



E.T.S. de Ingeniería de
Caminos, Canales y Puertos
y de Ingeniería de Minas



Universidad
Politécnica
de Cartagena

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Civil

**ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN EN UNA ARCILLA
CON ALTO CONTENIDO EN MOSCOVITA, CON
ESCALONES DE CARGA NO CONTEMPLADOS EN LA
NORMATIVA.
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS
MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA.**

Alumno: AMANCIO SÁNCHEZ GÓMEZ

Director: IVÁN ALHAMA MANTECA

Co-director: GONZALO GARCÍA ROS

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	2
1.1	RESUMEN.....	2
1.2	OBJETIVOS Y ALCANCE.....	2
2.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	4
2.1	TEORÍA DE LA CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL	4
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.	ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN.....	14
3.1	APARATO Y PROCEDIMIENTO.....	14
3.2	EQUIPO Y MATERIALES NECESARIOS.....	15
3.3	ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN Y DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS	17
3.3.1	DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD INICIAL, DENSIDAD SECA, ÍNDICE DE POROS INICIAL Y PESO ESPECÍFICO DE LAS PARTÍCULAS.....	17
3.3.2	PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS PARA EL ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN	24
3.3.3	ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN	24
3.3.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	44
3.3.5	COMPARACIÓN DE CURVAS EDOMÉTRICAS CON OTRO ENSAYO DE LA MISMA ARCILLA ...	53
4.	SIMULACIONES	56
4.1	GRADO MEDIO DE CONSOLIDACIÓN	57
4.2	EVOLUCIÓN DE LA TENSIÓN EFECTIVA Y DEL EXCESO DE PRESIÓN INTERSTICIAL.....	58
4.3	EVOLUCIÓN DEL ASENTAMIENTO LOCAL PARA CADA CELDA DEL SUELO.....	59
4.4	EVOLUCIÓN DEL ASENTAMIENTO TOTAL EN SUPERFICIE	60
5.	CONCLUSIONES	61
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	62

1. INTRODUCCIÓN

1.1 RESUMEN

Cuando hablamos de Ingeniería Civil, lo primero en lo que pensamos es en la construcción de puentes, presas, carreteras, puertos,...pero lo cierto es, que dichas construcciones no serían posibles sin un estudio geotécnico del suelo sobre el que se van a proyectar. La rama de la Ingeniería que se ocupa de esto es la Geotecnia, también llamada "Mecánica de Suelos", encargada de estudiar la interacción de las construcciones con el terreno. Se trata de un conjunto de técnicas, tanto de campo como de laboratorio, que nos permiten conocer las características y el comportamiento de terreno, para utilizarlo adecuadamente como elemento de construcción. Por esto, no sólo se trata de una disciplina de Ingeniería Civil, sino también de otras actividades que guardan relación con el terreno, como la Arquitectura o la Ingeniería Minera.

Uno de los procesos más importantes de la Geotecnia, y gran protagonista de este ensayo, es la consolidación, consecuencia de interacciones físico-químicas y mecánicas producidas en el suelo. Es un proceso de reducción de volumen de los suelos finos cohesivos, (arcillas y limos plásticos) y expulsión de todo el aire y el agua intersticiales, provocados por la actuación de unas determinadas cargas. Ocurre en el transcurso de un tiempo, generalmente largo, y producen asentos, es decir, hundimientos verticales, que pueden llegar a romper si se producen con gran amplitud. La consolidación que va a experimentar un suelo, depende de su tipología y de las cargas que soporta, por ello es de gran interés realizar un estudio del terreno sobre el que vamos a trabajar.

En este proyecto, vamos a realizar ensayos de consolidación de una arcilla con alto contenido en Moscovita, procedente del Este de Europa.

1.2 OBJETIVOS Y ALCANCE

Dado que la Teoría de la Consolidación es la parte fundamental de este proyecto, se comenzará explicando los fundamentos teóricos de la misma, basándonos en la teoría del problema de consolidación de Terzaghi (Terzaghi & Frölich, 1933) y las ecuaciones descritas por Berry (Mecánica de Suelos, P.L. Berry).

En este proyecto, se realizarán ensayos edométricos de una arcilla con alto contenido en Moscovita, con el fin de conocer los parámetros de dicho material y, por tanto, cómo se va a comportar un suelo de esta arcilla ante diferentes cargas. Este ensayo debe realizarse en cualquier suelo sobre el que se vaya a construir.

El objetivo final del ensayo edométrico, es cuantificar lo más exactamente posible, el asiento que va a experimentar nuestra muestra ante los diferentes escalones de carga

a los que será sometida, sabiendo que estos escalones, no son los que refleja la normativa.

Con nuestra arcilla, procedente del este de Europa, se tomarán 6 muestras, dos cada semana (ya que en el laboratorio disponemos de dos edómetros). Con los datos obtenidos de cada muestra, se utilizará el programa Excel para trazar tanto la curva de consolidación como la edométrica, mediante los métodos del logaritmo y de la raíz del tiempo. Estas curvas nos permiten conocer el valor de los dos parámetros necesarios para comprender el comportamiento de nuestra arcilla en los distintos escalones de carga y descarga: el de **coeficiente de consolidación (C_v)** y el del **coeficiente de compresibilidad (a_v)**.

Por último, basándonos en datos obtenidos, se realizarán una serie de simulaciones con un programa informático, planteando una serie de casos de terreno real, formados por nuestra arcilla.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 TEORÍA DE LA CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

Cuando un depósito de suelo es sometido a un incremento de esfuerzos totales, 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) Conduce 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:

- El asentamiento total de la estructura.
- 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.

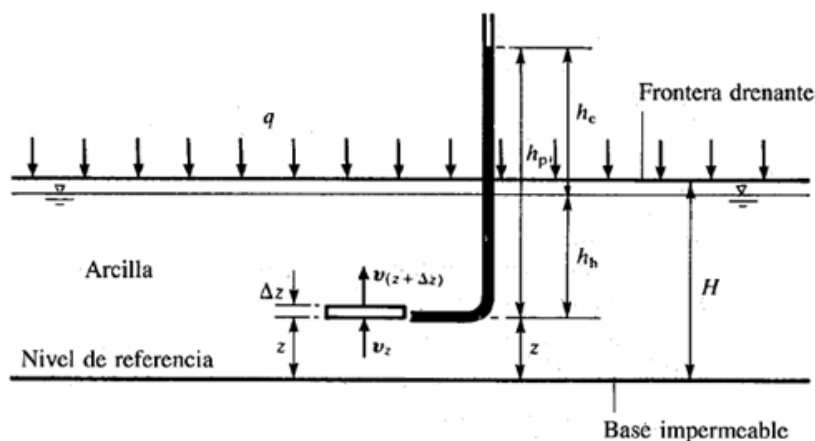


Figura 2.1 Consolidación vertical de una capa de suelo

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:

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

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 rempaza 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:

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

Reordenado 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.

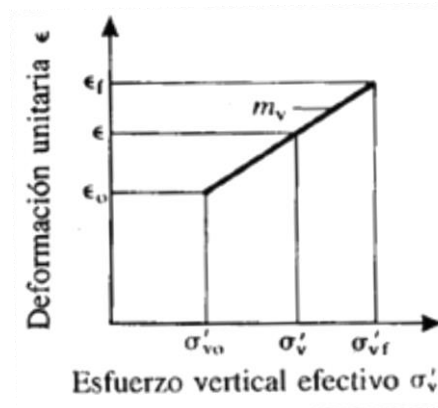


Figura 2.2 Deformación lineal unitaria para cada incremento de esfuerzo vertical efectivo

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:

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

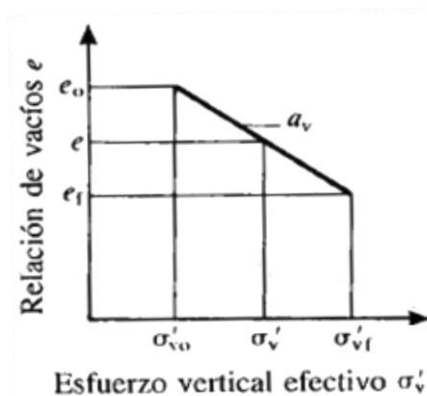


Figura 2.3 Relación de vacíos para cada incremento de esfuerzo vertical efectivo

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 $0 \leq z \leq H$

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 $t = \infty$; $u_e = 0$; para $0 \leq z \leq H$

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.

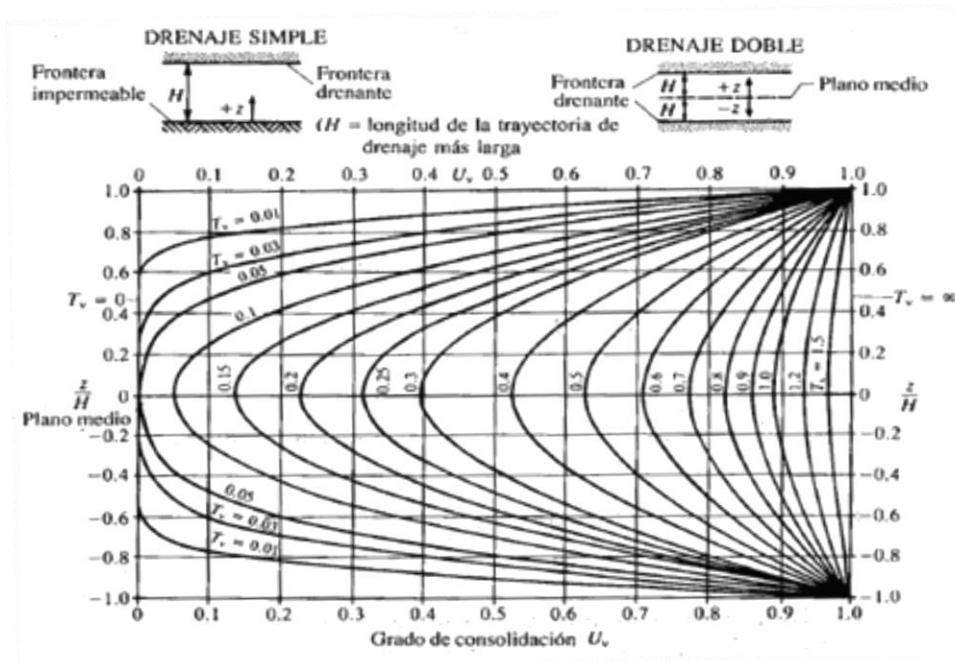


Figura 2.4 Grado de consolidación en función de “ T_v ” y “ z/H ”

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.

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

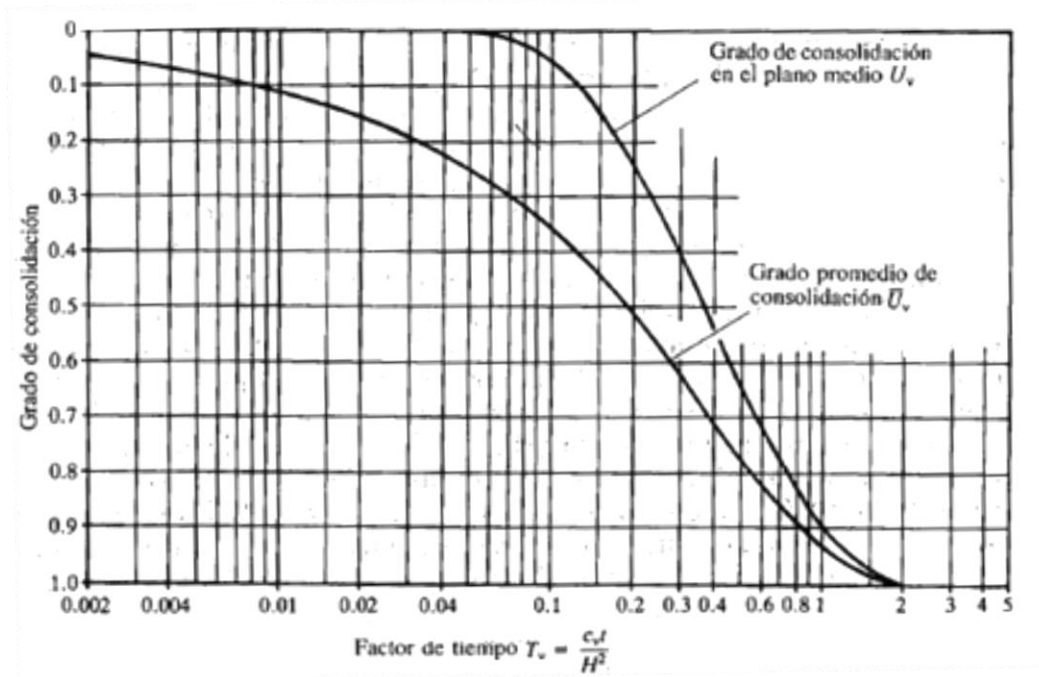


Figura 2.5 Relación entre el “factor de tiempo vertical” y “el grado promedio de consolidación”

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.

