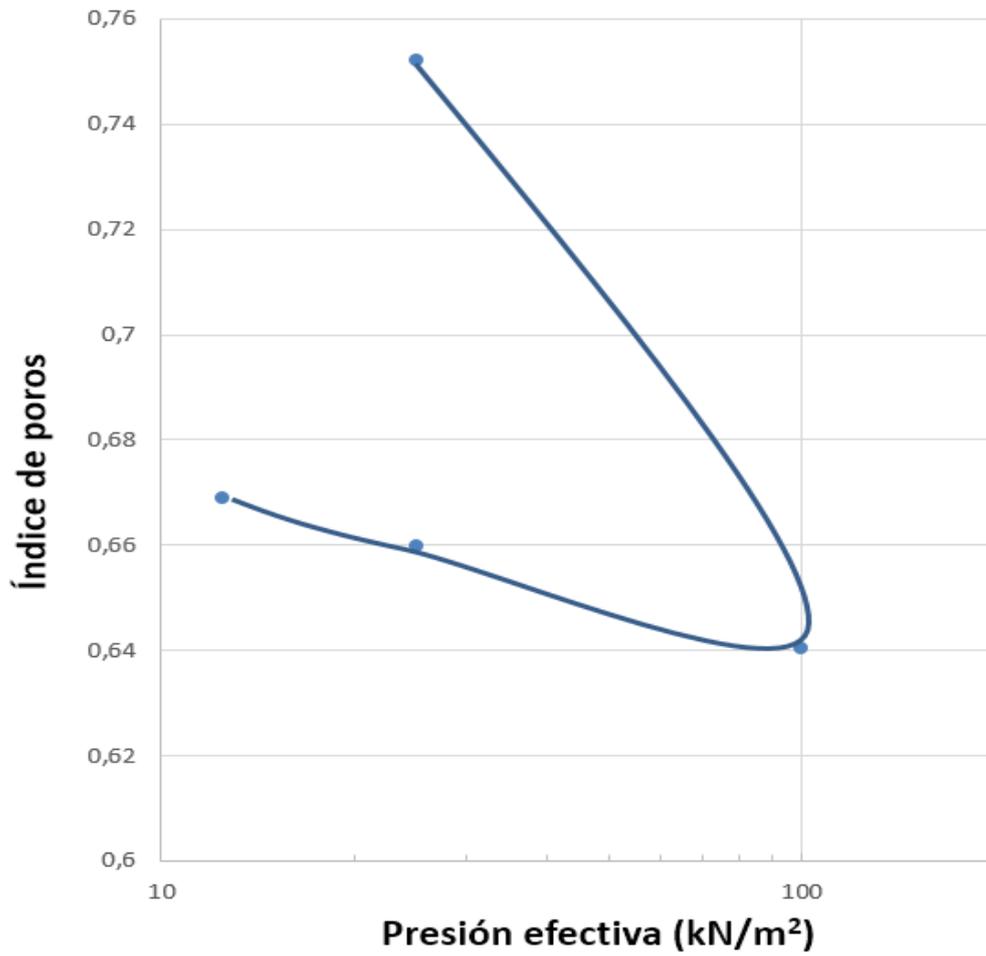
❖ ***Coefficientes de consolidación.***

Coeficiente de consolidación c_v					
Escalón	Logaritmo del tiempo	Raiz del tiempo	Media	σ'_o (kN/m ²)	σ'_f (kN/m ²)
1	9,756	7,047	8,401	25	100
2(c_s)	11,580	11,488	11,534	100	25
3(c_s)	8,689	8,289	8,489	25	12

Tabla resumen de coeficientes de consolidación (Muestra 2)

❖ ***Curva edométrica***

Muestra 2	H_f (mm)	σ' (kN/m ²)	e
Inicio	20	0	1,031271328
Precarga	17,25	25	0,751971521
Escalón 01	16,15	100	0,640251598
Escalón 02	16,342	25	0,659751802
Escalón 03	16,432	12	0,668892523



Curva Edométrica (Muestra 2)

❖ ***Coefficiente de compresibilidad, índice de poros y permeabilidad.***

	a_v (m^2/kN)	c_v ($\text{m}^2/\text{año}$)	e (e_m)	γ_w (KN/m^3)	k_v ($\text{m}/\text{año}$)
Escalón 01	0,001490734	8,40	0,70	9,8	0,07236286
Escalón 02	0,000260201	11,53	0,65	9,8	0,01782491
Escalón 03	0,000731815	8,48	0,66	9,8	0,03657948

