



1. Compresibilidad de Suelos. Teoría de la Consolidación

Recordatorio

$$\sigma = \sigma' + u$$

Tensión total = tensión efectiva + presión de poros

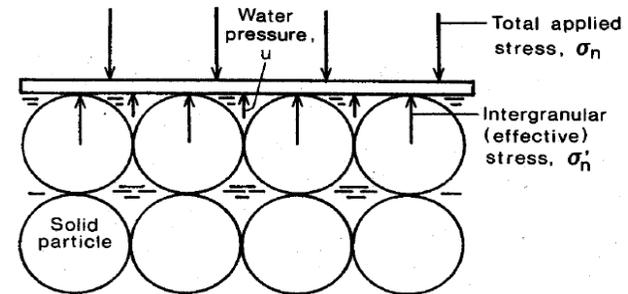


Fig. 2.10. Intergranular (effective) and water pressures in a saturated soil.

Ref. Mitchell Fundamentals of soil behavior. Wiley (1996)

$$\sigma' = \sigma - u$$

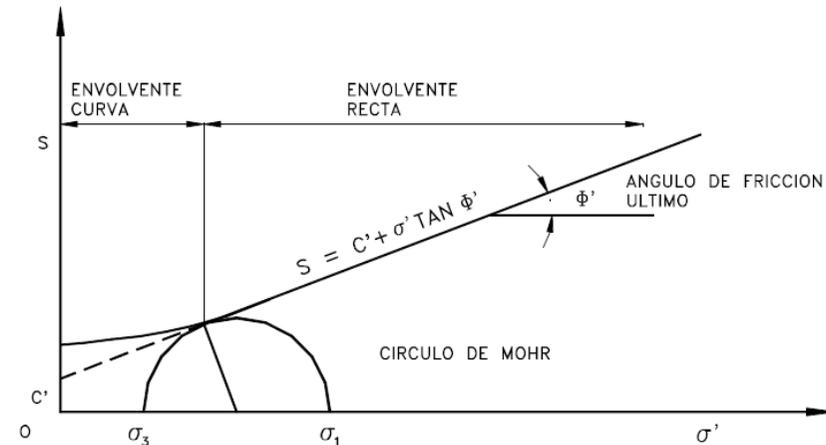
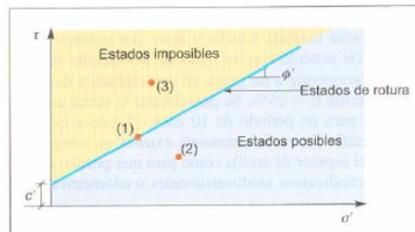
Variaciones en la tensión efectiva



reajuste de las partículas y mayor compacidad

Círculo de rotura de Mohr-Coulomb

$$\tau = c' + (\sigma_n - u) \operatorname{tg} \phi' = c' + \sigma' \operatorname{tg} \phi'$$



Relaciones tensión-deformación (recordatorio)

Necesario para saber en función de las tensiones aplicadas las deformaciones sufridas y saber si son admisibles.

Recurrimos a las fórmulas de la teoría de la elasticidad.

El módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson son magnitudes que describen aproximadamente el comportamiento de un suelo para una combinación particular de esfuerzos.

teoría de elasticidad

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E}$$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = -\nu\varepsilon_z$$

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z =$ positivas cuando son compresiones

E = Módulo de Young o de elasticidad

$\nu =$ Coeficiente de Poisson

Las curvas reales esfuerzo-deformación no son lineales, pero nosotros las asemejaremos a tramos rectos

Proceso de Consolidación

Proceso que se produce en suelos y consiste en la reducción del volumen total del suelo por la colocación de una carga o el drenaje del terreno

En suelos saturados  incremento de presión de poros

El exceso de presión intersticial se disipa a una velocidad controlada por la permeabilidad del suelo (K). El esfuerzo efectivo va incrementándose a medida que fluye el agua.



Consecuencias de la Consolidación

- Incremento de esfuerzo efectivo
- Reducción de volumen de huecos
- Reducción del volumen total
- Asentamientos del terreno
- Asentamientos de la estructura

Suelos arenosos

¿Qué pasa?

Alta permeabilidad



Asientos rápidos

Generalmente al finalizar la construcción ya se han producido todos

Métodos o teoría de Elasticidad

Suelos arcillosos

¿Qué pasa?

Baja permeabilidad



Asientos lentos

La estructura sigue asentándose durante años después de la finalización de la construcción

Teoría de Terzaghi:

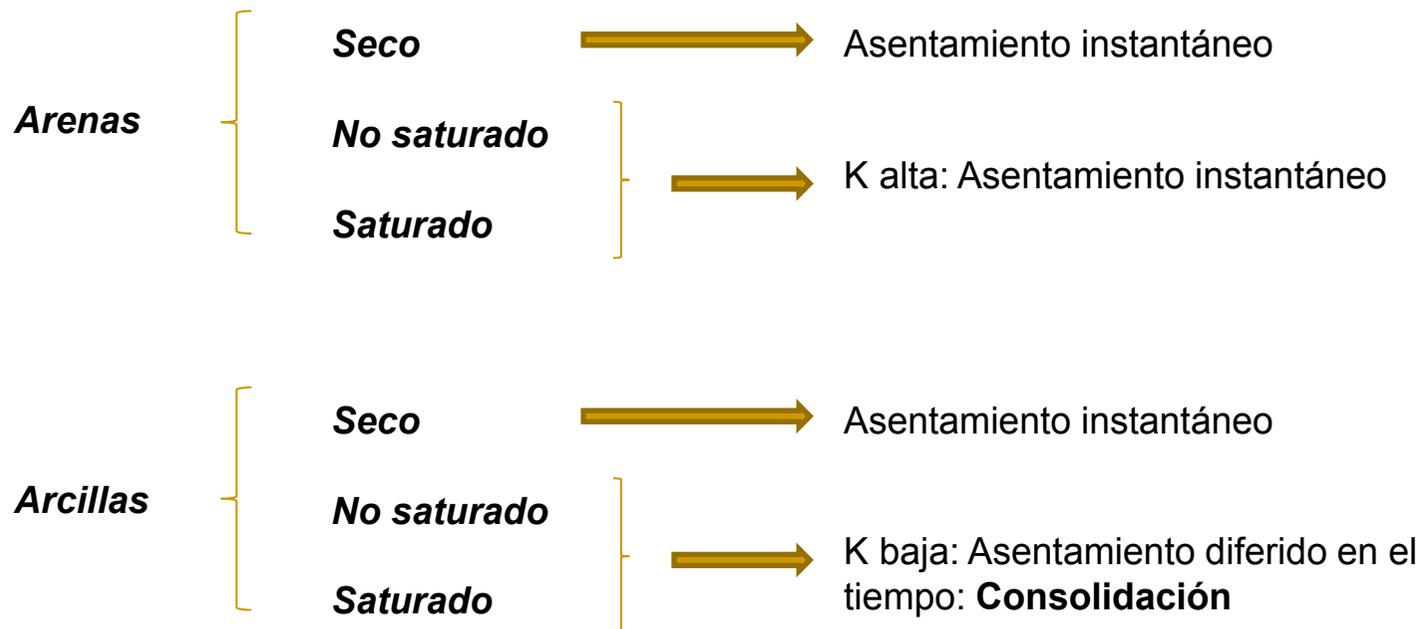
Asentamientos totales

Velocidad de asientos

Velocidad de asentos

El tiempo en el que se desarrollan los asentos depende de:

- Carga externa
- Conductividad hidráulica (k)



Objeto de estudio

Nos centraremos en el estudio de **terrenos blandos** (generalmente suelos cohesivos, arcillas o limos arcillosos), **bajo cargas estáticas y continuas con presencia de agua** ya que la carga es absorbida en un primer instante por las partículas minerales y el agua pero la presión intersticial se va disipando a medida que el agua se mueve y es expulsada del suelo. Todo ello lleva a variaciones del volumen en función del tiempo.

sobrepresiones positivas



Reajuste de partículas y Consolidación

Presiones de poros negativas



Disminución del volumen de suelo por Succión
(suelos semisaturados)

Estos estratos los consideraremos **confinados** ya que la adherencia y fricción en los bordes impiden la expansión lateral. Los estudios y ensayos se realizarán por lo tanto en muestras lateralmente confinadas.