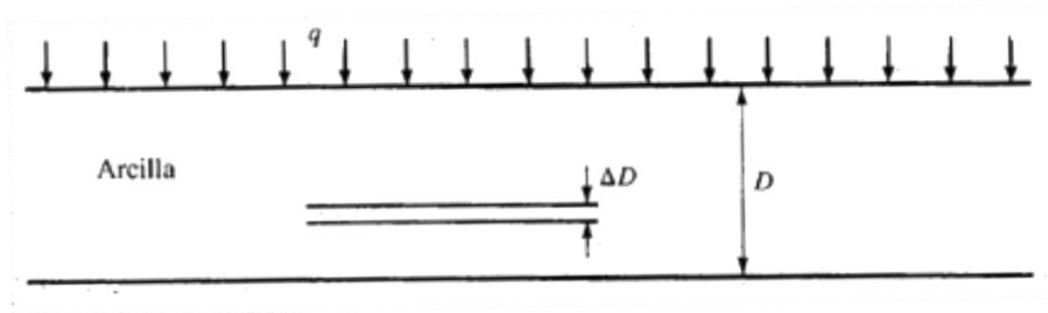


Figura 2.6 Área cargada de extensión infinita

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. 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 .

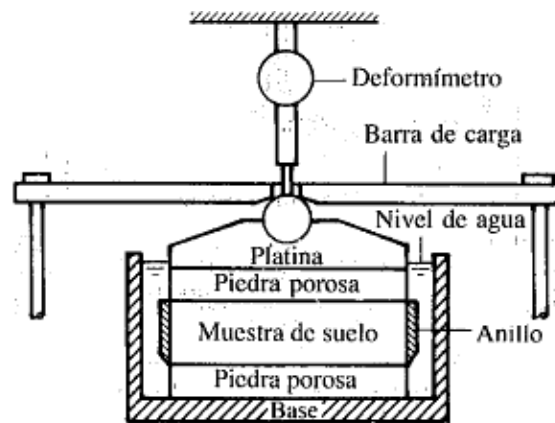


Figura 3.1 Celda de Terzaghi para consolidación con pesas.

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. Es importante que estos anillos tengan el diámetro necesario, ya que eso evitará que salga arcilla y, por tanto, que el ensayo tenga que volver a repetirse.

En la parte superior de la imagen podemos ver el deformómetro, 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), ASTM D-2435-70 y UNE 103-405-94.

- 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.
- Elemento de pesaje: imprescindible para poder realizar los pesajes indicados de las diferentes muestras y en sus diferentes estados. Con una aproximación de 0,1 g.
- Deformímetro: donde el aparato representa la deformación producida, con una sensibilidad de 0,0025 mm (0,0001”).



3.3 ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN Y DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS

Lo ideal para este tipo de ensayos es utilizar muestras inalteradas de bloques inalterados, buscando que pierdan la mínima humedad posible.

En este caso, se va a analizar un tipo de arcilla que se encontraba en laboratorio, la cual queremos estudiarla y clasificarla. Se trata de una arcilla con alto contenido en Moscovita, procedente de un suelo del este de Europa.

Para ello vamos a escoger seis muestras por semana de este tipo de arcilla: a dos de ellas se le realizará el ensayo del penetrómetro, para determinar el límite líquido de la muestra; dos serán para realizar el ensayo de consolidación en el edómetro; y otras dos muestras para conocer los valores de la humedad inicial, densidad seca, así como del peso específico relativo, a través de una serie de ensayos, que explicaremos a continuación.

3.3.1 DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD INICIAL, DENSIDAD SECA, ÍNDICE DE POROS INICIAL Y PESO ESPECÍFICO DE LAS PARTÍCULAS

En primer lugar, se cogerán dos recipientes (anillos), uno para cada muestra, y se procederá a pesarlos y limpiarlos, para evitar que se contamine la muestra. Posteriormente, los llenaremos con nuestra arcilla, ayudándonos de una espátula, y los dejaremos enrasados y lo más homogéneamente posible. Una vez preparadas las muestras en los anillos, las pesaremos. Como sabemos el peso del anillo vacío, también podemos saber el peso de nuestra muestra sin anillo. A continuación introducimos dichos anillos en la estufa durante 24 horas a 60 °C, de esta forma eliminaremos todo 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 parámetros:

3.3.1.1 HUMEDAD INICIAL (w_0)

Muestra 1 antes de consolidar	
Humedad inicial (w_0)	
Peso anillo de corte	60,47 g
Peso anillo de corte + muestra (0h)	153,48 g
Peso anillo de corte + muestra (24h)	116,94 g
Peso muestra (0h)	93,01 g
Peso muestra (24h)	56,47 g
Peso del agua (Ww)	36,54 g
Peso del suelo (Ws)	56,47 g
Humedad inicial muestra 1	64,706924 %

Muestra 2 antes de consolidar	
Humedad inicial (w_0)	
Peso anillo de corte	60,47 g
Peso anillo de corte + muestra (0h)	155,71 g
Peso anillo de corte + muestra (24h)	120,22 g
Peso muestra (0h)	95,24 g
Peso muestra (24h)	59,75 g
Peso del agua (Ww)	35,49 g
Peso del suelo (Ws)	59,75 g
Humedad inicial muestra 2	59,3974895 %

Muestra 3 antes de consolidar	
Humedad inicial (w_0)	
Peso anillo de corte	60,47 g
Peso anillo de corte + muestra (0h)	153,55 g
Peso anillo de corte + muestra (24h)	116,98 g
Peso muestra (0h)	93,08 g
Peso muestra (24h)	56,51 g
Peso del agua (Ww)	36,57 g
Peso del suelo (Ws)	56,51 g
Humedad inicial muestra 3	64,7142099 %

Muestra 4 antes de consolidar	
Humedad inicial (w_0)	
Peso anillo de corte	60,47 g
Peso anillo de corte + muestra (0h)	161,24 g
Peso anillo de corte + muestra (24h)	118,78 g
Peso muestra (0h)	100,77 g
Peso muestra (24h)	58,31 g
Peso del agua (Ww)	42,46 g
Peso del suelo (Ws)	58,31 g
Humedad inicial muestra 4	72,8176985 %

Muestra 5 antes de consolidar	
Humedad inicial (w_0)	
Peso anillo de corte	60,47 g
Peso anillo de corte + muestra (0h)	156,29 g
Peso anillo de corte + muestra (24h)	122,24 g
Peso muestra (0h)	95,82 g
Peso muestra (24h)	61,77 g
Peso del agua (Ww)	34,05 g
Peso del suelo (Ws)	61,77 g
Humedad inicial muestra 5	55,1238465 %

Muestra 6 antes de consolidar	
Humedad inicial (w_o)	
Peso anillo de corte	60,99 g
Peso anillo de corte + muestra (0h)	157,12 g
Peso anillo de corte + muestra (24h)	122,59 g
Peso muestra (0h)	96,13 g
Peso muestra (24h)	61,6 g
Peso del agua (Ww)	34,53 g
Peso del suelo (Ws)	61,6 g
Humedad inicial muestra 6	56,0551948 %

3.3.1.2 DENSIDAD SECA INICIAL (ρ_d)

A continuación y una vez obtenidos los resultados anteriores, procedemos a calcular la densidad seca inicial (ρ_d), realizando los cálculos directos, conociendo las dimensiones del resultado utilizado:

MUESTRA 1	
Densidad seca inicial (ρ_d)	
Masa seca de la probeta (m_d)	56,47 g
Diámetro anillo de corte	5 cm
Área (A)	19,6349544 m ²
Altura del anillo (H_o)	3 cm
ρ_d	0,95866448 g/cm³

MUESTRA 2	
Densidad seca inicial (ρ_d)	
Masa seca de la probeta (m_d)	59,75 g
Diámetro anillo de corte	5 cm
Área (A)	19,6349544 m ²
Altura del anillo (H_o)	3 cm
ρ_d	1,01434749 g/cm³

MUESTRA 3	
Densidad seca inicial (ρ_d)	
Masa seca de la probeta (m_d)	56,51 g
Diámetro anillo de corte	5 cm
Área (A)	19,6349544 m ²
Altura del anillo (H_o)	3 cm
ρ_d	0,95934354 g/cm ³

MUESTRA 4	
Densidad seca inicial (ρ_d)	
Masa seca de la probeta (m_d)	58,31 g
Diámetro anillo de corte	5 cm
Área (A)	19,6349544 m ²
Altura del anillo (H_o)	3 cm
ρ_d	0,98990129 g/cm ³

MUESTRA 5	
Densidad seca inicial (ρ_d)	
Masa seca de la probeta (m_d)	61,77 g
Diámetro anillo de corte	5 cm
Área (A)	19,6349544 m ²
Altura del anillo (H_o)	3 cm
ρ_d	1,04864007 g/cm ³

MUESTRA 6	
Densidad seca inicial (ρ_d)	
Masa seca de la probeta (m_d)	61,6 g
Diámetro anillo de corte	5 cm
Área (A)	19,6349544 m ²
Altura del anillo (H_o)	3 cm
ρ_d	1,04575406 g/cm ³

3.3.1.3 DENSIDAD RELATIVA DE LAS PARTÍCULAS (G_s)

Más tarde, se procedió al cálculo de la densidad relativa de las partículas (G_s) del tipo de arcilla utilizada en este trabajo. Para ello se utilizó el **ensayo del picnómetro**, método muy sencillo en el cual llenamos el picnómetro con agua hasta el enrase y tomamos la primera pesada (M_1). Después, vaciamos el picnómetro (aproximadamente la mitad de lo anteriormente llenado) y volvemos a pesar (M_2). A continuación en el picnómetro vertimos la muestra seleccionada y pesamos (M_3). 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 (M_4).

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

$$\text{Masa del árido} = M_3 - M_2$$

$$\text{Volumen del líquido} = (M_3 - M_2) - (M_4 - M_1) / Q$$

Resumiendo:

$$G_s = (M_3 - M_2) / [(M_3 - M_2) + (M_1 - M_4)]$$

Densidad relativa de las partículas (G_s)	
M1	173,71 g
M2	114,61 g
M3	130,22 g
M4	182,67 g
G_s	2,34736842

3.3.1.4 ÍNDICE DE POROS INICIAL (e_o)

Finalmente, en esta parte del trabajo y recopilando los datos obtenidos anteriormente, se calcula el índice de poros inicial (e_o), el cual se calcula con la siguiente formula:

$$e_o = \frac{Gs}{\rho d} - 1$$

MUESTRA 1	
Índice de poros inicial (e_o)	
e_o	1,44858182

MUESTRA 2	
Índice de poros inicial (e_o)	
e_o	1,31416595

MUESTRA 3	
Índice de poros inicial (e_o)	
e_o	1,44684862

MUESTRA 4	
Índice de poros inicial (e_o)	
e_o	1,37131565

MUESTRA 5	
Índice de poros inicial (e_o)	
e_o	1,23848819

MUESTRA 6	
Índice de poros inicial (e_o)	
e_o	1,24466584

3.3.2 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS PARA EL ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN

En primer lugar y, para comenzar a realizar el ensayo de consolidación, buscamos 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.

Los resultados obtenidos para cada una de las muestras, son los siguientes:

MUESTRA	PRIMERA PRUEBA PENETRÓMETRO (mm)	SEGUNDA PRUEBA PENETRÓMETRO (mm)	MEDIA (mm)	¿CUMPLE LL?
1	19,75	20,7	20,225	SÍ
2	21	20,2	20,6	SÍ
3	20	21	20,5	SÍ
4	19,5	20,6	20,05	SÍ
5	22	19,8	20,9	SÍ
6	21,2	20,7	20,95	SÍ



3.3.3 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, y volvemos a pesar, 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. Como se ha dicho anteriormente, es muy importante que las placas porosas tengan el diámetro adecuado, ya que en caso negativo, se perdería muestra y no valdría el ensayo.