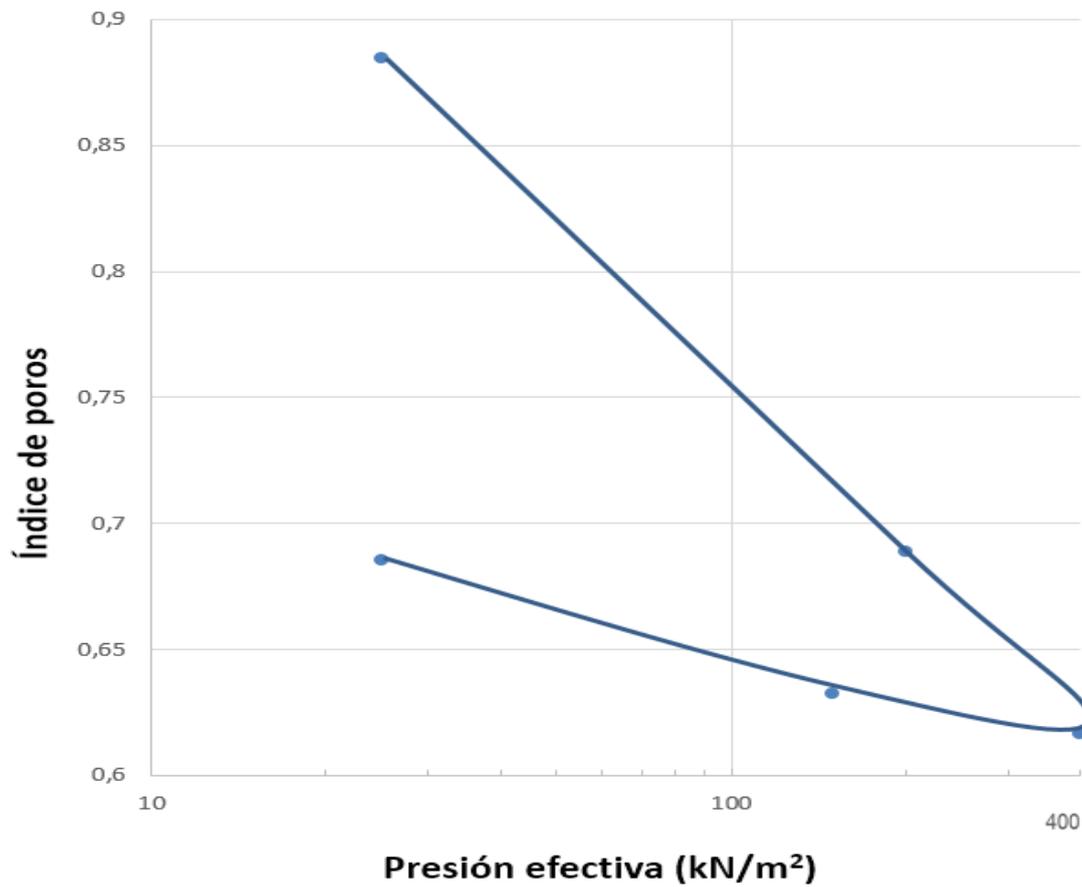
➤ **Muestra 3**❖ ***Coefficientes de consolidación.***

Coeficiente de consolidación c_v					
Escalón	Logaritmo del tiempo	Raiz del tiempo	Media	σ'_o (kN/m ²)	σ'_f (kN/m ²)
1	13,650	9,793	11,721	25	200
2	15,767	13,851	14,809	200	400
3(c _s)	33,859	27,883	30,871	400	150
4 (c _s)	7,477	7,578	7,528	150	25

Tabla resumen de coeficientes de consolidación (Muestra 3)

❖ ***Curva edométrica.***

Muestra 3	H _f (mm)	σ' (kN/m ₂)	e
Inicio	20	0	1,117361538
Precarga	17,80	25,00	0,884451769
Escalón 01	15,95	200,00	0,688489959
Escalón 02	15,27	400,00	0,616499666
Escalón 03	15,42	150,00	0,632432812
Escalón 04	15,92	25,00	0,685313916



Curva Edométrica (Muestra 3)

❖ **Coficiente de compresibilidad, índice de poros y permeabilidad.**

	a_v (m ² /kN)	c_v (m ² /año)	e (e_m)	γ_w (KN/m ³)	k_v (m/año)
Escalón 01	0,001120635	11,72	0,79	9,8	0,07205641
Escalón 02	0,000360226	14,80	0,65	9,8	0,03163661
Escalón 03	6,37812E-05	30,87	0,62	9,8	0,0118785
Escalón 04	0,000423371	7,52	0,66	9,8	0,01882798

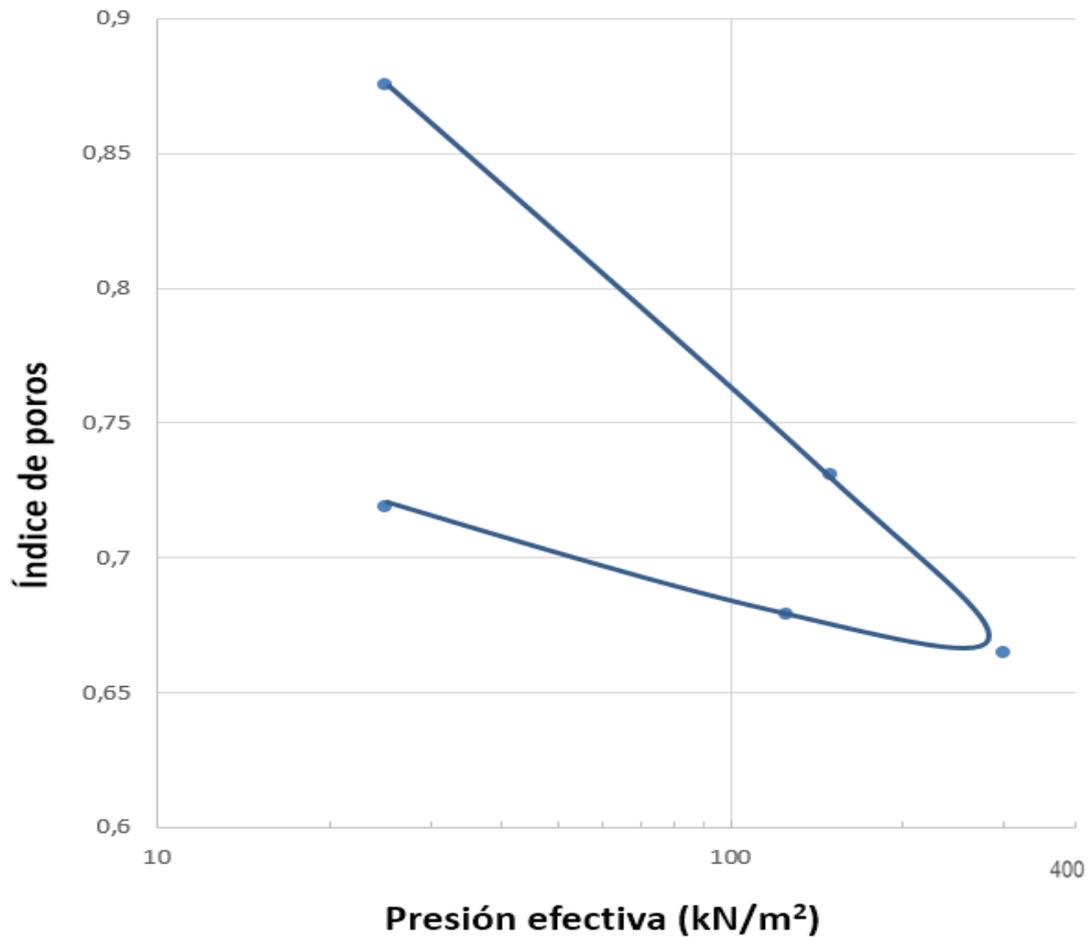
➤ **Muestra 4**❖ ***Coefficientes de consolidación.***