Nota: En el estudio básico de la consolidación nos centraremos en *arcillas no sensitivas normalmente consolidadas*

Historia de tensiones (I)

Las **Curvas índice de poros e – $\log \sigma$** para estudiar el comportamiento esfuerzo-deformación se expresan en escala logarítmica para:

- Mostrar el comportamiento para una amplia gama de presiones
- Las curvas se vuelven generalmente más o menos rectas para presiones grandes (facilidad de estudio en arcillas)

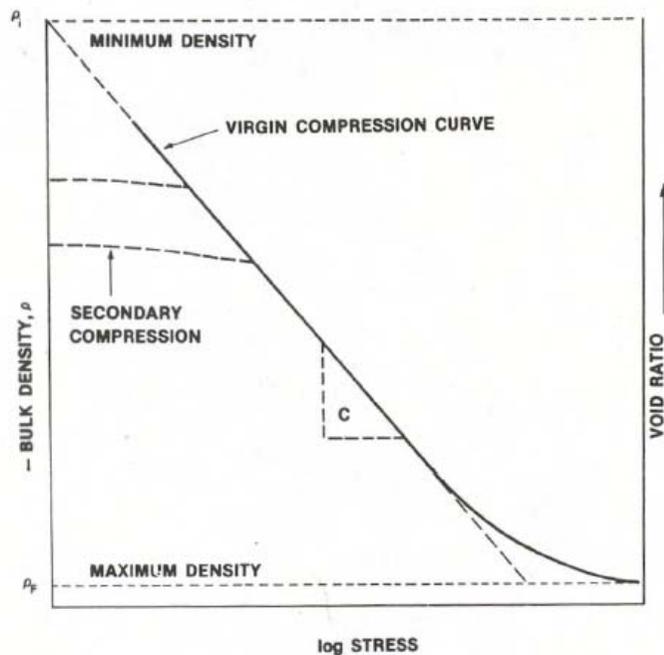
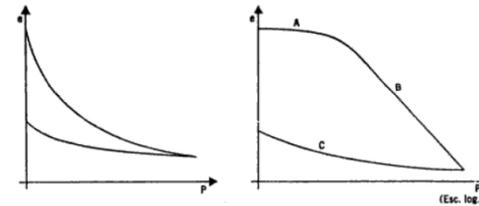


Fig. 1—Theoretical soil compression curve.

Ref.: Larson et al (1980)

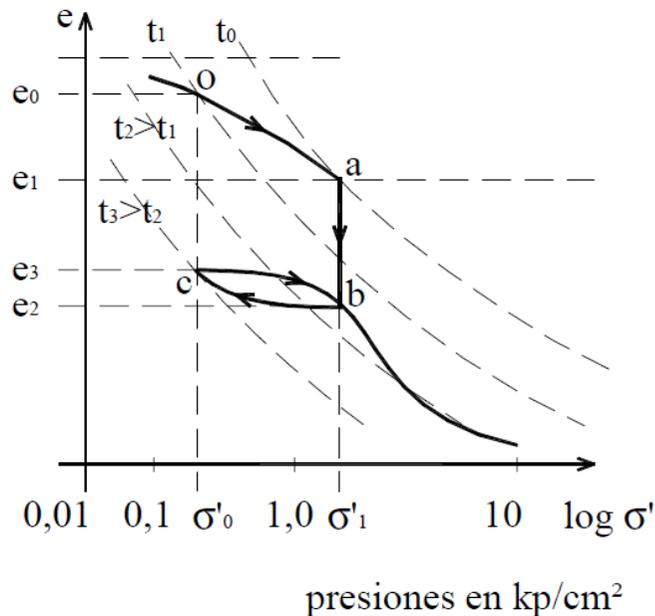


La tensión de preconsolidación (σ'_c) es la máxima tensión a la que se ha sometido un suelo a lo largo de su historia geológica.

- Si un suelo se somete a una carga exterior $< (\sigma'_c)$ se deforma por la rama secundaria de compresión.
- Si un suelo se somete a una carga exterior $> (\sigma'_c)$ se deforma por la rama virgen de compresión

Historia de tensiones (II)

Si suponemos un suelo arcilloso sedimentado en el que se han depositado sucesivas capas el índice de poros varía hasta un estado inicial “de equilibrio” e_0 .



Ref.: El Terreno. Matilde González (2001)

Si en “O” se añade una carga (se construye un edificio o estructura) se producirá un $\Delta\sigma'$ instantáneo que produce:

- Una disminución instantánea del índice de poros e_1 (rama o-a)
- Si perdura la carga se producirá una disminución de e hasta e_2 (rama a-b)

Si se quita la carga hasta σ_0 producirá un incremento de e hasta e_3 por la rama de descarga b-c

Si se vuelve a aplicar un $\Delta\sigma'$ se recuperará el índice de poros e_2 y a partir de ahí disminuirá e por una nueva curva de compresión virgen.

Por lo tanto añadir una carga y dejarla actuar un tiempo equivale a un aumento de la edad geológica del yacimiento (y por lo tanto un e inferior)

Suelos Normalmente Consolidados y Sobreconsolidados

Suelos normalmente consolidados:

Yacimientos en los que sólo ha actuado la carga de consolidación en su historia geostática. Es la máxima carga que ha soportado el yacimiento

Suelos Sobreconsolidados (o Preconsolidados):

Yacimientos sometidos a uno o varios ciclos de descarga. La carga actual no es la máxima que ha actuado sobre ellos.

Grado de Sobreconsolidación OCR (Over consolidation Ratio): Nos informa de la relación entre la tensión de preconsolidación (la máxima que ha actuado) y la actual

$$\text{OCR} = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_v}$$

σ'_c = preconsolidation stress
 σ'_v = vertical effective stress

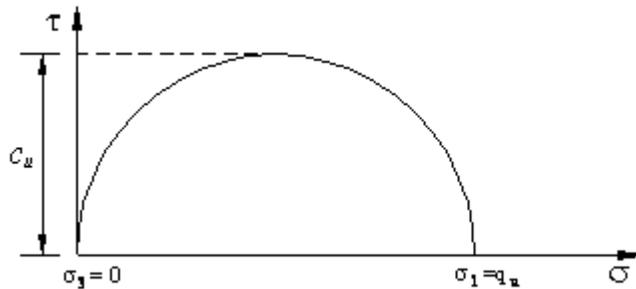
OCR = 1 : SUELO NORMALMENTE CONSOLIDADO
OCR > 1 : SUELO SOBRECONSOLIDADO

Sensitividad de las arcillas: Efecto del amasado sobre la consistencia de las arcillas

$$S_t = \frac{q_u(\text{inalterada})}{q_u(\text{amasada})}$$

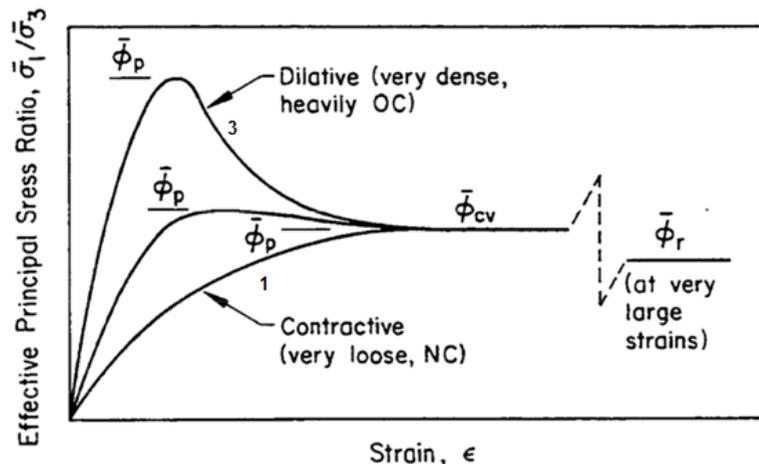
$w \ll w_L$: sensibilidad muy baja
 $w \gg w_L$: sensibilidad alta

Condiciones no drenadas (suelos saturados y aplicación de la carga instantánea)



La carga se aplica de forma instantánea, lo que no permite que se disipe la presión de poros.
La deformación se produce a volumen constante
 $\epsilon_v = 0 \Rightarrow 3(1-2\nu) = 0 \Rightarrow \nu = 0,5$

Condiciones drenadas (aplicación de la carga a largo plazo) (I)

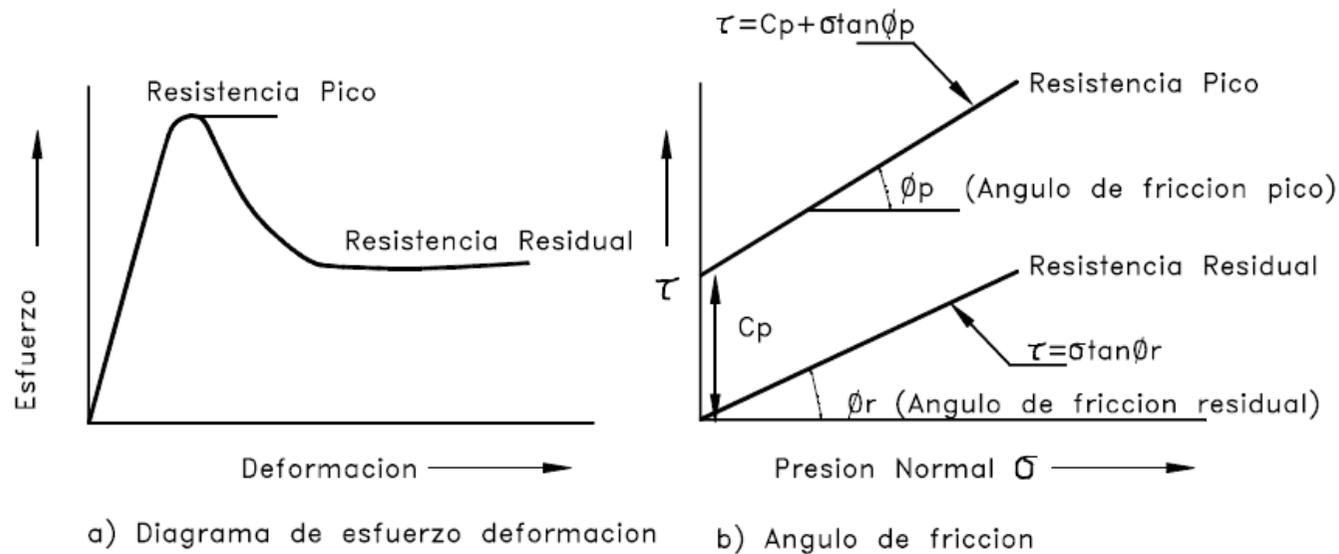


1: típico de arcillas blandas (normalmente consolidadas) = comportamiento similar al de arenas sueltas. Contractancia (la “e” disminuye)