A continuación ajustamos el micrómetro a 10 vueltas y 0 rayitas y comenzamos con el primer escalón o escalón de precarga.

En este escalón de precarga, introducimos en la balanza de carga un peso determinado, (p.e. en las muestras 5 y 6 ponemos 0,25 kg, y en el resto 0,5 kg), y a través del brazo multiplicador y en la situación en la que se encuentra, asumiremos una carga total en KN/m². Al ser un escalón de precarga, solamente anotaremos la medida pasadas 24 horas, y a raíz de ahí comenzaremos realmente el ensayo de consolidación.

Transcurridas las 24 primeras horas de precarga, anotaremos la medida y aplicaremos el primer escalón de carga, con una cantidad de kgs, que transmitirán a la muestra una carga en KN/ m².

Una vez aplicada la carga, y atentamente con el cronómetro 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 y 45 minutos, y 1, 1'5, 2, 3, 5, y 24 horas, aproximadamente, aunque estas última horas variarán según la muestra. Se dispondrá de una plantilla anteriormente realizada para facilitar la anotación de dichos datos, sobre todo en los intervalos de tiempo más breves.

Como puede observarse claramente en la anotación de las deformaciones, una vez que entramos en la conocida consolidación secundaria (donde no se sigue deformando por más tiempo que pase), repetimos nuevamente el proceso con la siguiente carga, comenzando el siguiente escalón.

En nuestro caso, vamos a realizar una serie de escalones para cada una de las muestras, reflejados en la siguiente tabla, incluyendo escalones de carga y descarga, para poder ver la reacción de la arcilla al quitarle y ponerle las pesas de las que disponemos en el laboratorio:

MUESTRA	PRECARGA (kg)	ESCALÓN 1 (kg)	ESCALÓN 2 (kg)	ESCALÓN 3 (kg)	ESCALÓN 4 (kg)
1	0,5	(0,5)+3,5= 4	(4)-2= 2	(2)-1,5= 0,5	
2	0,5	(0,5)+1,5= 2	(2)-1,5= 0,5	(0,5)-0,25= 0,25	
3	0,5	(0,5)+3,5= 4	(4)+4= 8	(8)-5= 3	(3)-2,5= 0,5
4	0,5	(0,5)+2,5= 3	(3)+3= 6	(6)-3,5= 2,5	(2,5)-2= 0,5
5	0,25	(0,25)+0,5= 0,75	(0,75)+ 0,5= 1,25	(1,25)-1= 0,25	
6	0,25	(0,25)+0,75= 1	(1)+0,5= 1,5	(1,5)-1= 0,5	

Lo que, traducido en términos de carga (KN/m²) para cada muestra:

MUESTRA 1		
	CARGA INICIAL (KN/m ²)	CARGA FINAL (KN/m ²)
ESCALÓN 1	25	200
ESCALÓN 2	200	100
ESCALÓN 3	100	25

MUESTRA 2		
	CARGA INICIAL (KN/m ²)	CARGA FINAL (KN/m ²)
ESCALÓN 1	25	100
ESCALÓN 2	100	25
ESCALÓN 3	25	12,5

MUESTRA 3		
	CARGA INICIAL (KN/m ²)	CARGA FINAL (KN/m ²)
ESCALÓN 1	25	200
ESCALÓN 2	200	400
ESCALÓN 3	400	150
ESCALÓN 4	150	25

MUESTRA 4		
	CARGA INICIAL (KN/m ²)	CARGA FINAL (KN/m ²)
ESCALÓN 1	25	150
ESCALÓN 2	150	300
ESCALÓN 3	300	125
ESCALÓN 4	125	25

MUESTRA 5		
	CARGA INICIAL (KN/m ²)	CARGA FINAL (KN/m ²)
ESCALÓN 1	12,5	37,5
ESCALÓN 2	37,5	62,5
ESCALÓN 3	62,5	12,5

MUESTRA 6		
	CARGA INICIAL (KN/m ²)	CARGA FINAL (KN/m ²)
ESCALÓN 1	12,5	50
ESCALÓN 2	50	75
ESCALÓN 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.

En el momento de retirada de toda la carga, se deja que la muestra expanda hasta que no se registre expansión en el extensómetro por un período de 24 horas.

A continuación vamos a ver cuatro ejemplos, dos escalones de carga y dos de descarga. Escogeremos dos escalones de carga con una diferencia de peso considerable, por ejemplo: el escalón 1 de la muestra 1 y el escalón 1 de la muestra 5. En descarga, utilizaremos el escalón 2 de la muestra 1 y el escalón 3 de la muestra 3.

❖ 3.3.3.1 ESCALONES DE CARGA

✚ 3.3.3.1.1 MUESTRA 1, ESCALÓN 1

En este escalón, a los 0,5 kg que teníamos en la precarga, se le añadirá un peso de 3,5 kg, sumando un peso total de 4 kg. Como vemos, es un aumento de carga considerable respecto a lo que dicta la normativa.

Aprovechando que este es el primer ejemplo vamos a comentar un poco 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	1	
Fecha	21/03/2017	
H _{muestra inicial}	16,92	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.

Ejemplo de escalón de carga (Muestra I, escalón nº 1)

Escalón de carga						
	Peso aplicado	Relación de carga	Carga aplicada	Presión	Presión	Presión
	kg		Kg	kg/cm ²	N/m ²	kN/m ²
Carga inicial	0,5	10	5	0,255	24981,0	24,98
Incremento de carga	3,5	10	35	1,783	174866,7	174,87
Carga final	4	10	40	2,037	199847,7	199,86

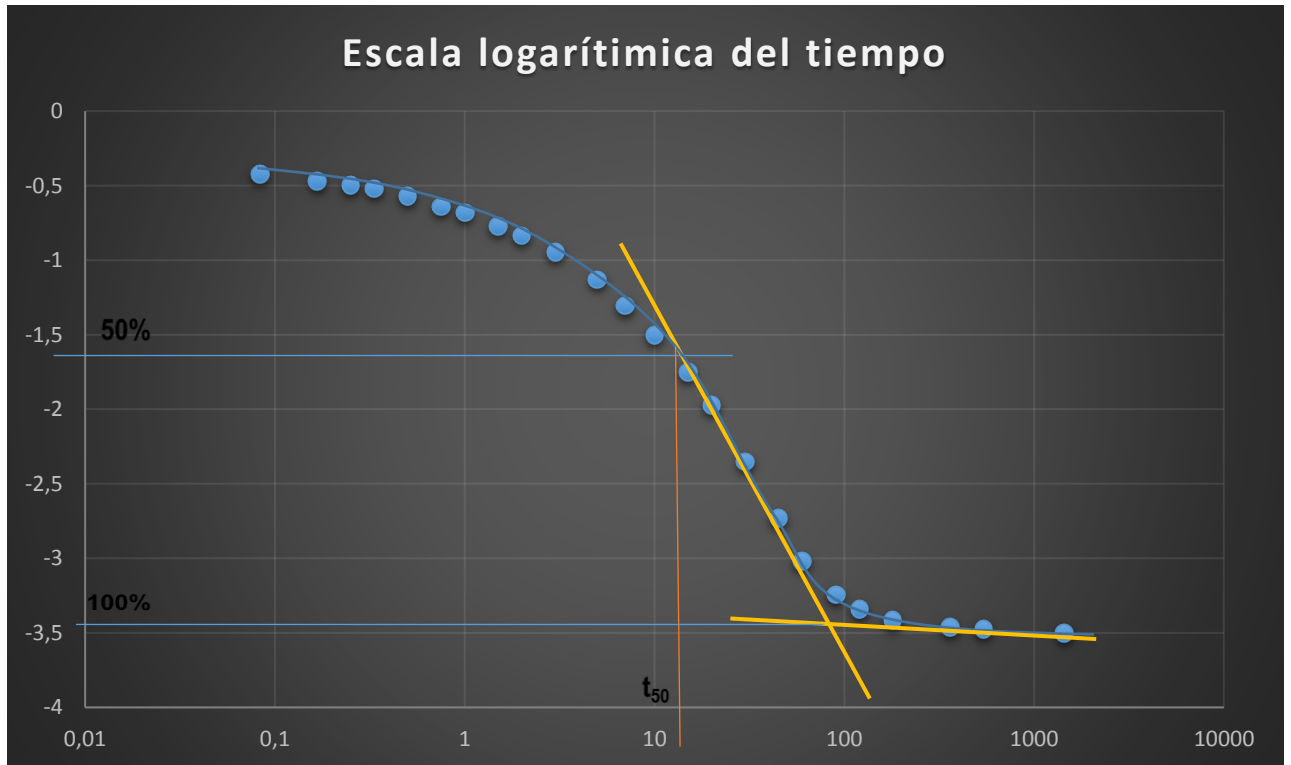
Como último apartado antes de aplicar los dos métodos para obtener los coeficientes, vamos a exponer en la siguiente página, una tabla resumen de los diferentes intervalos donde se toman las lecturas, así como las deformaciones producidas en cada intervalo y la altura instantánea:

ENSAYO CONSOLIDACIÓN CON ESCALONES DE CARGA NO CONTEMPLADOS EN LA NORMATIVA

Tiempo	Tiempo (minutos)	Lectura instantanea		Tiempo (Raiz2 min)	Tiempo (log10 min)	Deformación muestra mm	Hinstantaneo mm	
		Vueltas	Rayitas					
5	s	0,083333333	6	50	0,289	1,079181246	-0,42	16,5
10	s	0,166666667	6	45	0,408	-0,77815125	-0,47	16,45
15	s	0,25	6	42,5	0,500	0,602059991	-0,495	16,425
20	s	0,333333333	6	40	0,577	0,477121255	-0,52	16,4
30	s	0,5	6	35	0,707	0,301029996	-0,57	16,35
45	s	0,75	6	28	0,866	0,124938737	-0,64	16,28
1	min	1	6	24	1,000	0	-0,68	16,24
1,5	min	1,5	6	15	1,225	0,176091259	-0,77	16,15
2	min	2	6	8,5	1,414	0,301029996	-0,835	16,085
3	min	3	5	97,5	1,732	0,477121255	-0,945	15,975
5	min	5	5	79	2,236	0,698970004	-1,13	15,79
7	min	7	5	61,5	2,646	0,84509804	-1,305	15,615
10	min	10	5	42	3,162	1	-1,5	15,42
15	min	15	5	17	3,873	1,176091259	-1,75	15,17
20	min	20	4	95	4,472	1,301029996	-1,97	14,95
30	min	30	4	57	5,477	1,477121255	-2,35	14,57
45	min	45	4	19	6,708	1,653212514	-2,73	14,19
1	hora	60	3	90	7,746	1,77815125	-3,02	13,9
1,5	horas	90	3	67,8	9,487	1,954242509	-3,242	13,678
2	horas	120	3	58,2	10,954	2,079181246	-3,338	13,582
3	horas	180	3	50,9	13,416	2,255272505	-3,411	13,509
6	horas	360	3	46	18,974	2,556302501	-3,46	13,46
9	horas	540	3	44,5	23,238	2,73239376	-3,475	13,445
24	horas	1440	3	42	37,947	3,158362492	-3,5	13,42

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

➤ **Método de logaritmo del tiempo:**



Ejemplo de escalón de carga (Muestra I, escalón nº 1)

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:

$$H = \frac{H_{media}}{2} = \frac{\frac{H_{inicial} + H_{final}}{2}}{2} = \frac{\frac{16,92 + 13,42}{2}}{2} = 7,585 \text{ mm.}$$