Coeficiente de consolidación c_v					
Escalón	Logaritmo del tiempo	Raiz del tiempo	Media	σ'_o (kN/m ²)	σ'_f (kN/m ²)
1	12,063	9,493	10,778	25	150
2	12,833	10,513	11,673	150	300
3(c_s)	28,516	26,782	27,649	300	125
4 (c_s)	8,834	7,606	8,220	125	25

Tabla resumen de coeficientes de consolidación (Muestra 4)

❖ ***Curva edométrica.***

Muestra 4	H_f (mm)	σ' (kN/m ²)	e
Inicio	20	0	1,056269881
Precarga	18,24	25	0,875318132
Escalón 01	16,84	150	0,730865173
Escalón 02	16,19	300	0,664550469
Escalón 03	16,33	125	0,678944358
Escalón 04	16,72	25	0,71873318



Curva Edométrica (Muestra 4)

❖ **Coefficiente de compresibilidad, índice de poros y permeabilidad.**

	a_v (m ² /kN)	c_v (m ² /año)	e (e_m)	γ_w (KN/m ³)	k_v (m/año)
Escalón 01	0,001156504	10,78	0,8	9,8	0,06774847
Escalón 02	0,000442435	11,67	0,7	9,8	0,029811899
Escalón 03	8,23E-05	27,65	0,67	9,8	0,013341531
Escalón 04	0,000398191	8,22	0,7	9,8	0,018881558