3: típico de arcillas compactas (sobreconsolidadas) = comportamiento similar al de arenas densas. Dilatancia

La **dilatancia** es el fenómeno por el cuál el suelo aumenta de volumen al ser sometido a estados tensionales de corte.

Condiciones drenadas (II)



La resistencia pico es la máxima resistencia al corte que posee el material que no ha fallado previamente.

Las arcillas normalmente consolidadas no poseen cohesión efectiva ($c'=0$)

Para las arcillas sobreconsolidadas si que consideraremos cohesión efectiva (c')

Diferentes tipos de deformaciones (I)

Respecto a su recuperación en descarga:

- Deformaciones recuperables o elásticas (al descargar se recuperan las deformaciones).
- Deformaciones irrecuperables o plásticas (al descargar no se recuperan las deformaciones). En un suelo corresponden a un reordenamiento de las partículas

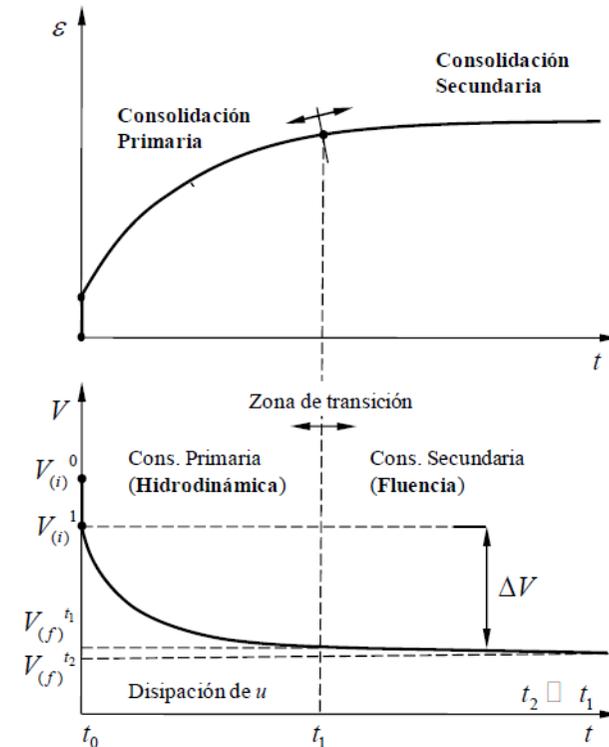
Respecto a su evolución en el tiempo:

- Deformaciones instantáneas en el tiempo (se producen instantáneamente tras la carga correspondiente). La mayor parte de ellas es recuperable.
- Deformaciones diferidas en el tiempo (se extienden en el tiempo tras la aplicación de la carga correspondiente). Habitualmente las deformaciones irrecuperables son mayores que las recuperables. Principalmente en función de la permeabilidad

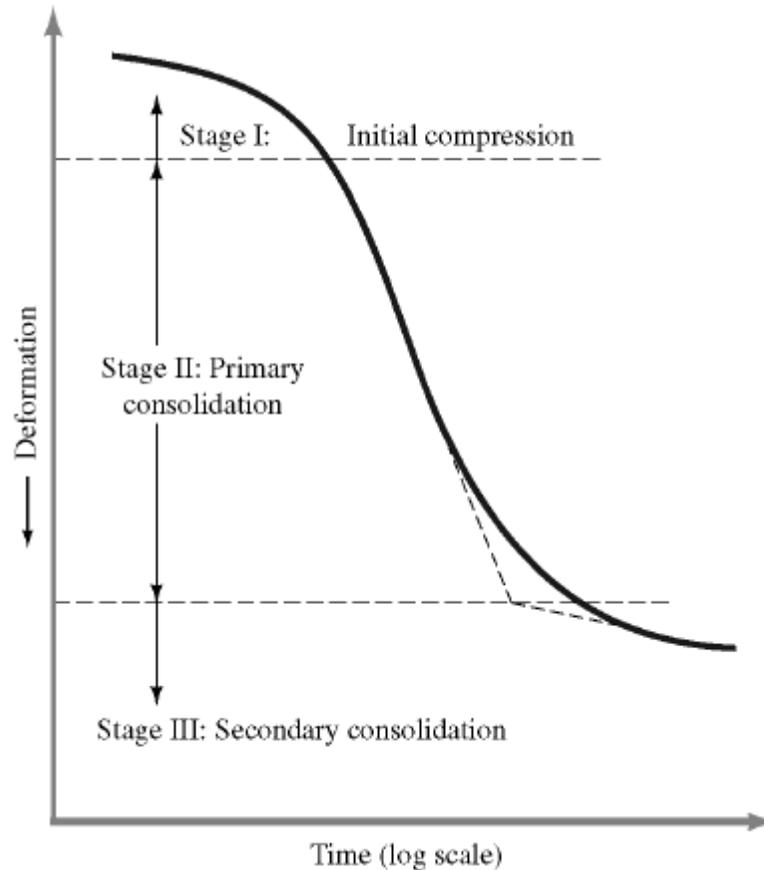
Diferentes tipos de deformaciones (II)

Respecto a su evolución con σ' :

- Deformaciones instantáneas según σ' (por variaciones en σ'). Corresponden a la consolidación primaria y cumplen con el principio de las tensiones efectivas de Terzaghi. Habitualmente estas deformaciones son en mayor proporción recuperables que irrecuperables.
- Deformaciones diferidas según σ' (la deformación diferida en el tiempo y al cambio de σ'). Estas deformaciones corresponden a la consolidación secundaria y no cumplen con el principio de Terzaghi. La mayor parte de las deformaciones son irrecuperables. Puede ser significativa especialmente en suelos arcillosos muy finos y plásticos y en suelos orgánicos. Es muy pequeña en suelos limosos e inexistente en suelos de grano grueso (arenas y gravas).



Deformación-log t



Ref.: Frontier in Geotechnical Engineering (2005)

Stage I:

Compresión inicial

Deformación instantánea con la aplicación de la carga a volumen constante (condiciones no drenadas)

Asiento “inicial”, “instantáneo” o “elástico”

Stage II:

Consolidación primaria

Deformación diferida en el tiempo.

Se expulsa el agua por lo que varía el volumen.

Asiento “diferido” o “de consolidación”

Stage III:

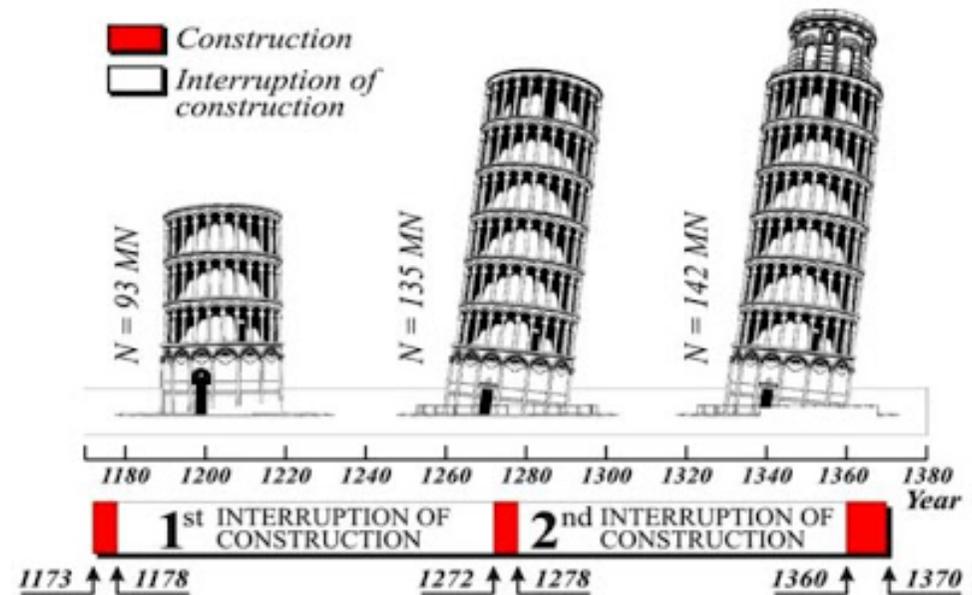
Consolidación secundaria

Por esfuerzos constantes. Hay dos tipos de deformación, una con cambio de volumen y otra por fenómenos de deformación tipo viscoso (reptación o flujo plástico).