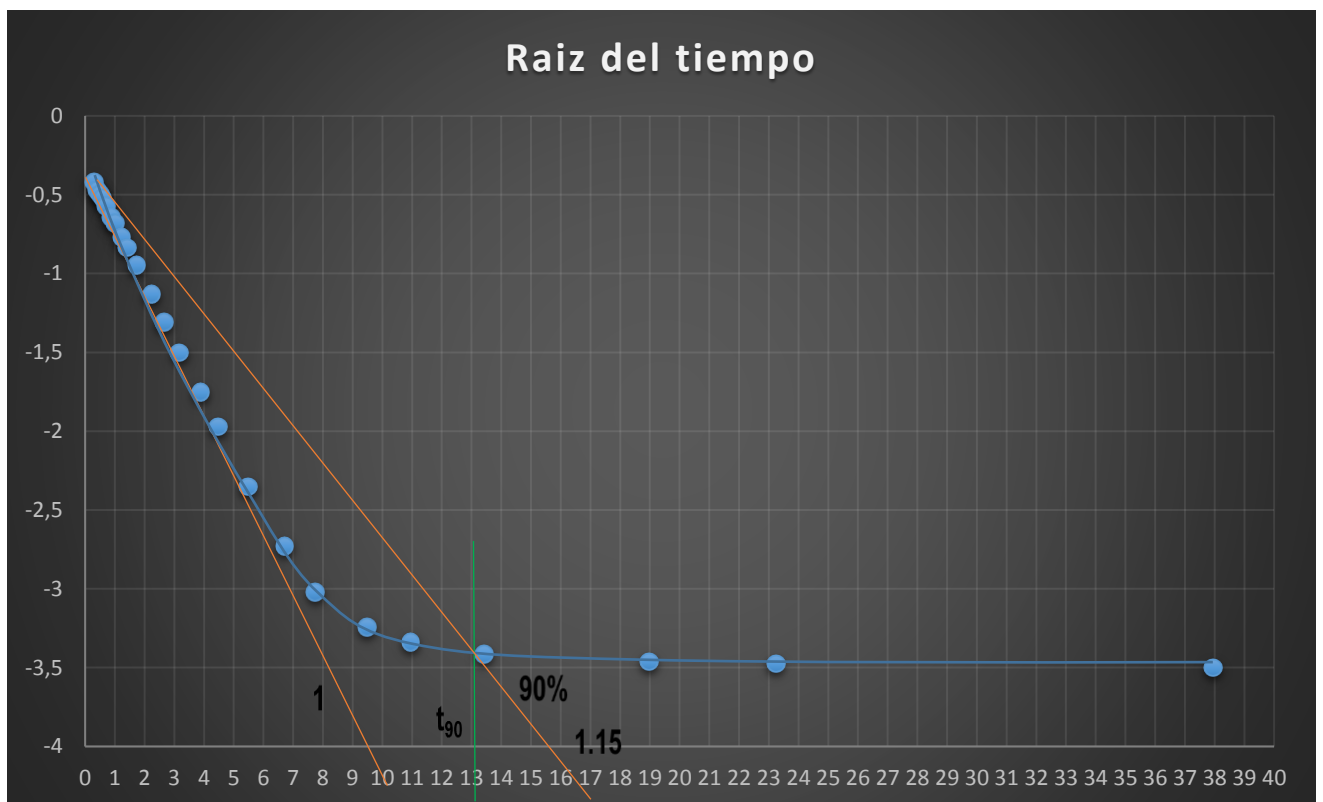
Por lo tanto, en este caso el valor de C_v , sería de:

$$C_v = \frac{0,197 \cdot 7,585^2}{25} = 0,453 \text{ mm}^2/\text{min} = \mathbf{0,238 \text{ m}^2/\text{año}}$$

➤ 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 cortará 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 I, escalón n° 1)

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:

$$C_V = \frac{0,848 \times 7,585^2}{171,61} = \frac{0,284 \text{ mm}^2}{\text{min}} = \mathbf{0.15 \text{ m}_2/\text{año}}$$

3.3.3.1.2 MUESTRA 5, ESCALÓN 1

En este escalón, al contrario que en el anterior, ejecutaremos un incremento de peso pequeño, añadiéndole 0,5 kg a los 0,25 kg de precarga. Igual que anteriormente, explicaremos este caso.

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 N°	1	
Fecha	04/04/2017	
H muestra inicial	18,49	mm

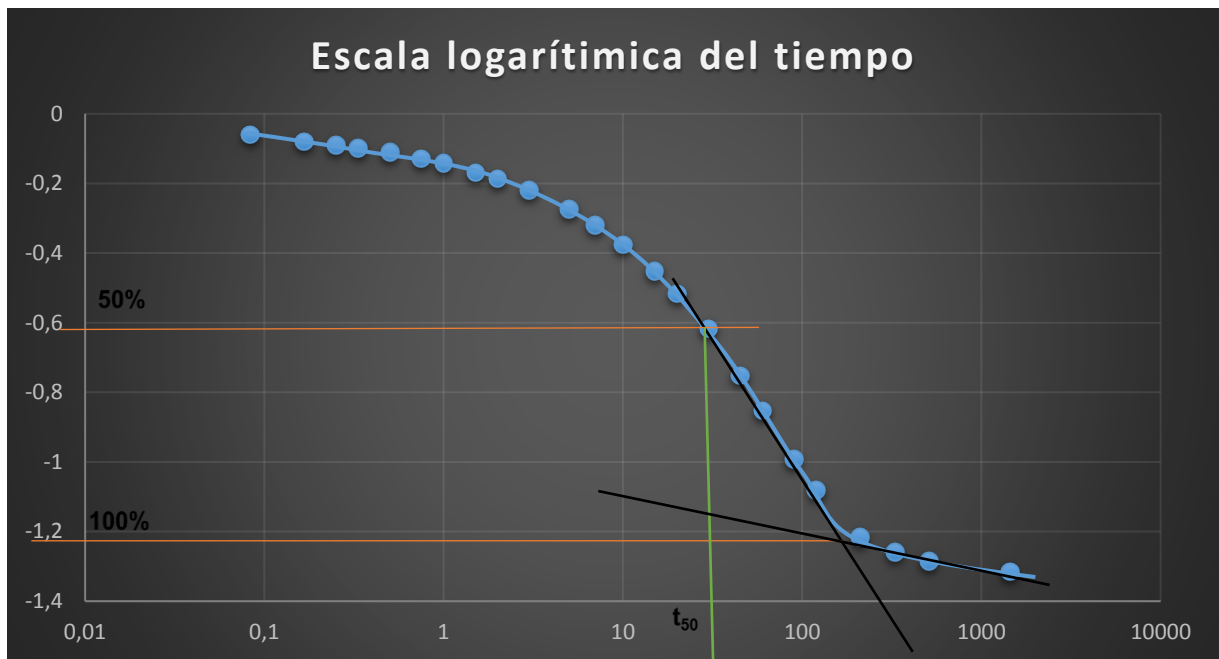
Escalón de carga						
	Peso aplicado kg	Relación de carga	Carga aplicada kg	Presión kg/cm ²	Presión N/m ²	Presión kN/m ²
Carga inicial	0,25	10	2,5	0,127	12490,5	12,49
Incremento de carga	0,5	10	5	0,255	24981,0	24,98
Carga final	0,75	10	7,5	0,382	37471,4	37,47

Ejemplo de escalón de carga (Muestra V, escalón n° 1)

ENSAYO CONSOLIDACIÓN CON ESCALONES DE CARGA NO CONTEMPLADOS EN LA NORMATIVA

Tiempo		Tiempo (minutos)	Lectura instantanea		Tiempo (Raiz2 min)	Tiempo (log10 min)	Deformación	Hinstantaneo mm
			Vueltas	Rayitas			muestra mm	
5	s	0,083333333	8	43	0,289	1,079181246	-0,06	18,43
10	s	0,166666667	8	41	0,408	-0,77815125	-0,08	18,41
15	s	0,25	8	40	0,500	0,602059991	-0,09	18,4
20	s	0,333333333	8	39,2	0,577	0,477121255	-0,098	18,392
30	s	0,5	8	38	0,707	0,301029996	-0,11	18,38
45	s	0,75	8	36,1	0,866	0,124938737	-0,129	18,361
1	min	1	8	34,9	1,000	0	-0,141	18,349
1,5	min	1,5	8	32,2	1,225	0,176091259	-0,168	18,322
2	min	2	8	30,4	1,414	0,301029996	-0,186	18,304
3	min	3	8	27,1	1,732	0,477121255	-0,219	18,271
5	min	5	8	21,7	2,236	0,698970004	-0,273	18,217
7	min	7	8	17,1	2,646	0,84509804	-0,319	18,171
10	min	10	8	11,5	3,162	1	-0,375	18,115
15	min	15	8	3,8	3,873	1,176091259	-0,452	18,038
20	min	20	7	97,4	4,472	1,301029996	-0,516	17,974
30	min	30	7	87,3	5,477	1,477121255	-0,617	17,873
45	min	45	7	73,9	6,708	1,653212514	-0,751	17,739
1	hora	60	7	63,8	7,746	1,77815125	-0,852	17,638
1,5	horas	90	7	49,9	9,487	1,954242509	-0,991	17,499
2	horas	120	7	41	10,954	2,079181246	-1,08	17,41
3,5	horas	210	7	27,5	14,491	2,322219295	-1,215	17,275
5,5	horas	330	7	23,1	18,166	2,51851394	-1,259	17,231
8,5	horas	510	7	20,6	22,583	2,707570176	-1,284	17,206
24	horas	1440	7	17,5	37,947	3,158362492	-1,315	17,175

➤ Método del logaritmo del tiempo



Ejemplo de escalón de carga (Muestra V, escalón nº 1)

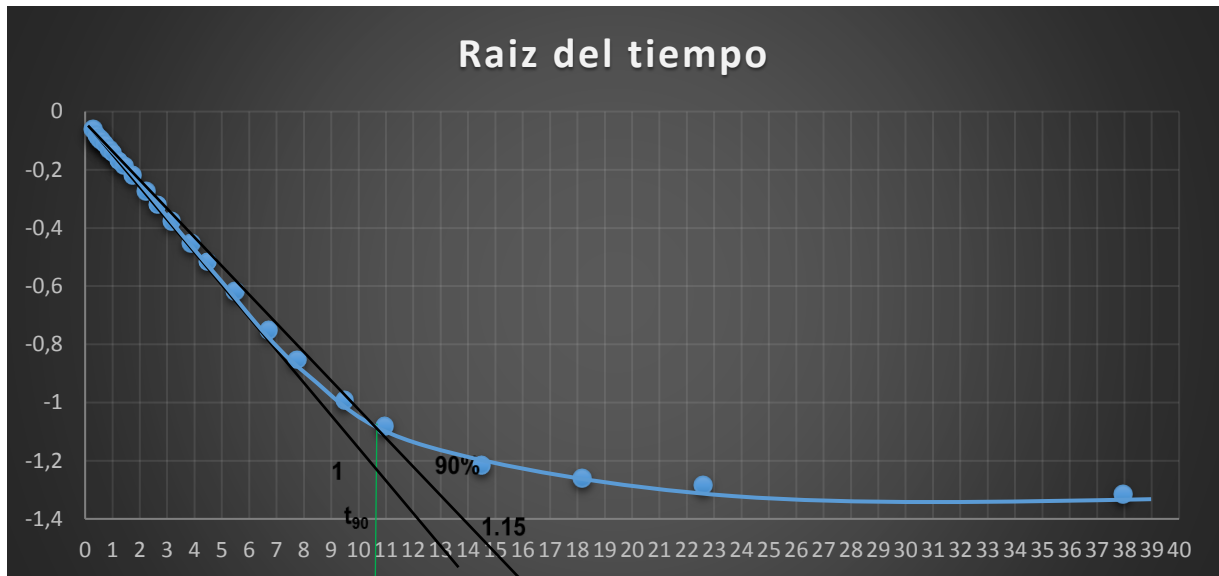
El valor de H, para este escalón sería:

$$H = \frac{H_{media}}{2} = \frac{\frac{H_{inicial} + H_{final}}{2}}{2} = \frac{18,49 + 17,175}{2} = 8,91625 \text{ mm.}$$

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

$$C_v = \frac{0,197 \times 8,91625^2}{50} = 0,313 \text{ mm}^2/\text{min} = \mathbf{0,165 \text{ m}_2/\text{año}}$$

➤ Método de la raíz del tiempo



Ejemplo de escalón de carga (Muestra II, escalón nº 8)

De esta forma, el valor del coeficiente es de:

$$C_v = \frac{0,848 \times 8,91625^2}{116,64} = 0,578 \text{ mm}^2/\text{min} = \mathbf{0,304 \text{ m}^2/\text{año}}$$

❖ 3.3.3.2 ESCALONES DE DESCARGA

🚦 3.3.3.2.1 MUESTRA 6, ESCALÓN 3

En este caso vamos a comentar, tal y como hemos hecho con los escalones de carga, los escalones de descarga que tenemos en nuestro ensayo. En nuestro primer ejemplo de descarga, hemos escogido un escalón con un decremento pequeño. Así, a los 1,5 kg que teníamos sumando precarga y los dos primeros escalones, le quitamos 1 kg de peso, quedándose en 0,5 kg.