➤ **Muestra 5**

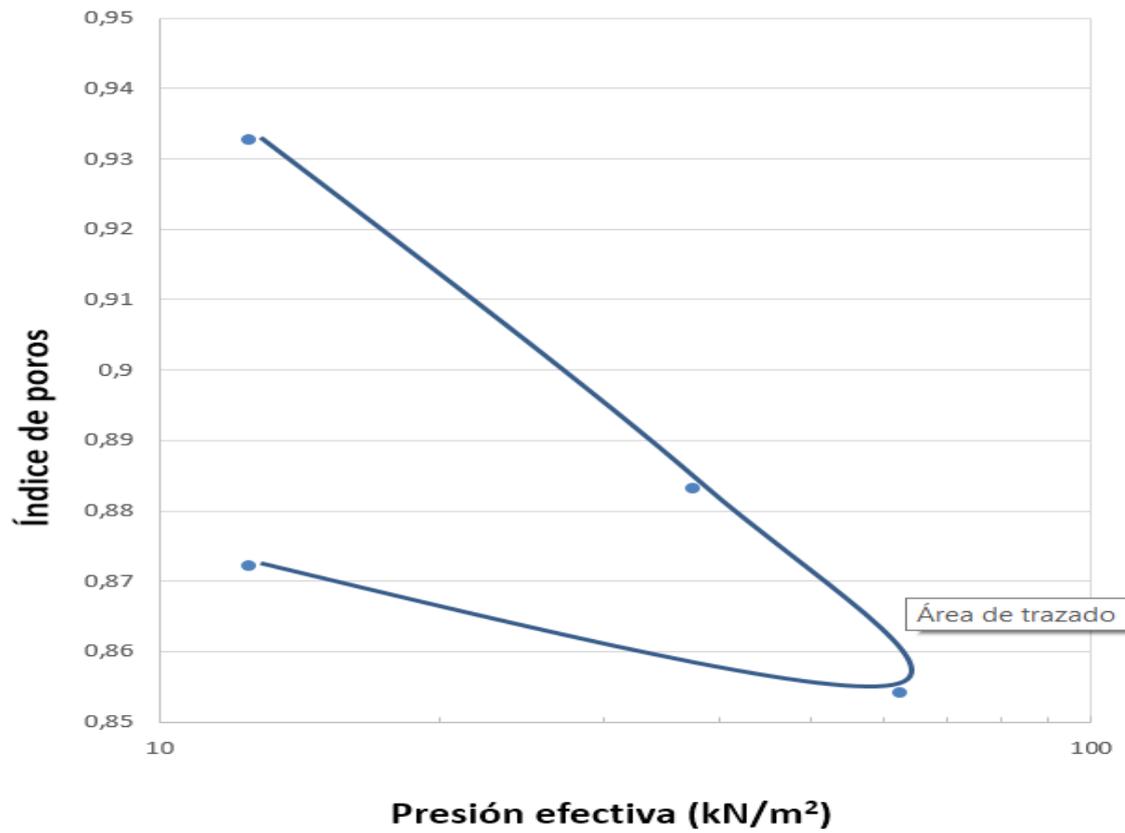
❖ ***Coefficientes de consolidación.***

Coeficiente de consolidación c_v					
Escalón	Logaritmo del tiempo	Raiz del tiempo	Media	σ'_o (kN/m ²)	σ'_f (kN/m ²)
1	4,396	3,090	3,743	12,5	37
2	4,685	4,631	4,658	37	62
3(c_s)	12,899	11,140	12,020	62	12,5

Tabla resumen de coeficientes de consolidación (Muestra 5)

❖ ***Curva edométrica***

Muestra 5	H_f (mm)	σ' (kN/m ₂)	e
Inicio	20	0	1,07042567
Precarga	18,67	12,5	0,932742363
Escalón 01	18,19	37	0,883052147
Escalón 02	17,91	62	0,854066188
Escalón 03	18,085	12	0,872182412



Curva Edométrica (Muestra 5)

❖ **Coefficiente de compresibilidad, índice de poros y permeabilidad.**

	a_v (m ² /kN)	c_v (m ² /año)	e (e_m)	γ_w (KN/m ³)	k_v (m/año)
Escalón 01	0,001989124	3,74	0,91	9,8	0,03824242
Escalón 02	0,001160322	4,65	0,87	9,8	0,028346
Escalón 03	0,000362601	12,01	0,86	9,8	0,02292458

➤ **Muestra 6**

❖ ***Coefficientes de consolidación.***

Coeficiente de consolidación c_v					
Escalón	Logaritmo del tiempo	Raíz del tiempo	Media	σ'_o (kN/m ²)	σ'_f (kN/m ²)
1	4,756	4,095	4,425	12,5	50
2	5,217	5,848	5,533	50	75
3(c_s)	25,798	23,135	24,466	75	25

Tabla resumen de coeficientes de consolidación (Muestra 6)

❖ ***Curva edométrica***

Muestra 6	H_f (mm)	σ' (kN/m ²)	e
Inicio	20	0	1,11230533
Precarga	18,83	12,5	0,988735468
Escalón 01	17,542	50	0,852703005
Escalón 02	17,232	75	0,819962272
Escalón 03	17,35	25	0,832424874

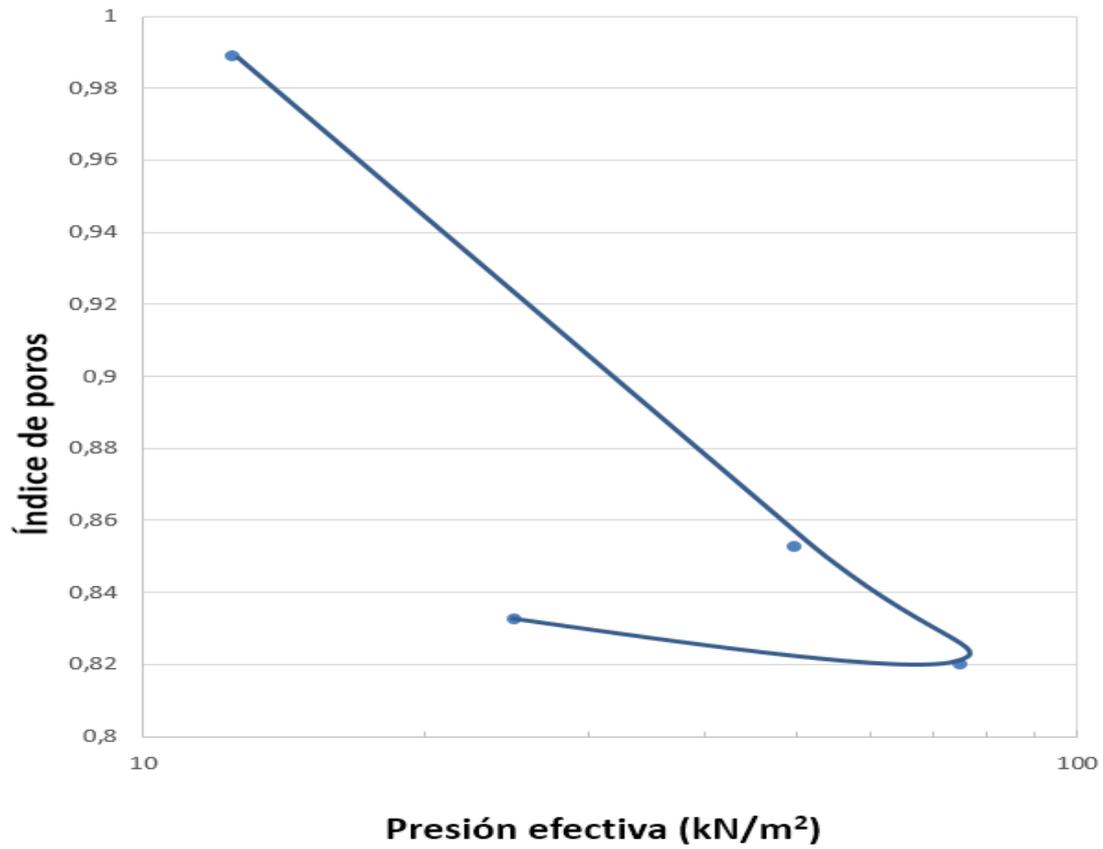


Figura Curva Edométrica (Muestra 6)