Asientos “de consolidación secundaria”.

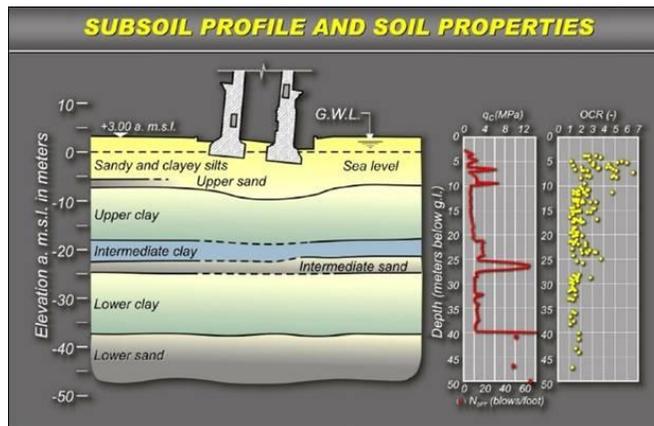
Ejemplos de deformación diferida

Torre de Pisa

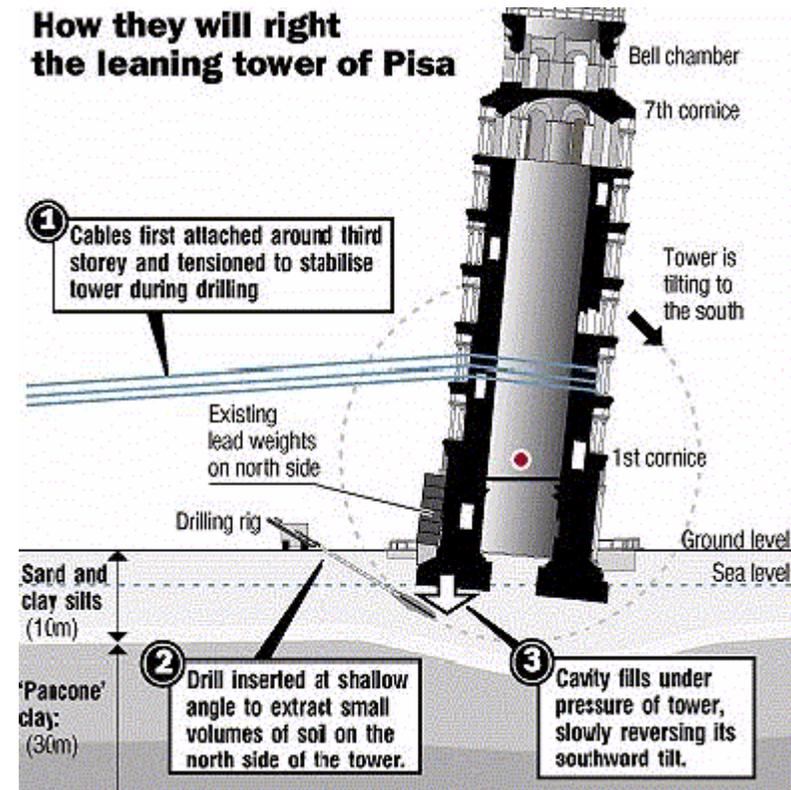


Ejemplos de deformación diferida

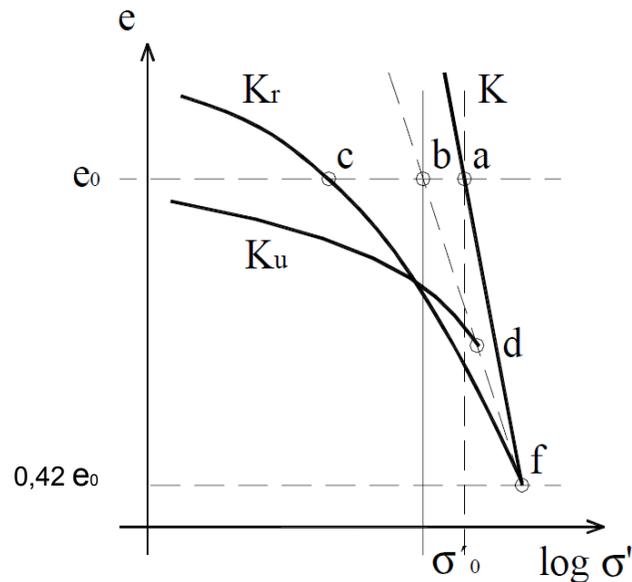
Torre de Pisa



How they will right the leaning tower of Pisa



Compresibilidad de las arcillas (I)

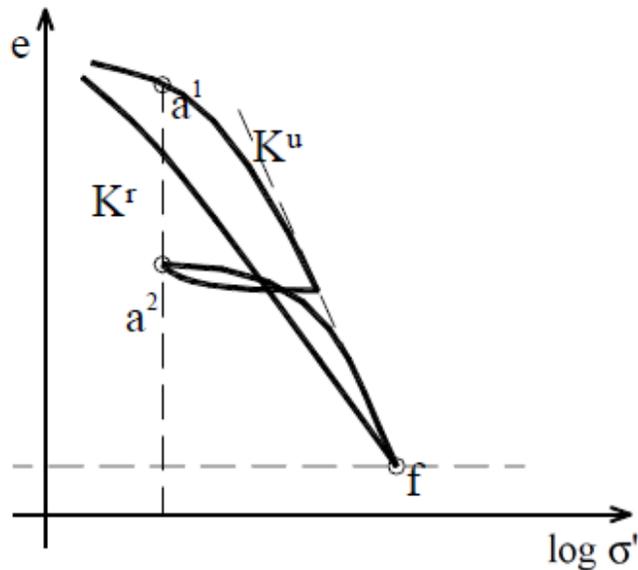


- Una arcilla inicialmente situada a cierta profundidad con la relación de vacíos e_0 y la presión efectiva σ'
- Durante la toma de muestra la presión disminuiría mucho mientras que su contenido de humedad permanecería igual, por lo que $e \sim e_0$ (línea ae_0).
- La curva K_u representa el comportamiento del suelo *undisturbed* (ni remodelado ni alterado).
- La curva K_r representa el comportamiento del suelo remodelado.
- La curva K representa la línea de consolidación, es decir la línea real que necesitamos conocer para determinar los asentamientos reales.

Procedimiento de obtención de K

- Se obtienen las curvas K_u y K_r en laboratorio
- Se halla "f", que coincide con $0,42 e_0$ (corrección de Schmertmann)
- Conociendo el punto (e_0, σ') y el punto "f" se traza la curva real K

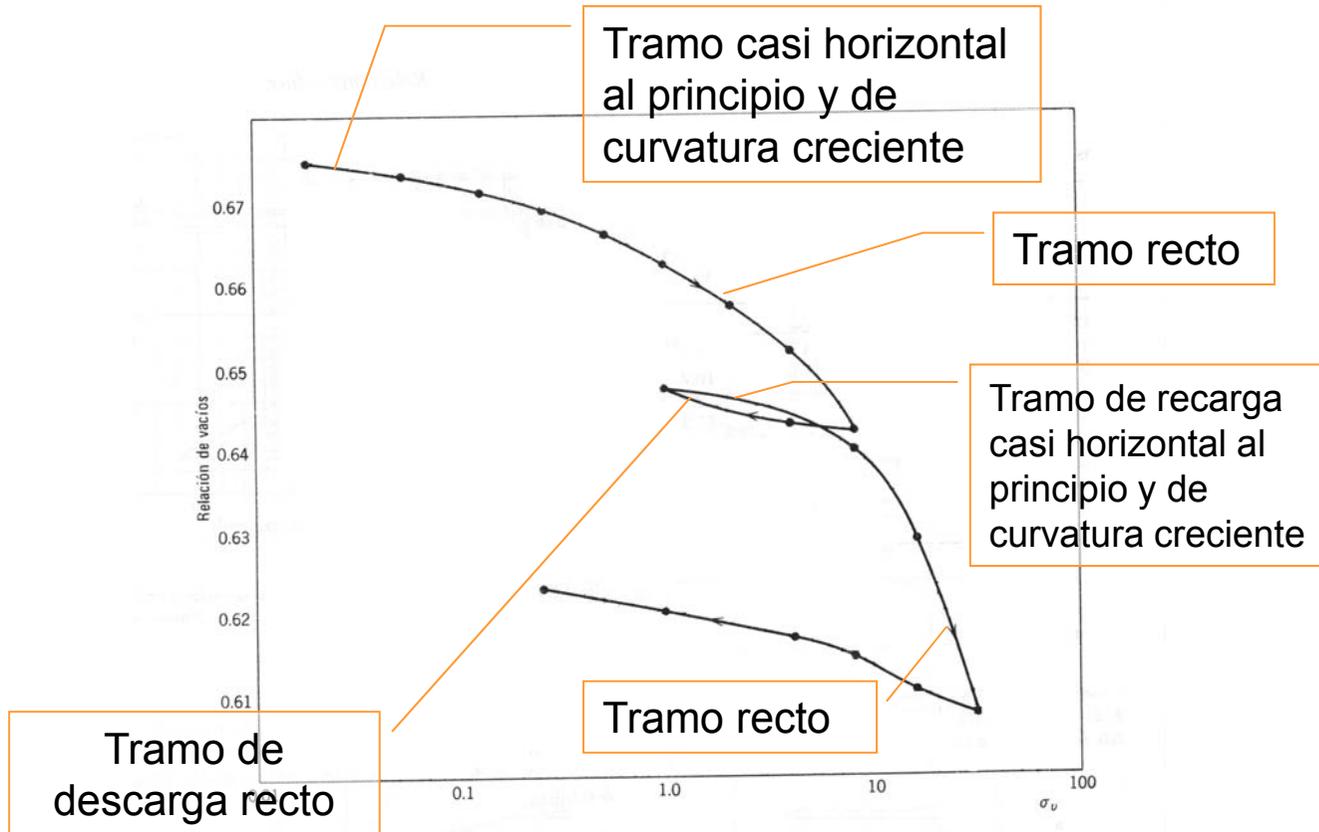
Compresibilidad de las arcillas (II)