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	06/04/2017	
H muestra inicial	15,591	mm

A continuación, 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	74,94
Incremento de carga	-1	10	-10	-0,509	-49961,9	-49,96
Carga final	0,5	10	5	0,255	24981,0	24,98

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

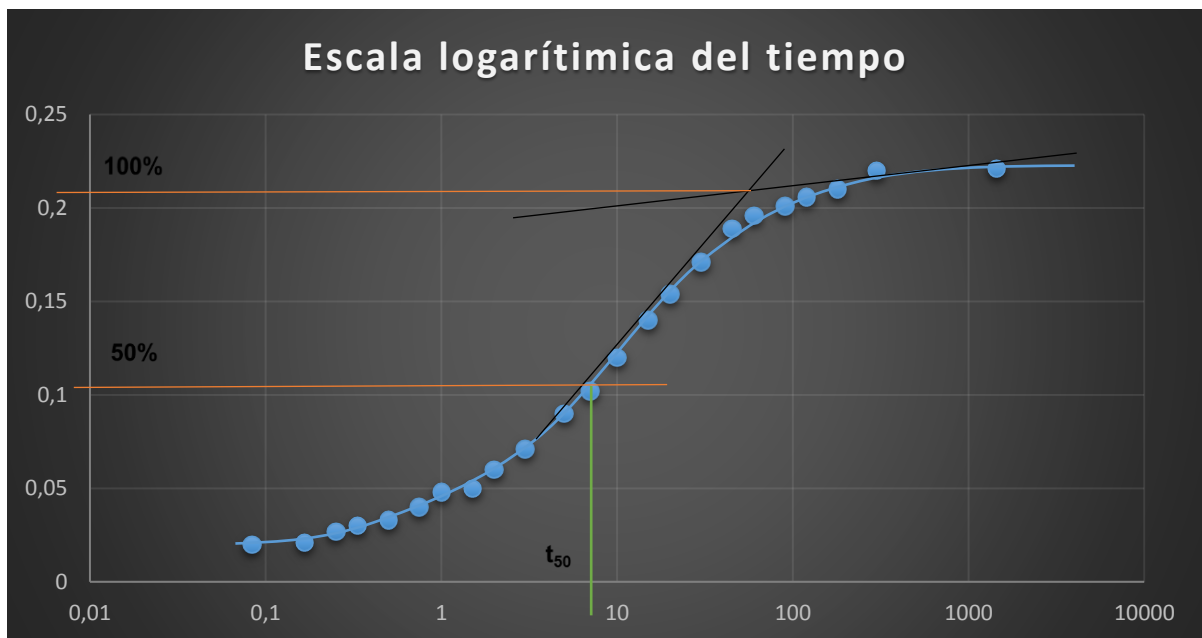
A continuación, mostramos las deformaciones producidas en la siguiente tabla:

Tiempo	Tiempo (minutos)	Lectura instantanea		Tiempo (Raiz2 min)	Tiempo (log10 min)	Deformación		
		Vueltas	Rayitas			muestra mm	Hinstantaneo mm	
5	s	0,083333333	5	91	0,289	1,079181246	0,02	15,611
10	s	0,166666667	5	91,1	0,408	-0,77815125	0,021	15,612
15	s	0,25	5	91,7	0,500	0,602059991	0,027	15,618
20	s	0,333333333	5	92	0,577	0,477121255	0,03	15,621
30	s	0,5	5	92,3	0,707	0,301029996	0,033	15,624
45	s	0,75	5	93	0,866	0,124938737	0,04	15,631
1	min	1	5	93,8	1,000	0	0,048	15,639
1,5	min	1,5	5	94	1,225	0,176091259	0,05	15,641
2	min	2	5	95	1,414	0,301029996	0,06	15,651
3	min	3	5	96,1	1,732	0,477121255	0,071	15,662
5	min	5	5	98	2,236	0,698970004	0,09	15,681
7	min	7	5	99,2	2,646	0,84509804	0,102	15,693
10	min	10	6	1	3,162	1	0,12	15,711
15	min	15	6	3	3,873	1,176091259	0,14	15,731
20	min	20	6	4,4	4,472	1,301029996	0,154	15,745
30	min	30	6	6,1	5,477	1,477121255	0,171	15,762
45	min	45	6	7,9	6,708	1,653212514	0,189	15,78
1	hora	60	6	8,6	7,746	1,77815125	0,196	15,787
1,5	horas	90	6	9,1	9,487	1,954242509	0,201	15,792
2	horas	120	6	9,6	10,954	2,079181246	0,206	15,797
3	horas	180	6	10	13,416	2,255272505	0,21	15,801
5	horas	300	6	11	17,321	2,477121255	0,22	15,811
24	horas	1440	6	11,1	37,947	3,158362492	0,221	15,812

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 hinchamiento (Cs)**. 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 VI, 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 expansión de la arcilla. En nuestro caso al drenar por arriba y por abajo, sería:

$$H = \frac{H_{media}}{2} = \frac{H_{inicial} + H_{final}}{2} = \frac{15,591 + 15,812}{2} = 7,85 \text{ mm.}$$

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

$$C_s = \frac{0,197 \times 7,85^2}{8} = 1,517 \text{ mm}^2/\text{min} = \mathbf{0,797 \text{ m}^2/\text{año}}$$

➤ **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 VI, escalón nº 3)

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

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

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

$$C_s = \frac{0,848 \times 7,85^2}{36} = 1,45 \text{ mm}^2/\text{min} = \mathbf{0,763 \text{ m}_2/\text{año}}$$

3.3.3.2.2 MUESTRA 3, ESCALÓN 3

En este escalón, se produce la descarga más grande, en la que se quitan 5 kg a los 8 kg que había, sumando la precarga y los dos primeros escalones.

A continuación, exponemos las tablas y resultados de este escalón:

Escalón de carga Nº	3	
Fecha	05/05/2017	
H muestra inicial	12	mm

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	8	10	80	4,074	399695,4	399,70
Incremento de carga	-5	10	-50	-2,546	-249809,6	-249,81
Carga final	3	10	30	1,528	149885,8	149,89

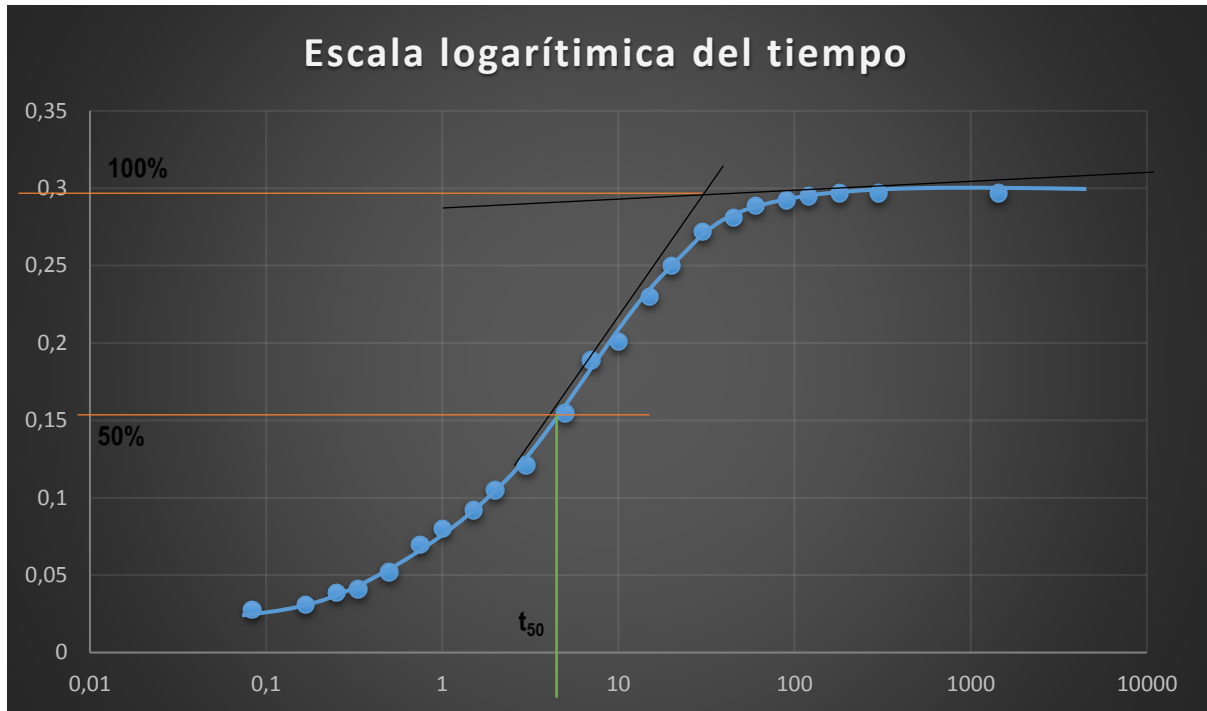
Ejemplo de escalón de descarga (Muestra III, escalón nº 3)

ENSAYO CONSOLIDACIÓN CON ESCALONES DE CARGA NO CONTEMPLADOS EN LA NORMATIVA

Tiempo		Tiempo (minutos)	Lectura instantanea		Tiempo (Raiz2 min)	Tiempo (log10 min)	Deformación	Hinstantaneo
			Vueltas	Rayitas			muestra	
							mm	mm
5	s	0,083333333	2	2,8	0,289	1,079181246	0,028	12,028
10	s	0,166666667	2	3,1	0,408	-0,77815125	0,031	12,031
15	s	0,25	2	3,9	0,500	0,602059991	0,039	12,039
20	s	0,333333333	2	4,1	0,577	0,477121255	0,041	12,041
30	s	0,5	2	5,2	0,707	0,301029996	0,052	12,052
45	s	0,75	2	7	0,866	0,124938737	0,07	12,07
1	min	1	2	8	1,000	0	0,08	12,08
1,5	min	1,5	2	9,2	1,225	0,176091259	0,092	12,092
2	min	2	2	10,5	1,414	0,301029996	0,105	12,105
3	min	3	2	12,1	1,732	0,477121255	0,121	12,121
5	min	5	2	15,5	2,236	0,698970004	0,155	12,155
7	min	7	2	18,9	2,646	0,84509804	0,189	12,189
10	min	10	2	20,1	3,162	1	0,201	12,201
15	min	15	2	23	3,873	1,176091259	0,23	12,23
20	min	20	2	25	4,472	1,301029996	0,25	12,25
30	min	30	2	27,2	5,477	1,477121255	0,272	12,272
45	min	45	2	28,1	6,708	1,653212514	0,281	12,281
1	hora	60	2	28,9	7,746	1,77815125	0,289	12,289
1,5	horas	90	2	29,25	9,487	1,954242509	0,2925	12,2925
2	horas	120	2	29,5	10,954	2,079181246	0,295	12,295
3	horas	180	2	29,7	13,416	2,255272505	0,297	12,297
5	horas	300	2	29,7	17,321	2,477121255	0,297	12,297
24	horas	1440	2	29,7	37,947	3,158362492	0,297	12,297