❖ *Coefficiente de compresibilidad, índice de poros y permeabilidad.*

	a_v (m ² /kN)	c_v (m ² /año)	e (e_m)	γ_w (KN/m ³)	k_v (m/año)
Escalón 01	0,003630297	4,42	0,92	9,8	0,08197173
Escalón 02	0,001310628	5,53	0,84	9,8	0,03869729
Escalón 03	0,000249442	24,46	0,83	9,8	0,03275047

3.4.2. Comparación y discusión de resultados

a) comparación de los coeficientes de consolidación obtenidos.

A continuación, se presenta el resumen de los c_v obtenidos para la muestra del ensayo estándar:

Escalón	Tensión (KN/m ²)	Cv(m ² /año)
1	12.5 - 25	4.77
2	25 - 50	5.06
3	50 - 100	7.19
4 (c _s)	100 - 50	22.85
5 (c _s)	50 - 25	11.13
6	25- 50	19.25
7	50 - 100	8.535
8	100 - 200	6.65
9	200- 400	11.19
10 (c _s)	400- 200	9.65
11 (c _s)	200 - 100	15.367

Tabla resumen de los coeficientes de consolidación obtenidos en el ensayo estándar.

A la vista de estos resultados, vemos que se trata de una arcilla con un coeficiente de consolidación que se mantiene con un orden de magnitud en torno a 10 m²/año, es decir, una arcilla con una velocidad de consolidación modernamente alta.

Fijándonos en los resultados de nuestros ensayos, se observa como los coeficientes obtenidos guardan el mismo orden de magnitud, tanto el c_v del orden de 10 m²/año, como el c_s , que habitualmente suele ser tres veces mayor que el c_v .

b) Comparación de las curvas edométricas.

En esta parte del trabajo, vamos a representar la curva edométrica obtenida en el ensayo estándar, con las 6 curvas obtenida en nuestro ensayo de consolidación.

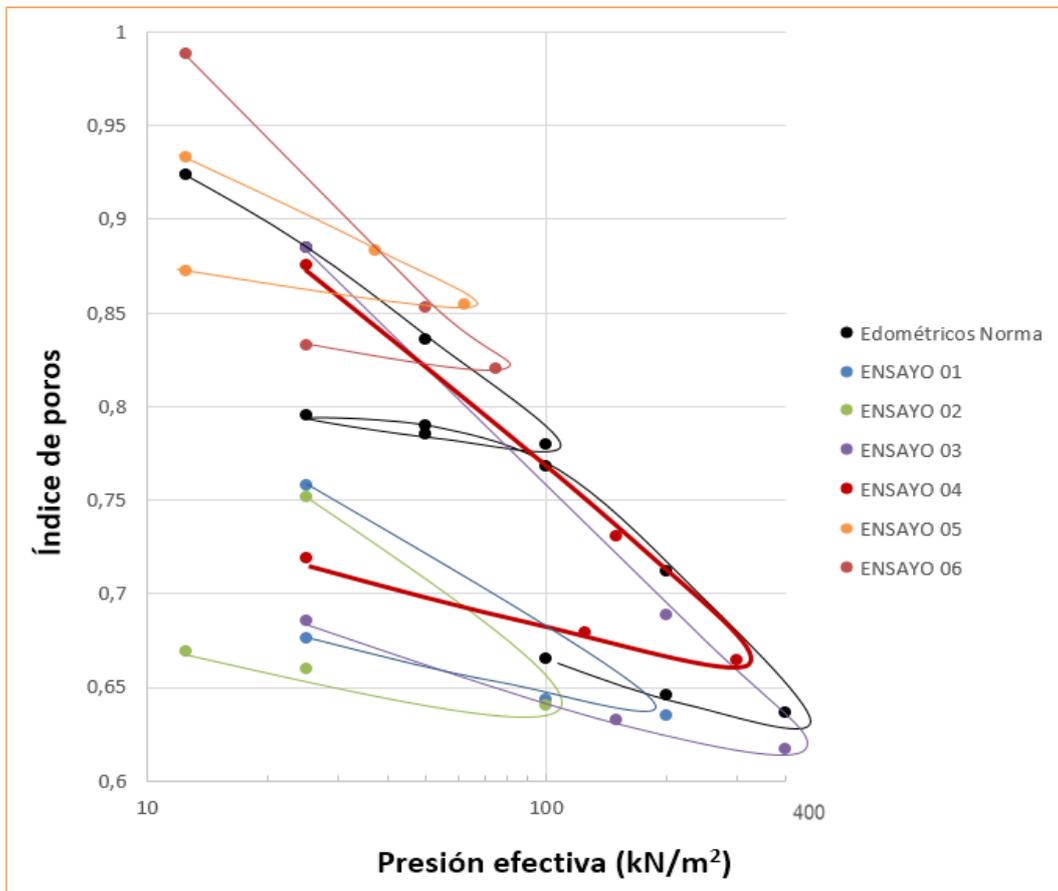


Figura 1. Curva edométrica estándar superpuesta con nuestras 6 curvas obtenidas.