Considerando las curvas K_r y los puntos representativos del estado tensión-deformación, y en función de su posición relativa, pueden determinarse si el suelo es sobreconsolidado o no:

- Arcilla normalmente consolidada; el punto “a” se encuentra a la derecha de la curva K_r (a^1)
- Arcilla sobreconsolidada (o preconsolidada); el punto “a” se encuentra a la izquierda de la curva K_r (a^2)

Compresibilidad de las arcillas (III)



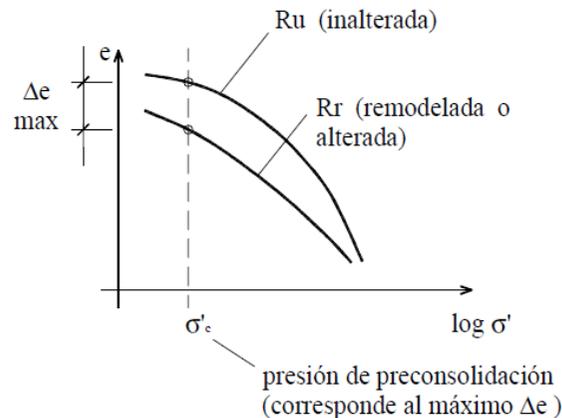
Determinación de la presión de consolidación

La sobreconsolidación de las arcillas se puede producir por la erosión de los estratos superiores o por procesos de desecación (presión intersticial negativa).

La presión de consolidación de una arcilla puede determinarse:

- Por el estudio geológico y morfológico
 - y/o
 - Estudio de curvas edométricas de muestras inalteradas
- Método gráfico de Schmertman
 - Proceso gráfico de Casagrande

Método Gráfico de Schmertman

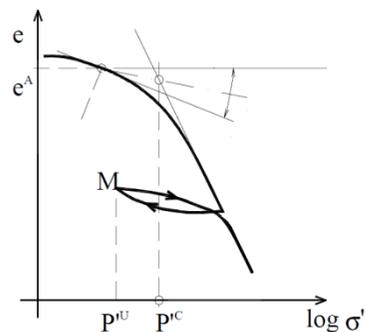
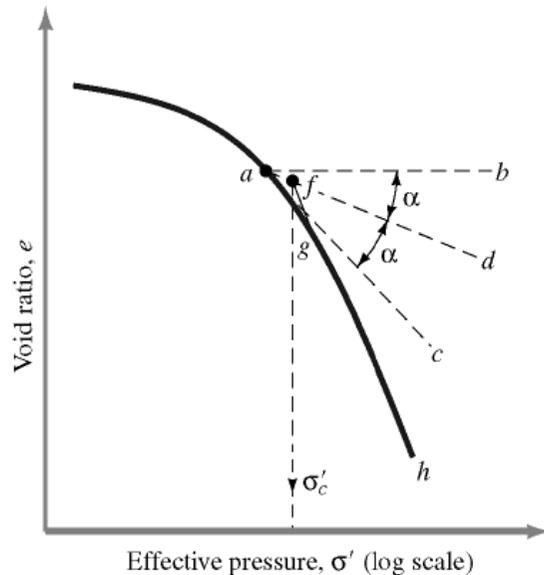


La presión de preconsolidación coincide con el valor de las abscisas correspondiente a la mayor diferencia de índice de huecos entre las curvas edométricas de muestras de arcilla inalteradas y reamasadas.



Ejercicio 0-1

Método Gráfico de Casagrande



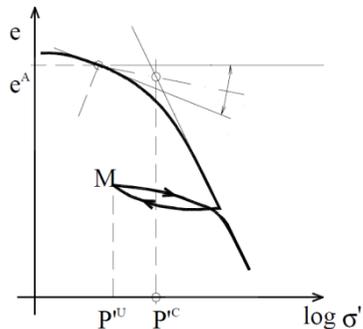
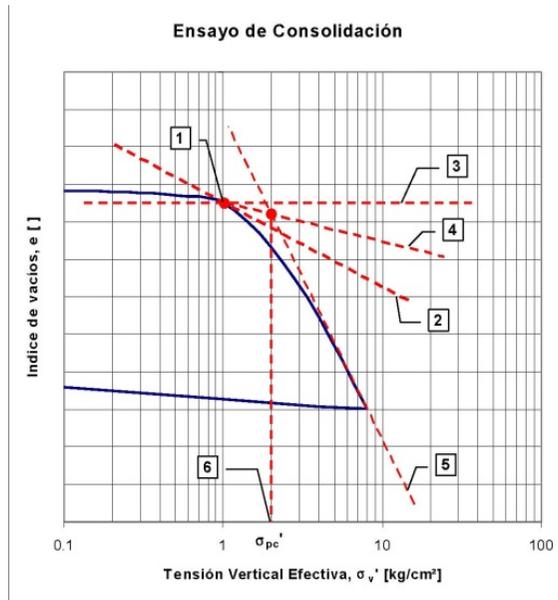
Se sigue el siguiente procedimiento:

- Visually identify point of minimum radius of curvature on e - $\log \sigma'$ curve (i.e. Point a).
- 2. Draw horizontal line from Point a (i.e. Line ab).
- 3. Draw Line ac tangent to Point a .
- 4. Draw Line ad bisecting Angle bac .
- 5. Project the straight line portion of gh on e - $\log \sigma'$ curve to intersect Line ad . This intersection (Point f) is the maximum past pressure (a.k.a. preconsolidation pressure).

Si $P'_c \sim \sigma'$ \Rightarrow normalmente consolidado
 Si $P'_c > \sigma'$ \Rightarrow sobreconsolidado

Una muestra situada en $M1$ nos indicaría que está sobreconsolidada.

Método Gráfico de Casagrande



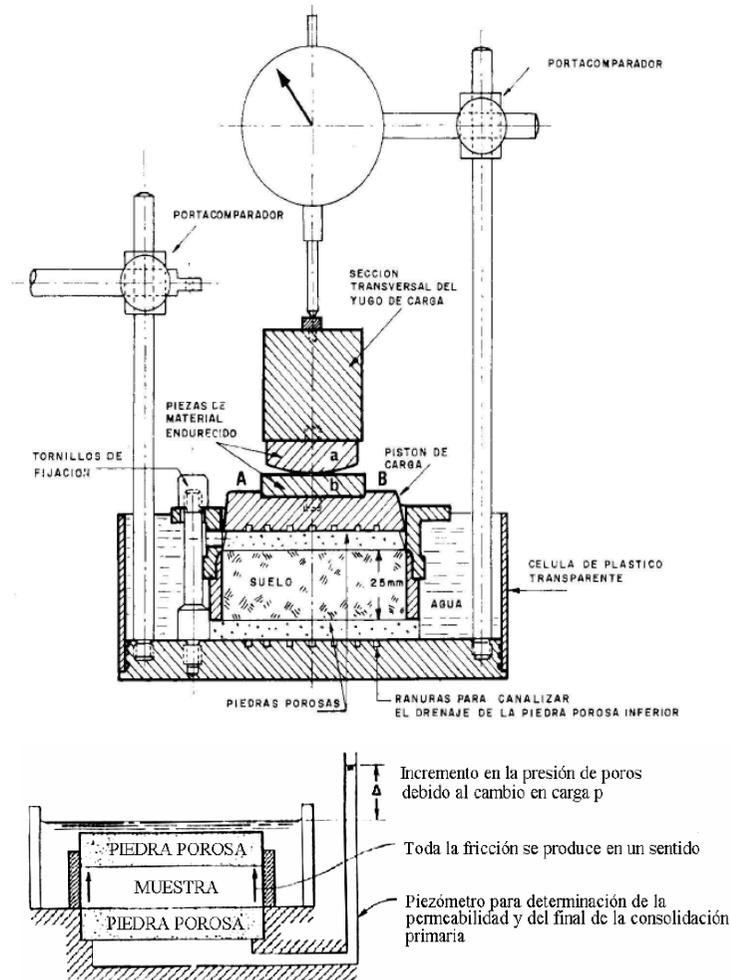
Se sigue el siguiente procedimiento en el gráfico $e - \text{Log } \sigma_v'$:

- Situar el punto de máxima curvatura (1) y trazar la recta tangente (2)
- Trazar la recta horizontal por el punto 1 (recta 3)
- Trazar la bisectriz (4) entre las rectas 2 y 3
- Prolongar recta de la curva virgen o curva normalmente consolidada (5)
- La intersección de las rectas 4 y 5 determina en abscisas el valor de σ_{pc}'

- Si $P_c' \sim \sigma'$ ➡ normalmente consolidado
- Si $P_c' > \sigma'$ ➡ sobreconsolidado

Una muestra situada en M1 nos indicaría que está sobreconsolidada.