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

➤ Método del logaritmo del tiempo



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

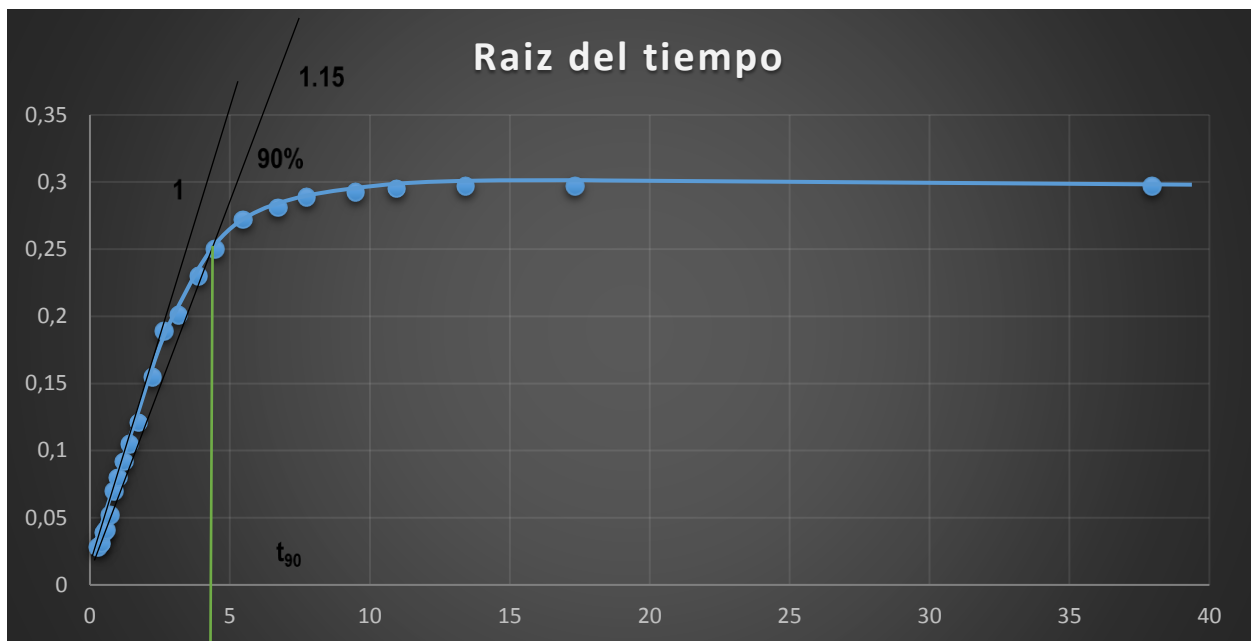
El valor de H, para este escalón sería:

$$H = \frac{H_{media}}{2} = \frac{H_{inicial} + H_{final}}{2} = \frac{12 + 12,297}{2} = 6,074 \text{ mm.}$$

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

$$C_s = \frac{0,197 \times 6,074^2}{5} = 1,454 \text{ mm}^2/\text{min} = \mathbf{0,764 \text{ m}_2/\text{año}}$$

➤ Método de la raíz del tiempo



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

De esta forma, el valor del coeficiente es de:

$$C_s = \frac{0,848 \times 6,074^2}{16} = 1,956 \text{ mm}^2/\text{min} = \mathbf{1,028 \text{ m}_2/\text{año}}$$

3.3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se van a mostrar el resumen de los resultados obtenidos de cada una de las seis muestras ensayadas.

❖ MUESTRA 1

En esta muestra, como en la mayoría de ellas, se realizan tres escalones de carga (además de su correspondiente precarga), siendo uno de carga y dos de descarga.

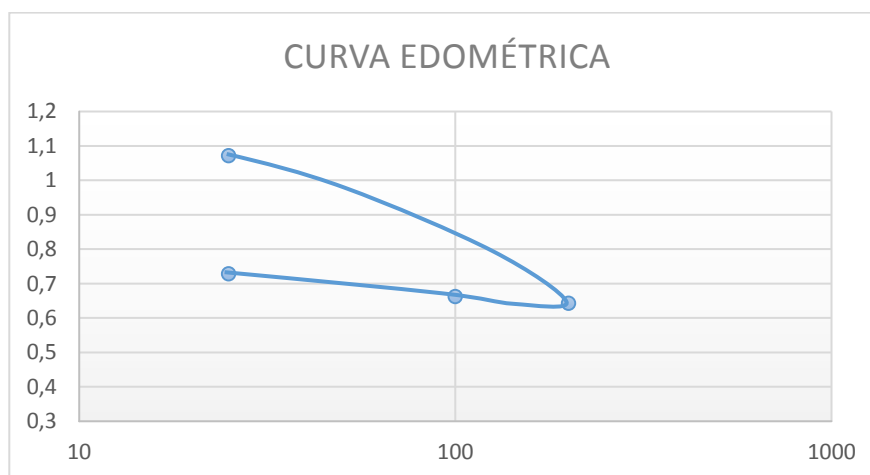
➤ **Coefficientes de consolidación:**

Coeficiente de consolidación c_v					
Escalón	Logaritmo del tiempo	Raíz del tiempo	Media	σ'_o (kN/m ²)	σ'_f (kN/m ²)
1	0,397	0,149	0,273	25,0	200
2 (c_s)	1,387	1,657	1,522	200	100
3 (c_s)	0,522	0,449	0,486	100	25

Tabla resumen de coeficientes de consolidación (Muestra I)

➤ **Curva edométrica:**

	H_f (mm)	σ' (kN/m ²)	e
Inicio	20	0	1,448581823
Precarga	16,92	25,0	1,071500222
Escalón 01	13,42	200	0,642998403
Escalón 02	13,577	100	0,662219771
Escalón 03	14,118	25	0,728453909



Curva Edométrica (Muestra I)

- **Coefficiente de compresibilidad (o hinchamiento), 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	0,00245045	0,273	0,86	9,8	0,00353355
Escalón 02	0,00019236	1,522	0,65	9,8	0,00173651
Escalón 03	0,00088379	0,486	0,70	9,8	0,00248104

❖ **MUESTRA 2**

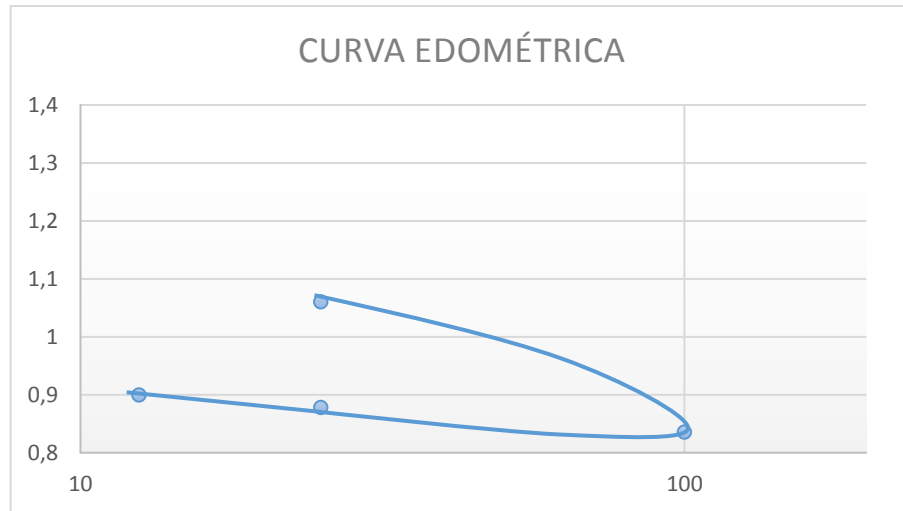
- **Coefficientes de consolidación:**

Coeficiente de consolidación c_v					
Escalón	Logaritmo del tiempo	Raíz del tiempo	Media	σ'_o (kN/m ²)	σ'_f (kN/m ²)
1	0,489	0,261	0,375	25,0	100
2 (c_s)	0,813	1,887	1,350	100	25
3 (c_s)	0,265	0,476	0,371	25	12

Tabla resumen de coeficientes de consolidación (Muestra II)

- **Curva edométrica:**

	H_f (mm)	σ' (kN/m ²)	e
Inicio	20	0	1,314165951
Precarga	17,81	25,0	1,060764779
Escalón 01	15,865	100	0,83571214
Escalón 02	16,235	25	0,87852421
Escalón 03	16,418	12	0,899698829



Curva Edométrica (Muestra II)

- **Coefficiente de compresibilidad (o hinchamiento), 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	0,00300299	0,375	0,95	9,8	0,00566699
Escalón 02	0,00057126	1,350	0,86	9,8	0,00407021
Escalón 03	0,00169526	0,371	0,89	9,8	0,0032596

❖ **MUESTRA 3**

Esta muestra, al igual que la MUESTRA 4, serán las únicas que tendrán cuatro escalones en lugar de tres.

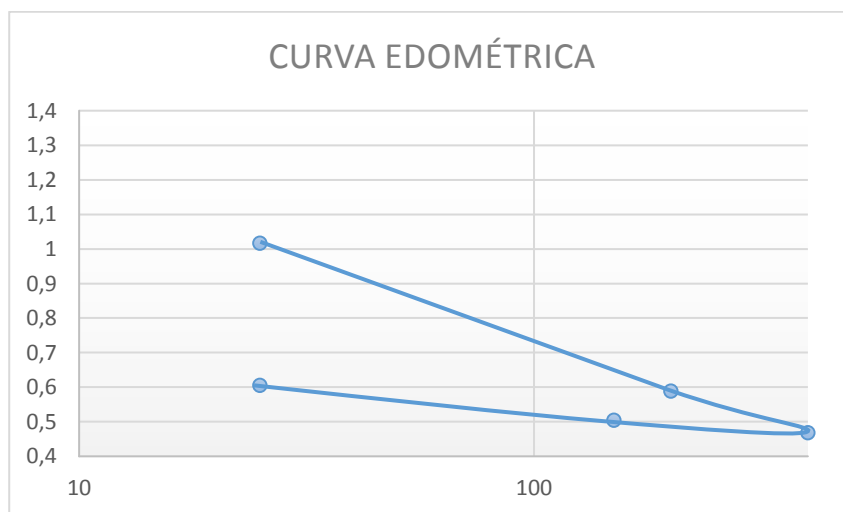
➤ **Coefficientes de consolidación:**

Coeficiente de consolidación c_v					
Escalón	Logaritmo del tiempo	Raiz del tiempo	Media	σ'_o (kN/m ²)	σ'_f (kN/m ²)
1	0,374	0,581	0,478	25,0	200
2	0,430	0,575	0,502	200	400
3 (Cs)	1,317	1,342	1,330	400	150
4 (cs)	0,377	0,692	0,534	150	25

Tabla resumen de coeficientes de consolidación (Muestra III)

➤ **Curva edométrica:**

	H_f (mm)	σ' (kN/m ²)	e
Inicio	20	0	1,446848621
Precarga	16,48	25,0	1,016203263
Escalón 01	12,98	200	0,588004755
Escalón 02	12	400	0,468109172
Escalón 03	12,297	150	0,504444874
Escalón 04	13,121	25	0,605255037



Curva Edométrica (Muestra III)

- **Coefficiente de compresibilidad (o hinchamiento), 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	0,00244871	0,478	0,80	9,8	0,00636234
Escalón 02	0,00059993	0,502	0,53	9,8	0,00193194
Escalón 03	0,00014545	1,330	0,49	9,8	0,00127548
Escalón 04	0,0008071	0,534	0,55	9,8	0,00271804

❖ **MUESTRA 4**

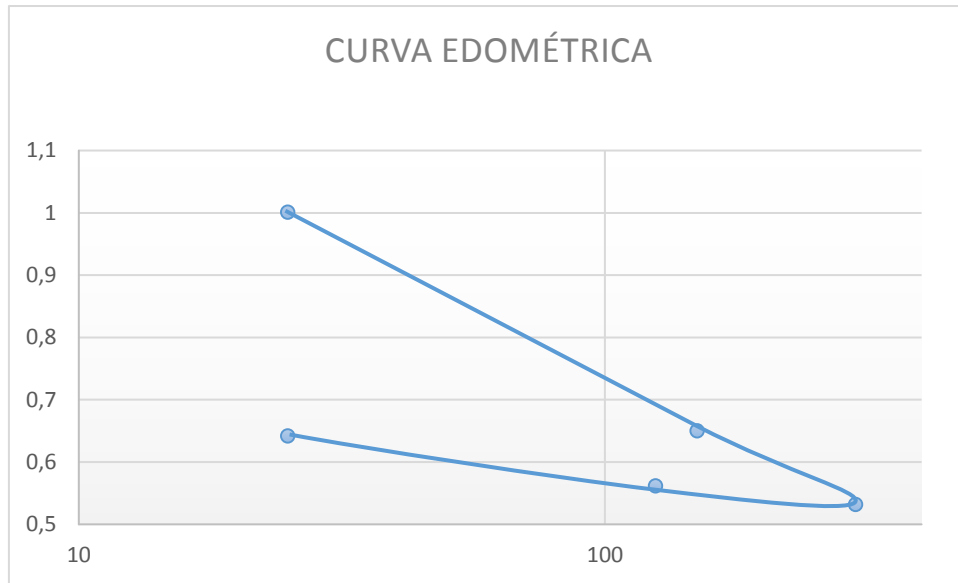
- **Coefficientes de consolidación**

Coeficiente de consolidación c_v					
Escalón	Logaritmo del tiempo	Raíz del tiempo	Media	σ'_o (kN/m ²)	σ'_f (kN/m ²)
1	0,409	0,393	0,401	25,0	150
2	0,496	0,663	0,580	150	300
3 (Cs)	0,881	0,790	0,836	300	125
4 (cs)	0,426	0,362	0,394	125	25