En esta gráfica se puede observar como, a pesar de la disparidad de los saltos tensionales ensayados en este trabajo, (desde saltos tensionales pequeños con niveles bajos de tensión [muestras 5 y 6] hasta saltos tensionales mayores donde se alcanza tensiones de 200 a 400 MPa [muestras 3 y 4]) la relación entre el índice de poros (e) y la tensión efectiva (σ') se mantiene más o menos invariante, sea cual sea el escalón de carga efectuado.

Quizás, las desviaciones más evidentes son las de las muestras 2, 5 y 6, en las cuales, dado que nos encontramos con niveles de tensión bajos, y dado que se trata de una muestra remoldeada, esta desviación puede hallar su justificación en que el suelo no ha adoptado aun una estructura lo suficientemente ordenada.

Finalmente, podemos ver que los resultados obtenidos en nuestras 6 muestras son válidos y de directa aplicación a casos reales.

4 Simulación numérica.

Con el objetivo de ilustrar esta memoria, vamos a realizar la simulación de un caso real de consolidación. Las simulaciones se realizan con un programa de resolución numérica basado en el método de redes. Las propiedades del terreno y la sobrecarga aplicada sobre el mismo, debido a la construcción de un terraplén, vienen recogidas en la siguiente tabla:

Propiedades del suelo		
H_{suelo}	4	m
ρ_{ap}	18	kN/m ³
ρ_{sum}	8	kN/m ³
σ'_{fondo}	32	kN/m ²
σ'_{inicial}	32	kN/m ²
Sobrecarga Terraplén		
ρ_{ap}	21	kN/m ³
H_{terr}	3	m
$\sigma_{\text{sc}} = \sigma'_{\text{sc}}$	63	kN/m ²
Tensión efectiva final		
σ'_{fin}	95	kN/m ²

A la vista de los datos de la tabla, tenemos un estrato de suelo de 4 metros de espesor con una tensión efectiva inicial de 32 kPa, en el cual vamos a aplicar una sobrecarga en superficie de 63 kPa debida a la construcción de un terraplén. De esta manera, la tensión efectiva final a la que quedará sometido el suelo es de 95 kPa.

Así, a la hora de introducir en el programa de cálculo los valores del coeficiente de consolidación (c_v), necesario para obtener los tiempos de consolidación de nuestro suelo, y los valores del módulo de compresibilidad (a_v) y del índice de poros inicial (e_0), necesarios para realizar un análisis de la magnitud de los asentamientos, vamos a tomar los correspondientes a la muestra 2 correspondientes al escalón 1, que va de 25 kPa a 100 kPa. Estos datos se recogen en la siguiente tabla:

Datos de la muestra 2		
c_v	8.4	$m^2/año$
a_v	0.0015	m^2/KN
e_0	0.7	
k_v	0.0723	$m/año$

A la hora de realizar las simulaciones, el terreno se ha dividido en 80 subdivisiones (o celdas). esta reticulación es suficiente para obtener una alta precisión en los resultados, con errores menores al 1%.

Una vez introducidos todos los datos, se procede a correr el programa, el cual resuelve el problema en apenas 20 segundos. A continuación, se presentan las soluciones más ilustrativas del problema.

- **Grado medio de consolidación:**

La primera de las representaciones gráficas que nos presenta el programa como solución del problema es la representación del grado medio de consolidación. Esta curva podría también obtenerse a partir de la expresión analítica presentada en el capítulo 2:

$$\bar{U}_v = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M^2} e^{(-M^2 \cdot T_v)}$$

A la vista de la gráfica, se puede comprobar cómo la práctica consolidación del terreno se produce transcurridos los 5 años, mientras que una consolidación del 90%, valor comúnmente aceptado para dar por finalizado el proceso de consolidación se alcanza transcurridos los 1.6 años.