Ensayo Edométrico (I)



- Aparato para el estudio de la compresibilidad en arcillas.

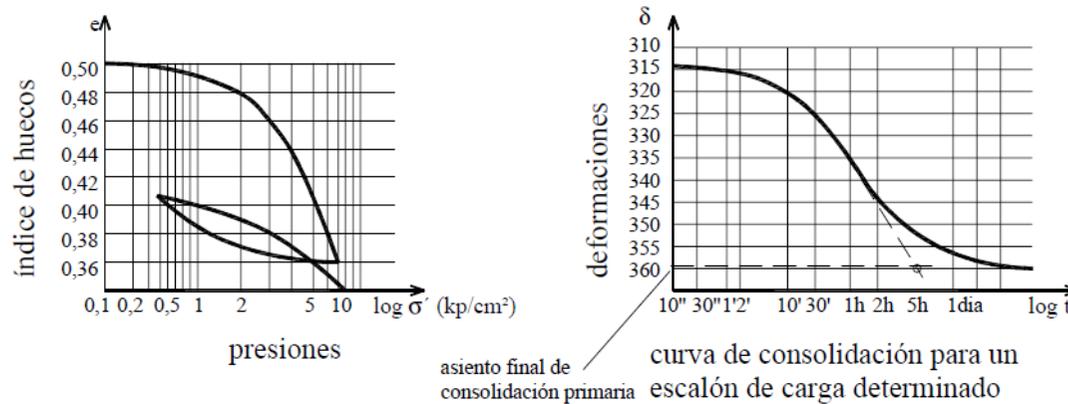
- Consiste en ir cargando verticalmente una muestra confinada en un anillo con placas porosas encima y debajo de la muestra inalterada.

- Las cargas se aumentan progresivamente cada 24h doblando su valor (0,1 , 0,2, 0,4, ...kg/cm²)

- Con los comparadores se miden las deformaciones para cada escalón de carga a diferentes tiempos

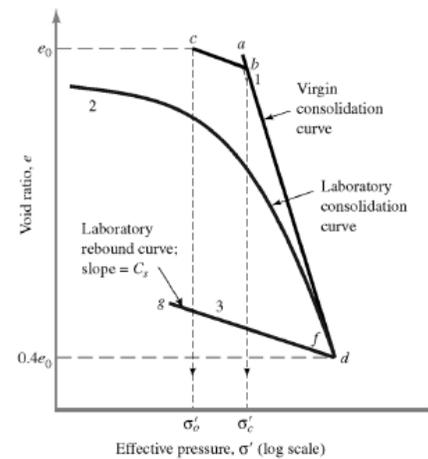
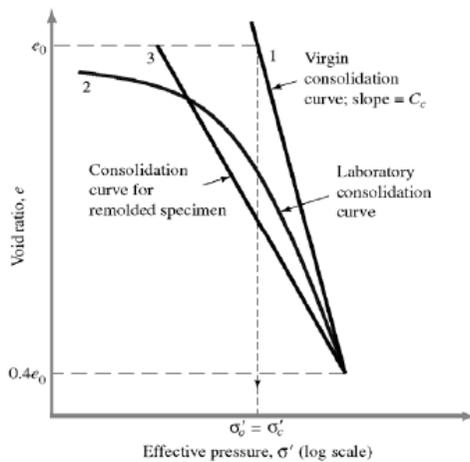
- Se carga hasta presiones de 20 kg/cm²

Ensayo Edométrico (II)

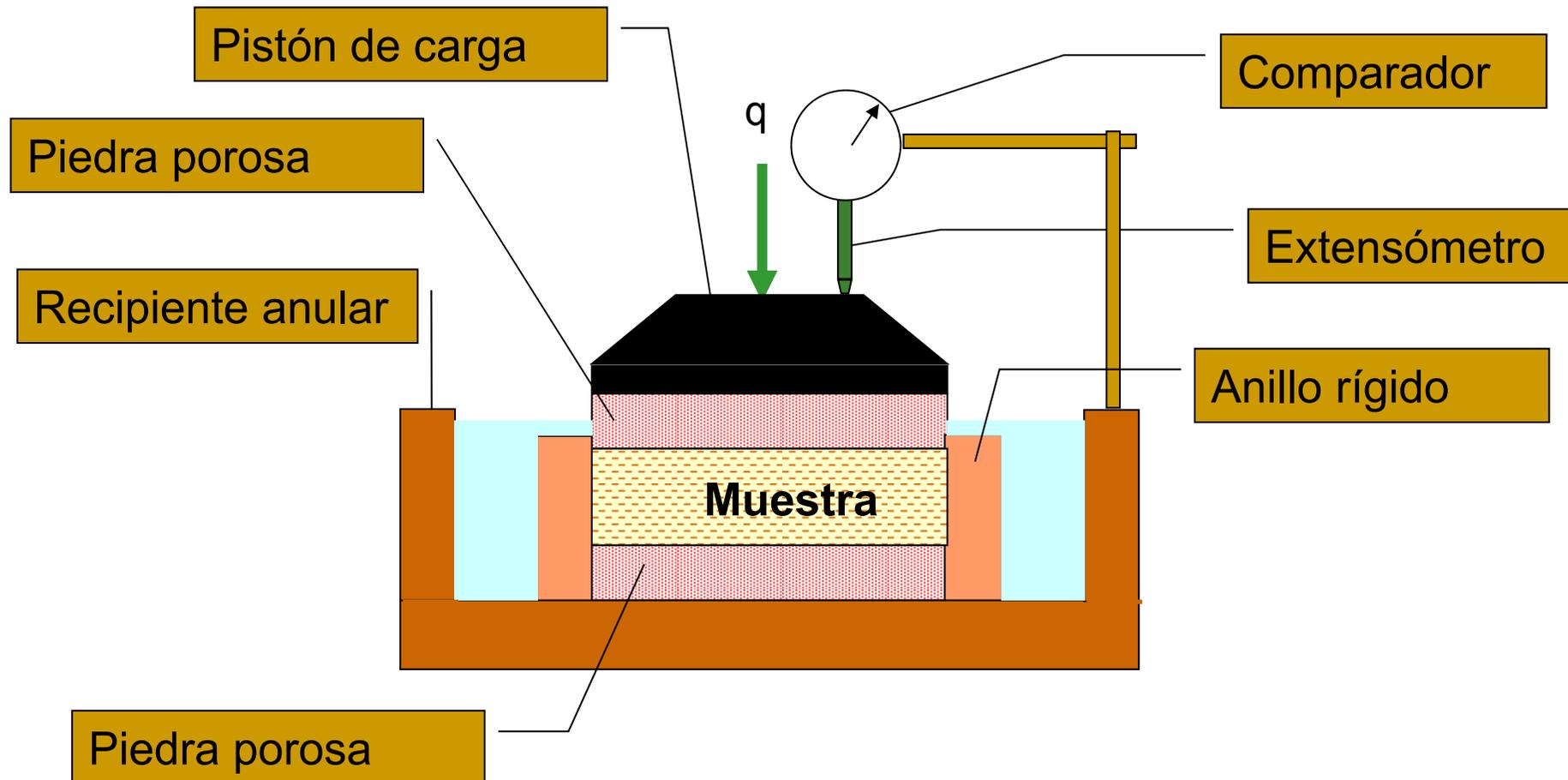


Como resultado del ensayo se obtienen las curvas edométricas, y de ella los índices que califican la compresibilidad del suelo:

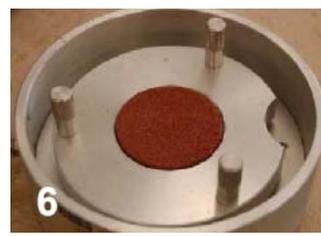
- a_v coeficiente de compresibilidad
- m_v coeficiente de compresibilidad volumétrica
- C_c índice de compresión
- C_s índice de hinchamiento
- C_v coeficiente de consolidación