Tabla resumen de coeficientes de consolidación (Muestra IV)

- **Curva edométrica:**

	H_f (mm)	σ' (kN/m ²)	e
Inicio	20	0	1,37131565
Precarga	16,88	25,0	1,001390409
Escalón 01	13,92	150	0,650435692
Escalón 02	12,922	300	0,532107041
Escalón 03	13,172	125	0,561748487
Escalón 04	13,852	25	0,642373219



Curva Edométrica (Muestra IV)

- **Coefficiente de compresibilidad (o hinchamiento), 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	0,00280978	0,401	0,83	9,8	0,00604944
Escalón 02	0,00078946	0,580	0,59	9,8	0,00281876
Escalón 03	0,00016951	0,836	0,55	9,8	0,00089735
Escalón 04	0,00080686	0,394	0,60	9,8	0,00194327

❖ **MUESTRA 5**

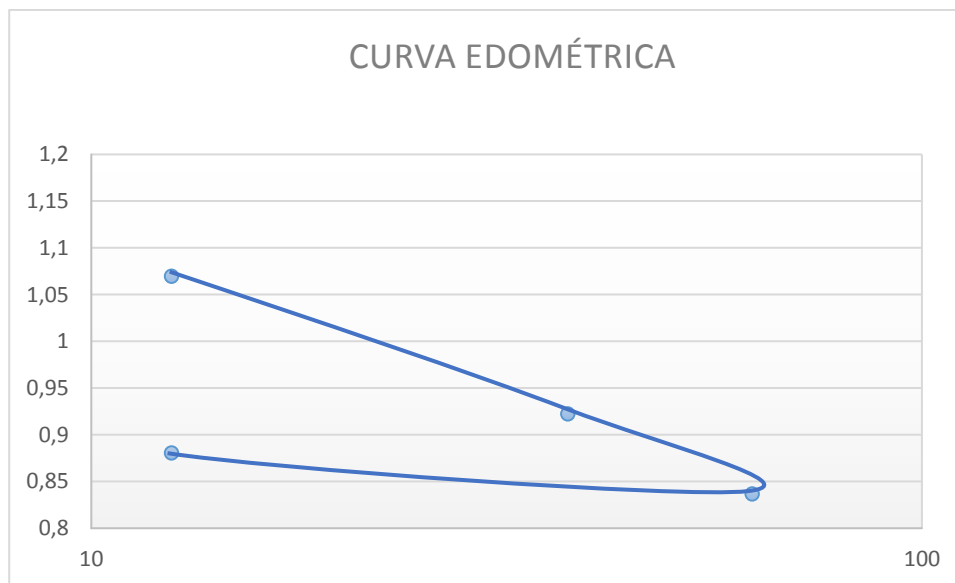
➤ **Coefficientes de consolidación:**

Coeficiente de consolidación c_v					
Escalon	Logaritmo del tiempo	Raiz del tiempo	Media	σ'_o (kN/m ²)	σ'_f (kN/m ²)
1	0,284	0,304	0,294	12,5	37
2	0,348	0,255	0,301	37	62
3 (c_s)	0,649	0,684	0,667	62	12

Tabla resumen de coeficientes de consolidación (Muestra V)

➤ **Curva edométrica:**

	H_f (mm)	σ' (kN/m ²)	e
Inicio	20	0	1,238488191
Precarga	18,49	12,5	1,069482332
Escalón 01	17,175	37	0,922301734
Escalón 02	16,411	62	0,836791485
Escalón 03	16,801	12	0,880442005



Curva Edométrica (Muestra V)

- **Coefficiente de compresibilidad (o hinchamiento), 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	0,00589171	0,294	1,00	9,8	0,0084998
Escalón 02	0,00342302	0,301	0,88	9,8	0,00537797
Escalón 03	0,00087368	0,667	0,86	9,8	0,00307133

❖ **MUESTRA 6**

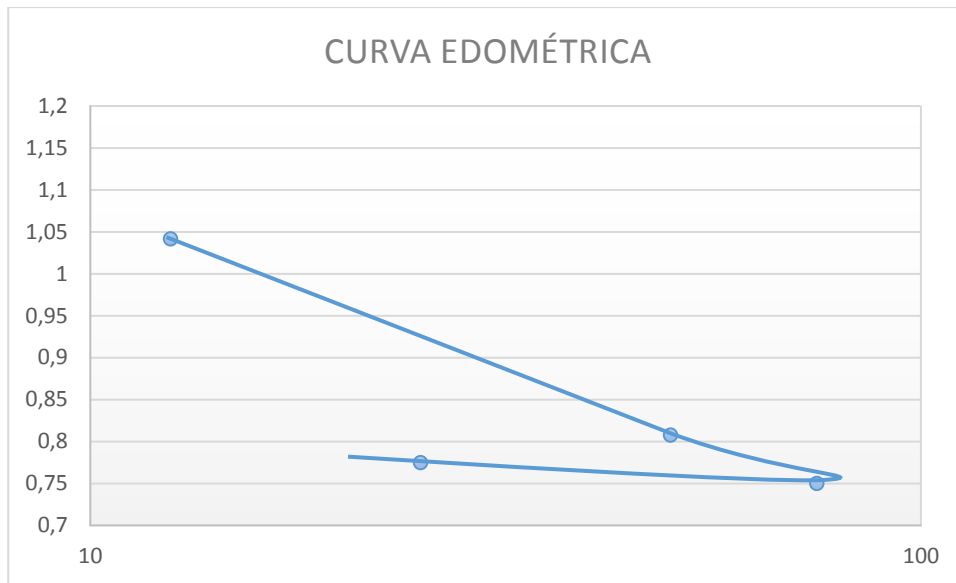
- **Coefficientes de consolidación:**

Coeficiente de consolidación c_v					
Escalon	Logaritmo del tiempo	Raiz del tiempo	Media	σ'_o (kN/m ²)	σ'_f (kN/m ²)
1	0,507	0,266	0,387	12,5	50
2	0,310	0,227	0,268	50	75
3 (c_s)	0,798	0,763	0,780	75	25

Tabla resumen de coeficientes de consolidación (Muestra VI)

- **Curva edométrica:**

	H_f (mm)	σ' (kN/m ²)	e
Inicio	20	0	1,244665837
Precarga	18,191	12,5	1,041635812
Escalón 01	16,106	50	0,807629398
Escalón 02	15,591	75	0,749829253
Escalón 03	15,812	25	0,774632811



Curva Edométrica (Muestra I)

- **Coefficiente de compresibilidad (o hinchamiento), 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	0,00624493	0,387	0,92	9,8	0,01229697
Escalón 02	0,00231377	0,268	0,78	9,8	0,00342131
Escalón 03	0,00049645	0,780	0,76	9,8	0,00215455

3.3.5 COMPARACIÓN DE CURVAS EDOMÉTRICAS CON OTRO ENSAYO DE LA MISMA ARCILLA

Para comenzar, expondremos los datos de un ensayo edométrico normalizado proporcionado por un compañero, junto con los obtenidos en cada una de las muestras de nuestro ensayo.

Edométricos Norma		
	σ' (kN/m ²)	e
	0	1,235588972
	12,49047975	1,0880401
	24,9809595	0,998616541
	49,961919	0,88124812
	99,92383799	0,737052632
DESCARGA	49,961919	0,756055138
DESCARGA	24,9809595	0,782882206
RECARGA	49,961919	0,767233083
RECARGA	99,92383799	0,722521303
	199,847676	0,611859649
	399,695352	0,49002005
DESCARGA	199,847676	0,521318296
DESCARGA	99,92383799	0,555969925

ENSAYO 01	
σ' (kN/m ²)	e
0	1,448581823
24,9809595	1,071500222
199,847676	0,642998403
99,92383799	0,662219771
24,9809595	0,728453909

ENSAYO 02	
σ' (kN/m ²)	e
0	1,314165951
24,9809595	1,060764779
99,92383799	0,83571214
24,9809595	0,87852421
12,49047975	0,899698829

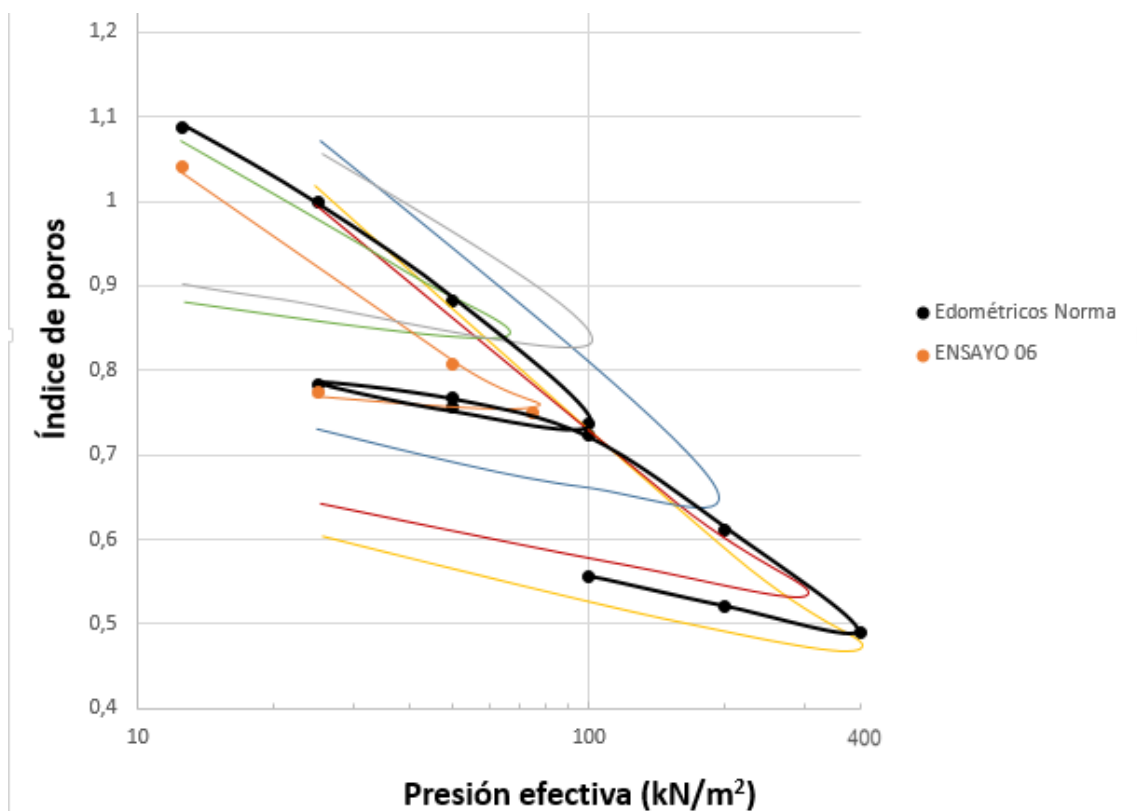
ENSAYO 03	
σ' (kN/m ²)	e
0	1,446848621
24,9809595	1,016203263
199,847676	0,588004755
399,695352	0,468109172
149,885757	0,504444874
24,9809595	0,605255037

ENSAYO 04	
σ' (kN/m ²)	e
0	1,37131565
24,9809595	1,001390409
149,885757	0,650435692
299,771514	0,532107041
124,9047975	0,561748487
24,9809595	0,642373219

ENSAYO 05	
σ' (kN/m ²)	e
0	1,238488
12,49047975	1,069482
37,47143925	0,922302
62,45239875	0,836791
12,49047975	0,880442

ENSAYO 06	
σ' (kN/m ²)	e
0	1,244665837
12,49047975	1,041635812
49,961919	0,807629398
74,9428785	0,749829253
24,9809595	0,774632811

Ahora, representaremos en una misma gráfica, todas las curvas edométricas, tanto las de nuestro ensayo como el de nuestro compañero.