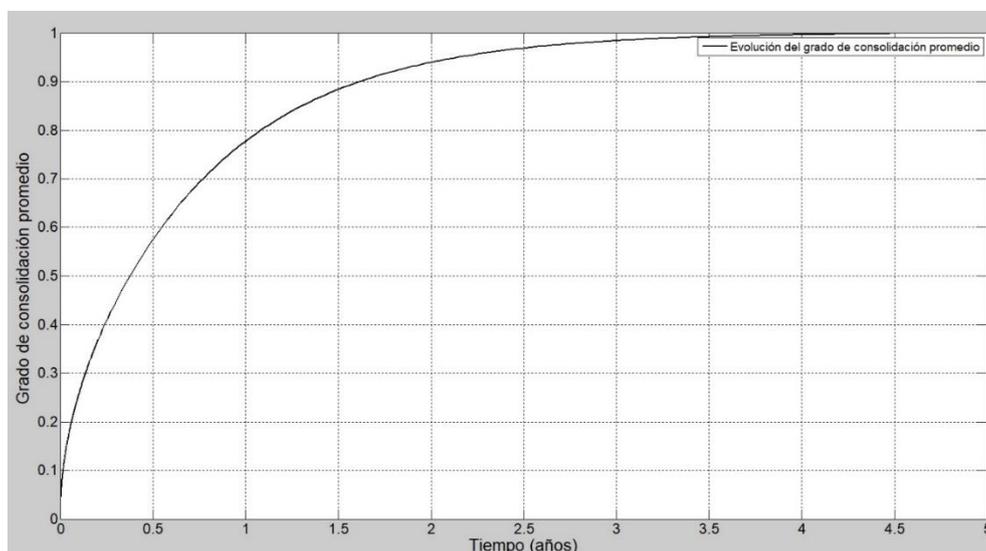


Figura 2. Evolución del grado medio de consolidación para el problema propuesto

- **Evolución de la tensión efectiva y del exceso de presión intersticial:**

Esta representación ilustra de una manera muy clara como se desarrolla el proceso del paso de la presión intersticial, inicialmente producida por la carga aplicada, a la matriz del suelo en forma de tensión efectiva. Como se puede apreciar, aquellas partes del suelo que se encuentran más próximas a la superficie drenante, disipan con mayor rapidez el exceso de presión intersticial, aumentando más rápidamente la tensión efectiva que soporta el terreno. Por el contrario, las celdas más alejadas de la superficie, disipan la presión intersticial más lentamente, presentando un aumento de la tensión efectiva más retrasado en comparación con las capas superiores.

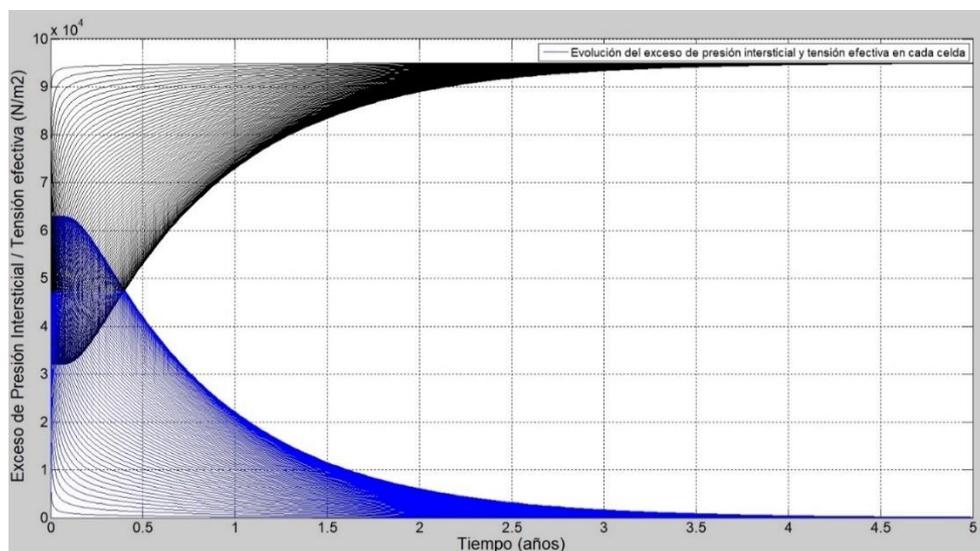


Figura 3. Evolución del exceso de presión intersticial y presión efectiva en función del tiempo y la profundidad.

- **Evolución del asentamiento local para cada celda del suelo:**

Esta representación se ha podido obtener gracias a que el programa de cálculo ofrece la posibilidad de realizar un análisis de asentamientos, habiendo aportado previamente los valores del módulo de compresibilidad (a_v) y del índice de poros inicial (e_0). Como se puede observar, la evolución de asentamientos locales tiene una forma semejante al exceso de presión intersticial, ya que el asentamiento está directamente relacionado con la expulsión de agua del suelo, la cual depende del exceso de presión intersticial. Se observa como todas las celdas de suelos alcanzan el mismo valor de asentamiento local (ya que todas son del mismo tamaño).

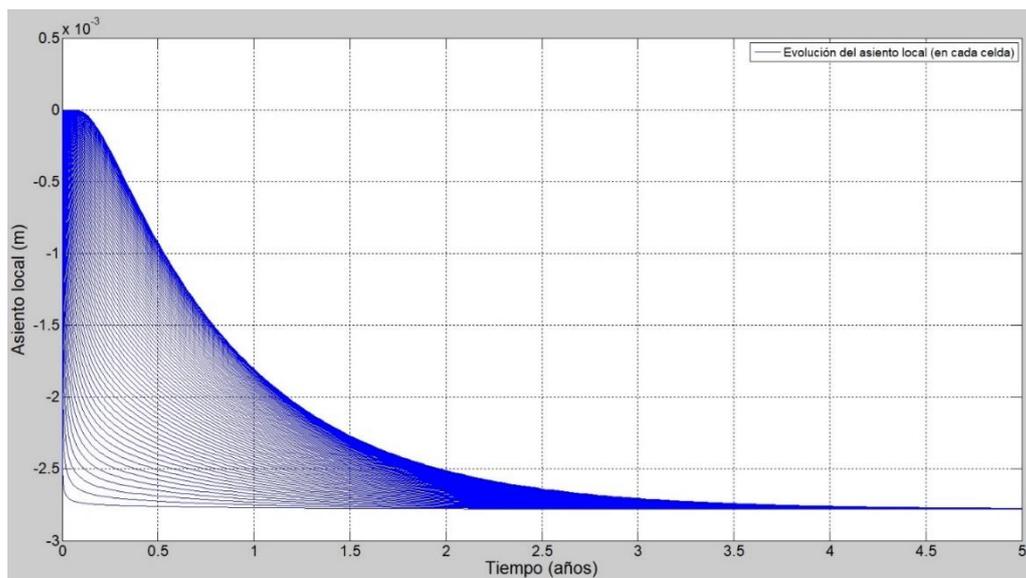


Figura 4. Evolución de los asentamientos locales de cada celda del suelo.