Ensayo Edométrico (III)



Ensayo Edométrico (III)



Índices de compresibilidad (I)

Módulo Edométrico E_m o E'

Módulo de deformación del suelo confinado.

$$E = E_m \left(1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \right)$$

El módulo de Young obtenido de los ensayos de compresión simple de muestras no confinadas tiene un valor inferior por ese “no confinamiento. $E < E_m$

Para un coeficiente de Poisson de 0,33 (habitual suelos) $E = 2/3 E_m$

Valores típicos:

En arenas densas $E_m = 5.000 \text{ kg/cm}^2$

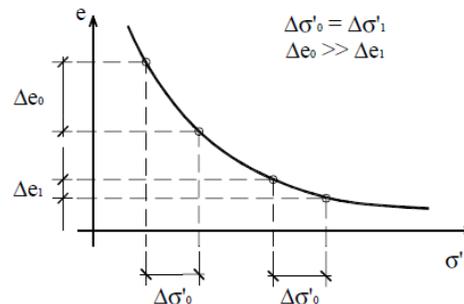
En fangos y limos arcillosos muy blandos $E_m = 1 \text{ kg/cm}^2$

$$E_m = \frac{\Delta p'(1 + e_0)}{\Delta e} = \frac{1}{m_v}$$

Índices de compresibilidad (II)

Coefficiente de compresibilidad a_v

Relaciona entre la disminución de índice de huecos y el incremento de la presión que lo ha propiciado.



$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta p'} \quad [L^2/F]$$

El valor varía para diferentes intervalos de presiones (aunque coincide en algunos).

Para arcillas NC disminuye al aumentar la presión de consolidación. En mismos rangos de presión de consolidación tiene un valor menor en arcillas PC que en NC.

Coefficiente de compresibilidad volumétrica m_v

Variación del volumen unitario producido por un aumento de esfuerzo efectivo.

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_0}$$

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_0} = \frac{\Delta e}{\Delta p' \cdot (1 + e_0)} = \frac{1}{E_m}$$

El valor varía para diferentes intervalos de presiones.

La disminución de la porosidad puede calcularse en función de este coeficiente:

$$\Delta n = \frac{a_v \cdot \Delta p'}{1 + e_0} = m_v \cdot \Delta p'$$

Índices de compresibilidad (III)

Índice de compresión C_c

Tangente del ángulo de inclinación de la recta K.
K. coeficiente adimensional que se mantiene constante en un gran intervalo de presiones.

$$C_c = \frac{e_{inicial} - e_{final}}{\log\left(\frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{inicial}}\right)} \quad e = e_0 - C'_c \cdot \log_{10} \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0}$$

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_0} = \frac{C_c}{\Delta\sigma' (1 + e_0)} \cdot \log_{10} \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0}$$

Índice de compresión de arcillas amasadas C'_c

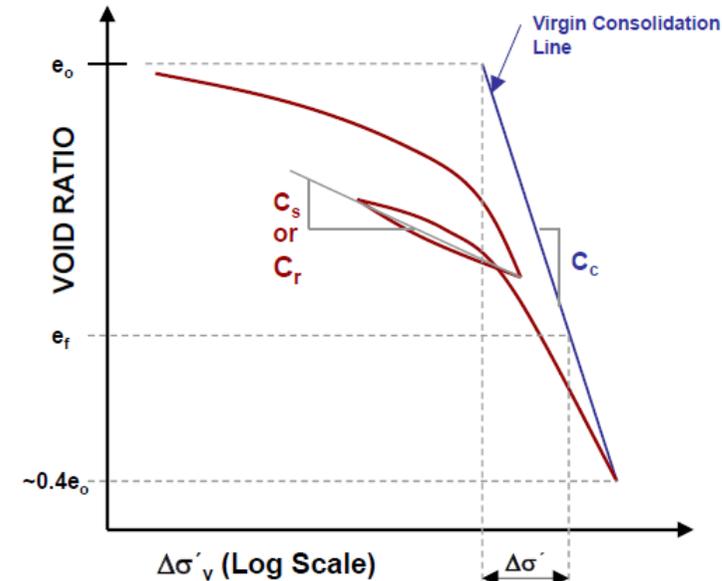
Tangente del ángulo de inclinación de la recta K.

$$e = e_0 - C_c \log_{10} \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0}$$

Índice de hinchamiento o entumecimiento C_s o C_r (recompresión)

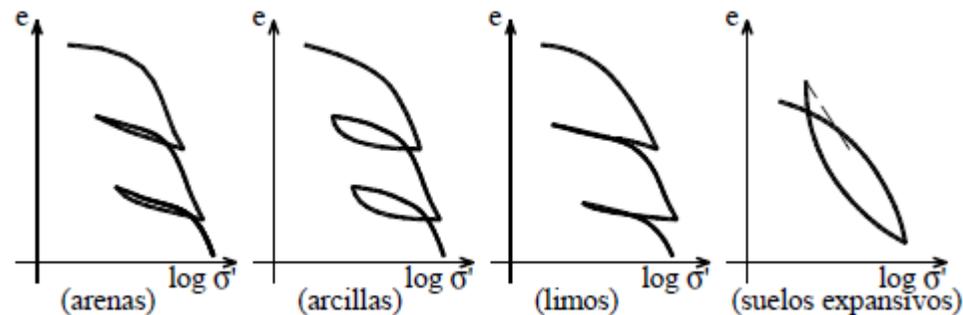
La pendiente o tangente de la curva de descarga.

$$C_s = \frac{e_{final} - e_{inicial}}{\log\left(\frac{\sigma'_{inicial}}{\sigma'_{final}}\right)} \quad e = e_1 + C_s \cdot \log_{10} \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0}$$



Índices de compresibilidad (IV)

Las diferentes suelos pueden tener las siguientes curvas edométricas características:



Valores típicos del índice de compresión:

- $C_c \leq 0,05$: para arcillas poco compresibles;
- $0,05 < C_c < 0,25$: para arcillas de compresibilidad media;
- $C_c \geq 0,25$: para arcillas de compresibilidad alta.

Skempton (1944) $C'_c = 0,007 (w_L - 10\%)$

Arcillas normalmente consolidadas: $C_c \cong 1,30 C'_c = 0,009 (w_L - 10\%)$

Suelos españoles (Jimenez Salas 1975): $C_c = 0,0097(w_L - 16,4 \%)$

Índices de compresibilidad (V)

Coefficiente de consolidación C_v (I)

Velocidad de consolidación de un suelo.

$$C_v = \frac{k}{\gamma_w \cdot m_v} \quad \text{cm}^2/\text{s}$$

No es constante durante la consolidación y depende de la sobrecarga aplicada y de la permeabilidad del suelo.

Puede deducirse de un ensayo edométrico en muestra inalterada.

Para ello necesitamos la curva asentamiento-log t

$$C_v = \frac{k \cdot E_m}{\gamma_w}$$

El tiempo en que tarda en alcanzarse una determinada consolidación aumenta también en proporción al cuadrado del espesor de la capa.

El tanto por ciento de consolidación U (%) es la relación entre el asiento en un tiempo determinado de consolidación y el asiento total al final de la consolidación primaria:

$$U = \frac{s_t}{s_\infty} = f(T_v)$$

Índices de compresibilidad (VI)

Coeficiente de consolidación C_v (II)

T_v : Factor tiempo (adimensional)

$$T_v = \frac{C_v}{H_f^2} \cdot t = \frac{k \cdot E_m}{\gamma_w \cdot H_f^2} \cdot t$$

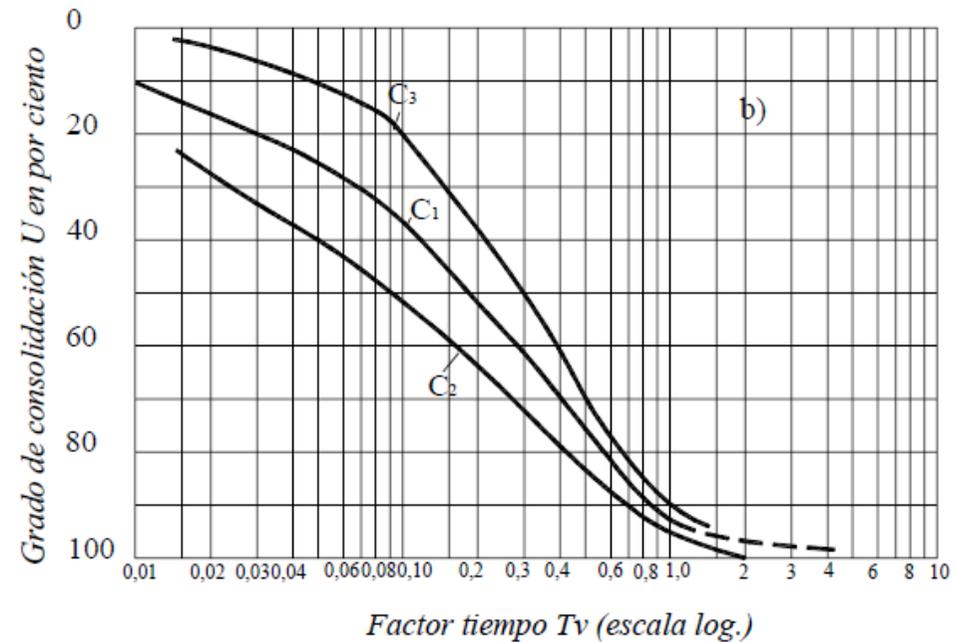
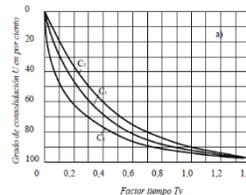
H_f : longitud de la trayectoria máxima de drenaje. Si la capa está abierta y puede expulsar el agua tanto por arriba como por abajo esta longitud equivaldrá a la mitad del espesor

En la gráfica adjunta se muestran soluciones tabuladas que relacionan la consolidación primaria o grado de consolidación U (%) y el factor tiempo T_v para diferentes situaciones.