Resumen curvas edométricas de nuestro ensayo y de un ensayo normalizado

En esta gráfica se puede observar cómo, 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.

Como consecuencia, los resultados obtenidos en nuestras 6 muestras son válidos y de directa aplicación a casos reales en los cuales los saltos tensionales que se producen en el terreno no son ni mucho menos los contemplados en la norma.

4. SIMULACIONES

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}	2	m
ρ_{ap}	16	kN/m^3
ρ_{sum}	6	kN/m^3
σ'_{fondo}	12	kN/m^2
σ'_{inicial}	12	kN/m^2

Sobrecarga Terraplén		
ρ_{ap}	19	kN/m^3
H_{terr}	2	m
$\sigma_{\text{sc}} = \sigma'_{\text{sc}}$	38	kN/m^2

Tensión efectiva final		
σ'_{fin}	50	kN/m^2

A la vista de los datos de la tabla, tenemos un estrato de suelo de 2 metros de espesor con una tensión efectiva inicial (σ'_{inicial}) de **12 kPa**, en el cuál vamos a aplicar una sobrecarga en superficie de **38 kPa** debida a la construcción de un terraplén. De esta manera, la tensión efectiva final (σ'_{final}) a la que quedará sometido el suelo es de **50 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_o), necesarios para realizar una análisis de la magnitud de los asentamientos, vamos a tomar los correspondientes a la muestra 6 correspondientes al escalón 1, que va de **12,5 kPa** a **50 kPa**. Estos datos se recogen en la siguiente tabla:

Datos de la muestra 6		
c_v	0,387	$\text{m}^2/\text{año}$
a_v	0,00624	m^2/KN
e_o	0,92	
k_v	0,0123	$\text{m}/\text{año}$

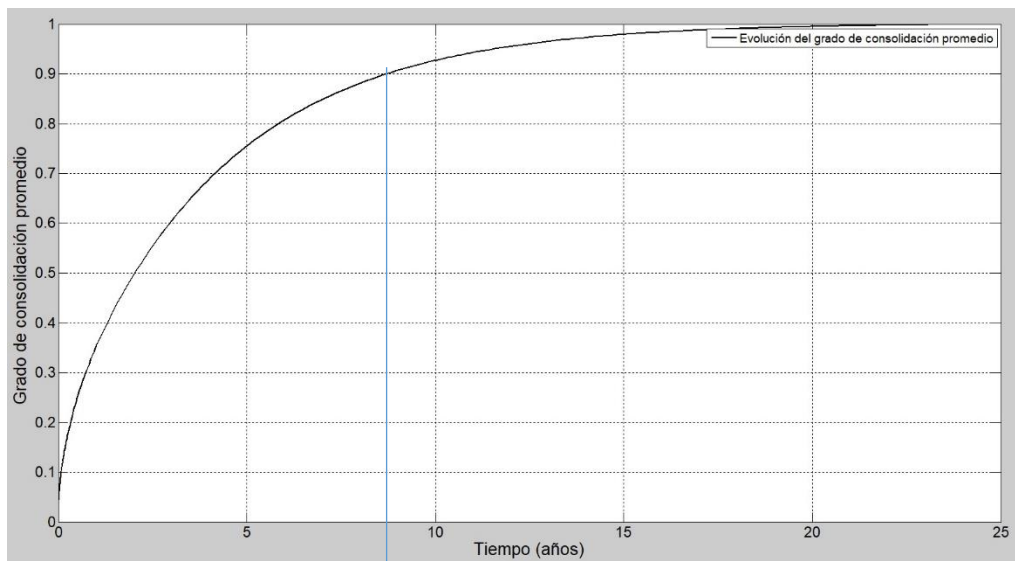
A la hora de realizar las simulaciones, el terreno se ha dividido en 80 subdivisiones (o celdas). Esta reticulación es suficiente para obtener una alta precisión en los resultados, con errores menores al 1%.

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.

4.1 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:

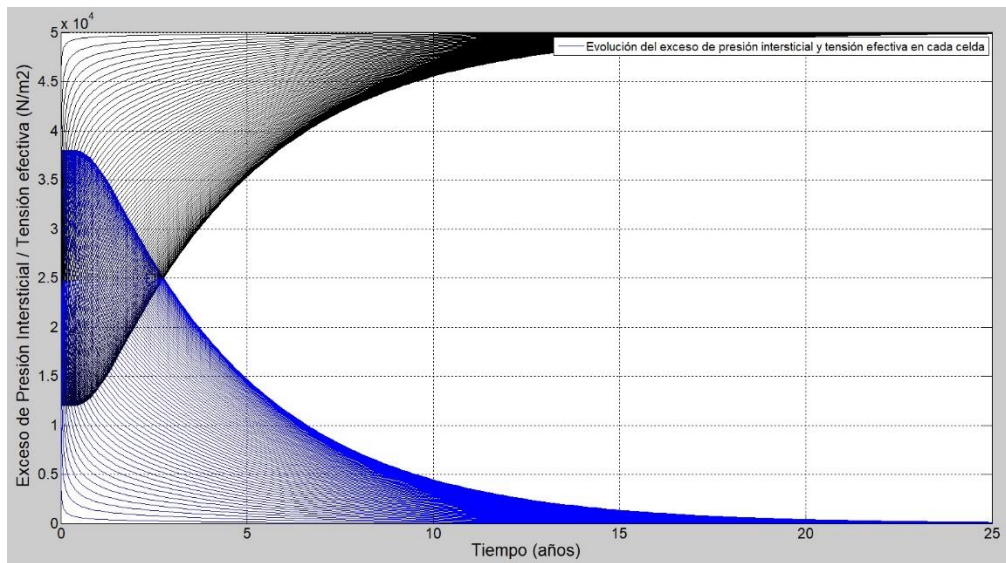
$$\bar{U}_v = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M^2} e^{(-M^2 \cdot T_v)}$$



Evolución del grado medio de consolidación para el problema propuesto

A la vista de la gráfica, se puede comprobar cómo la práctica consolidación del terreno se produce transcurridos los 23 años, mientras que una consolidación del 90%, valor comúnmente aceptado para dar por finalizado el proceso de consolidación, se alcanza transcurridos los 7,5 años.

4.2 EVOLUCIÓN DE LA TENSIÓN EFECTIVA Y DEL EXCESO DE PRESIÓN INTERSTICIAL



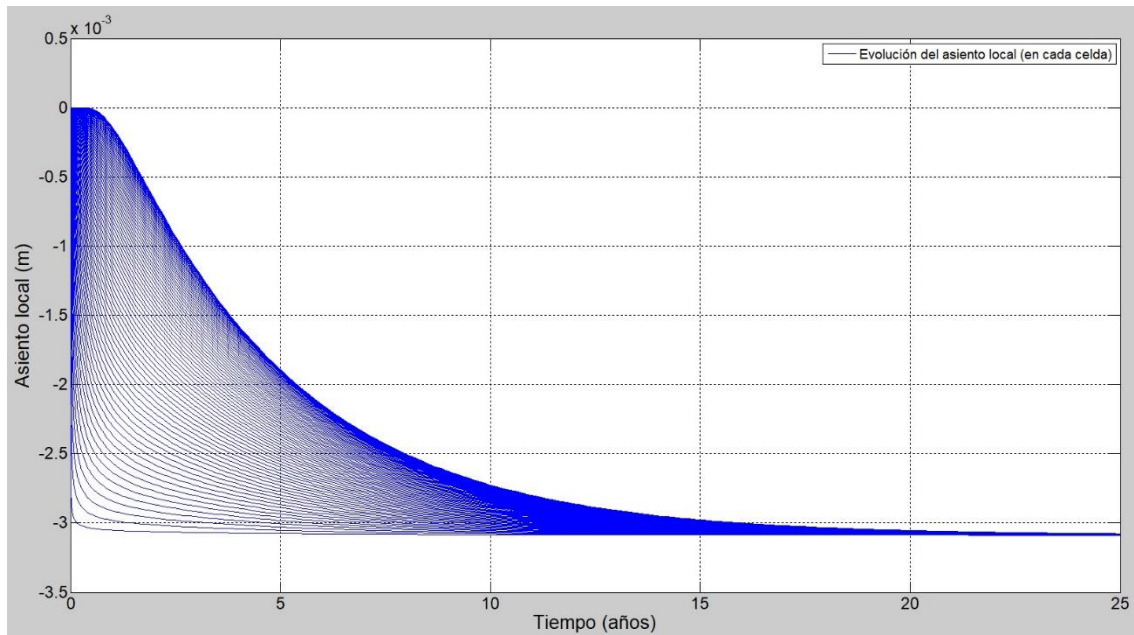
Evolución del exceso de presión intersticial y presión efectiva en función del tiempo y la profundidad

Esta representación ilustra de una manera muy clara cómo 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 pausado, en comparación con las capas superiores.

4.3 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).

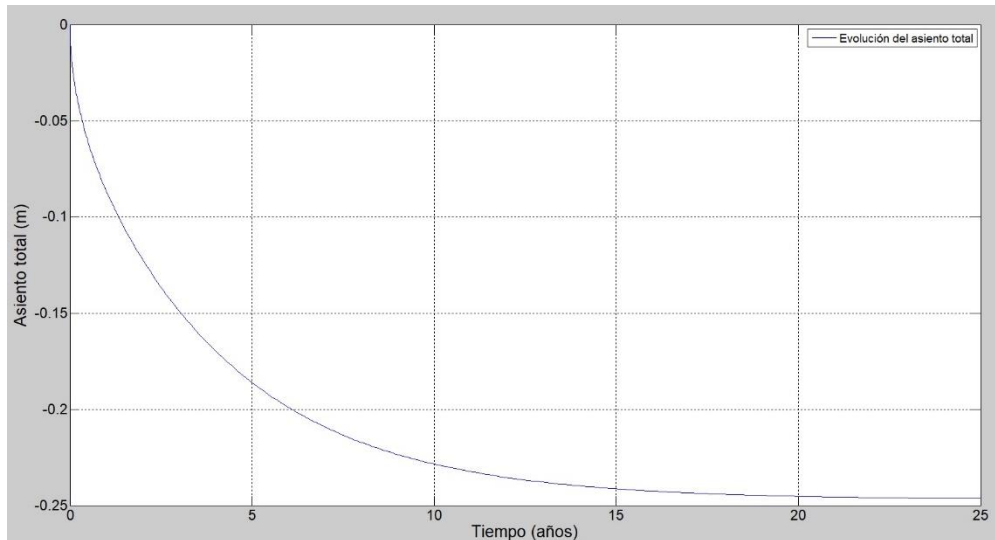


Evolución de los asentamientos locales de cada celda de suelo

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).

4.4 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.



Evolución del asentamiento acumulado en superficie

Para nuestro caso, el asentamiento final por consolidación es de **0.24 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.

5. CONCLUSIONES

Como conclusión, tenemos en cuenta que el estudio de la **compresibilidad 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 este tipo de material.

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 este proyecto, hemos realizado un estudio de seis muestras diferentes del mismo tipo de arcilla, para así, ver cómo ésta se comporta frente a la consolidación.

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 tomados todos los datos en el laboratorio se llevó a cabo la realización de las curvas edométrica y la curva de consolidación.

Finalmente, se llevó a cabo una comparación de las curvas de consolidación de las seis muestras con la curva del ensayo estándar o normalizada.

Cuando se ha realizado el estudio completo de nuestra muestra, se procede a plantear un caso real de consolidación de terreno, en el cual, supondremos que encima de una capa de 2 m de espesor de nuestra muestra, se apoyará un terraplén de 2 m. Este caso será resuelto mediante simulaciones con un programa informático, obteniendo unas gráficas que nos ilustran cómo se comporta nuestro suelo.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Atkinson, J. *The mechanics of soils and foundations*. Mc Graw-Hill (1993)
- 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)
- Sagasetta, 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)