- **Evolución del asentamiento total en superficie:**

Esta representación es de gran utilidad, pues nos informa directamente del asentamiento que tenemos en la superficie de nuestro terreno en todo momento. Para nuestro caso, el asentamiento final por consolidación es de 0.22 m. Esta gráfica se similar en aspecto a la del grado medio de consolidación, donde se nos daba una información del asentamiento en tanto por cien. En este caso, gracias a la herramienta numérica, es posible conocer también la magnitud del mismo.

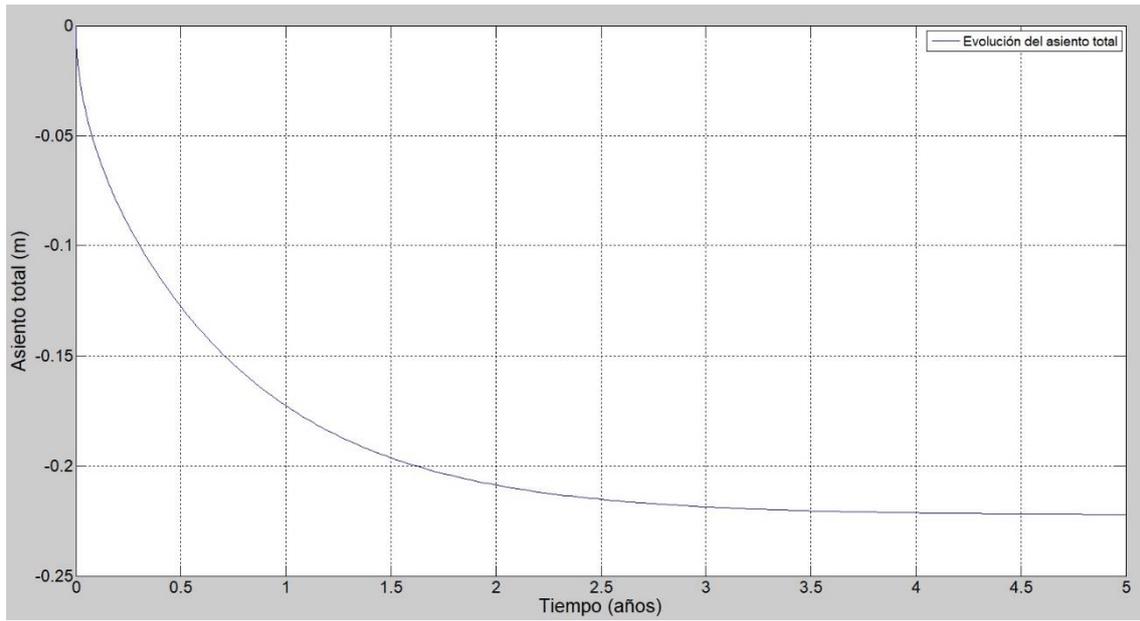


Figura 5. Evolución del asentamiento acumulado en superficie.

5 Conclusión

Como conclusión, tenemos en cuenta que el estudio de la consolidación de los suelos es necesario y se debe llevar a ensayo de laboratorio, siendo una de las propiedades más importantes a la hora de trabajar con un tipo de suelo.

Al aplicar una carga externa sobre nuestro material tipo, lo sometemos a un incremento de esfuerzos totales, que se convierte en un exceso de presión intersticial.

En el presente trabajo, hemos realizado un estudio de seis muestras del mismo tipo de arcilla, para así, ver como ésta se comporta frente a una carga.

Este estudio se llevó a cabo partiendo de trabajos de laboratorio, allí tomamos lecturas de tiempo-asentamiento durante un máximo de 24 horas sobre un edómetro, para llevar a cabo la interpretación de estos resultados mediante la metodología de Taylor, y la metodología del logaritmo del tiempo.

Una vez finalizado el estudio de nuestras seis muestras, se llevó a cabo la realización de la curva edométrica y la curva de consolidación para cada una de ellas. Luego, se compararon nuestros resultados con los resultados obtenidos en el ensayo estándar, donde vimos, que nuestros resultados son válidos y de directa aplicación a casos reales.

Por último, se realizó una simulación de un caso real de consolidación, donde se pudo ver como actuaría nuestra arcilla al aplicar sobre esta la carga de un terraplén.

6 Bibliografía.

- Atkinson, J. *The mechanics of soils and foundations*. Mc Graw-Hill (1993)
- Barron, R.A. Consolidation of fine grained soils by drain wells. Transactions of the ASCE, 113, 718-742 (1948)
- Berry, P.L. and Reid, D. *An Introduction to Soil Mechanics*. McGraw-Hill, London (1987)
- Berry, P.L. y Reid, D. *Mecánica de Suelos*. McGraw-Hill Int. Santa Fe de Bogotá, Colombia (1993)
- Lambe, T. W. and Withman, R. V. *Soil Mechanics, SI version*. Ed. Wiley, New York (1979)
- Muir Wood, D. *Soils Mechanics (A one-dimensional introduction)*. Cambridge (2009)
- Sagaseta, C., Cañizal, J., y da Costa, A. *Geotecnia I. Propiedades del Terreno*. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander (2007)
- Scott, R.F. *Principles of Soils Mechanics*. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts (1963)
- Terzaghi K. *Theoretical Soil Mechanics*. Ed. Wiley, New York (1943)