La curva C1 es la correspondiente a la capa abierta de espesor $2H$ (capa drenante sobre y debajo de la capa de arcilla) o semiabierta de espesor H con presión de consolidación uniforme en todo el espesor de la capa.

La Curva C2 para presión intersticial inicial senoidal

La curva C3 para presión intersticial inicial triangular



Índices de compresibilidad (VII)

El coeficiente de consolidación puede obtenerse a partir del ensayo edométrico mediante los siguientes métodos:

- Método de Taylor
- Método de Casagrande

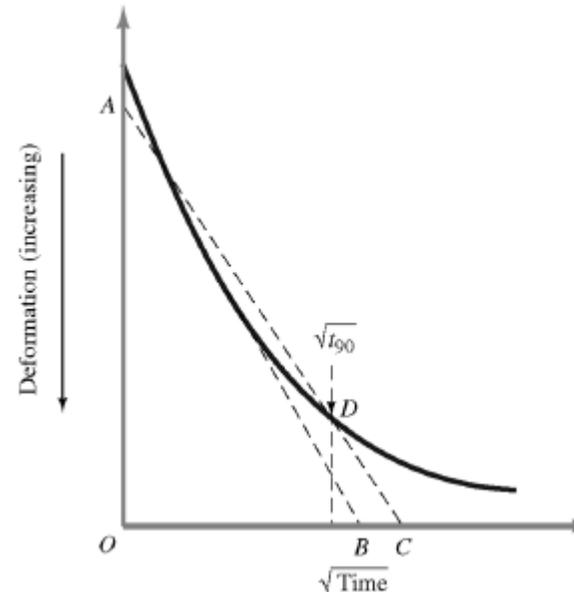
Método de Taylor de determinación de C_v

1. Draw a line AB through the early portion of the curve.
2. Draw a line AC such that $OC = 1.15OB$. The time value for Point D (i.e. the intersection of line AC and the data) is the square root of time for t_{90} (i.e. the time to 90% primary consolidation).
3. For 90% consolidation, $T_v = 0.848$ (see Table 7.1, Das FGE 2006).

$$T_{90} = 0.848 = \frac{c_v t_{90}}{H_{dr}^2}$$

$$c_v = \frac{0.848 H_{dr}^2}{t_{90}}$$

EJERCICIO 0-2



Índices de compresibilidad (VII)

El coeficiente de consolidación puede obtenerse a partir del ensayo edométrico mediante los siguientes métodos:

- Método de Taylor
- Método de Casagrande

Método de Taylor de determinación de C_v

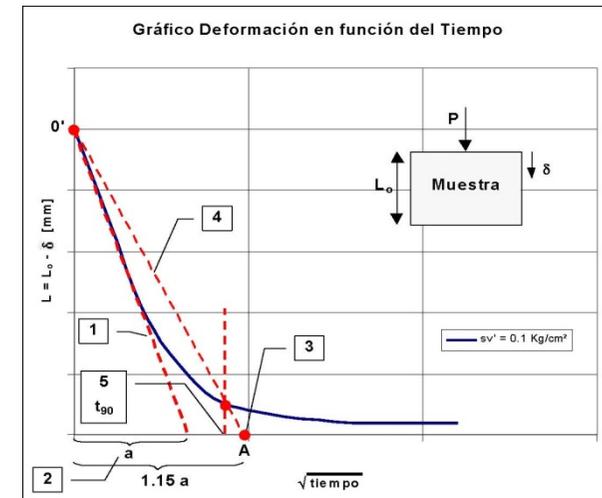
En el gráfico deformación v/s raíz cuadrada del tiempo:

- Trazar la mejor recta que pasa por los primeros puntos del gráfico
- La intersección entre la recta definida con el eje de las abscisas, define una distancia "a".
- Se define en el eje de las abscisas el punto A distanciado del origen en $1.15a$
- Se une el punto $0'$ y A.
- La intersección de esta recta con la curva define el valor t_{90} en el eje de las abscisas.
- Con este valor de t_{90} calcular el coeficiente de consolidación con la fórmula:

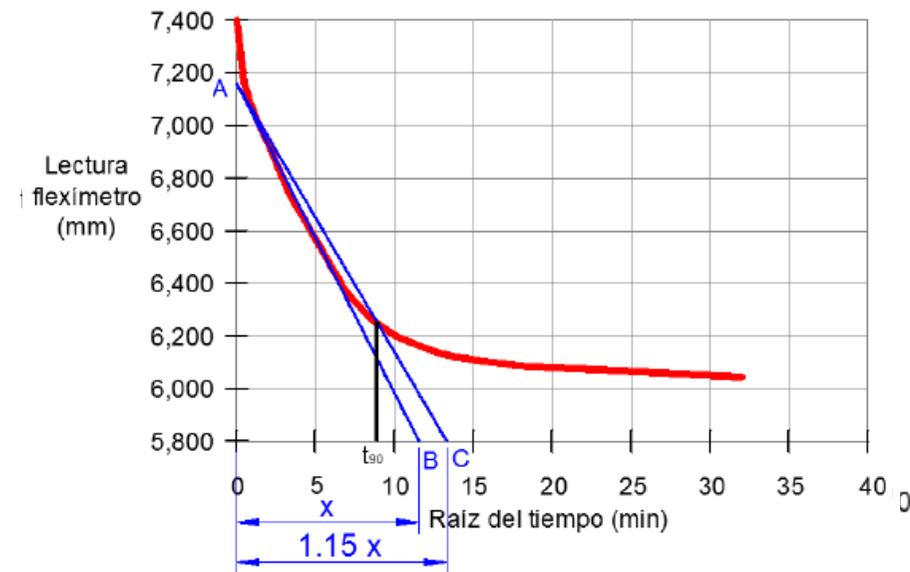
$$C_v = \frac{T_v (U = 90\%) \cdot H^2}{t_{90}}$$

Donde:

- T_v (factor tiempo) para $(U = 90\%) = 0.848$
- $H = \frac{1}{2}$ de la altura inicial de la muestra (ya que existe doble drenaje)



Método de Taylor de determinación de C_v

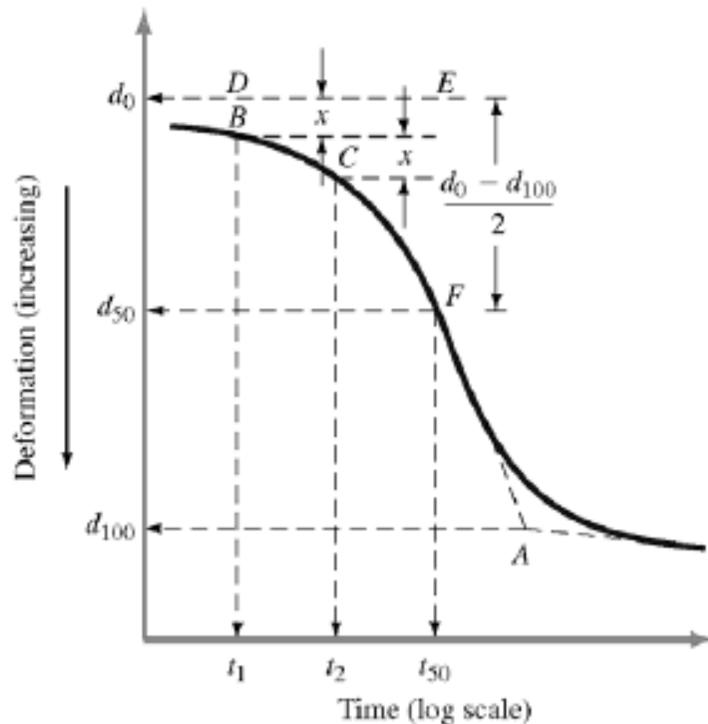




Ejercicio 0-3

Índices de compresibilidad (VIII)

Método de Casagrande de determinación de C_v



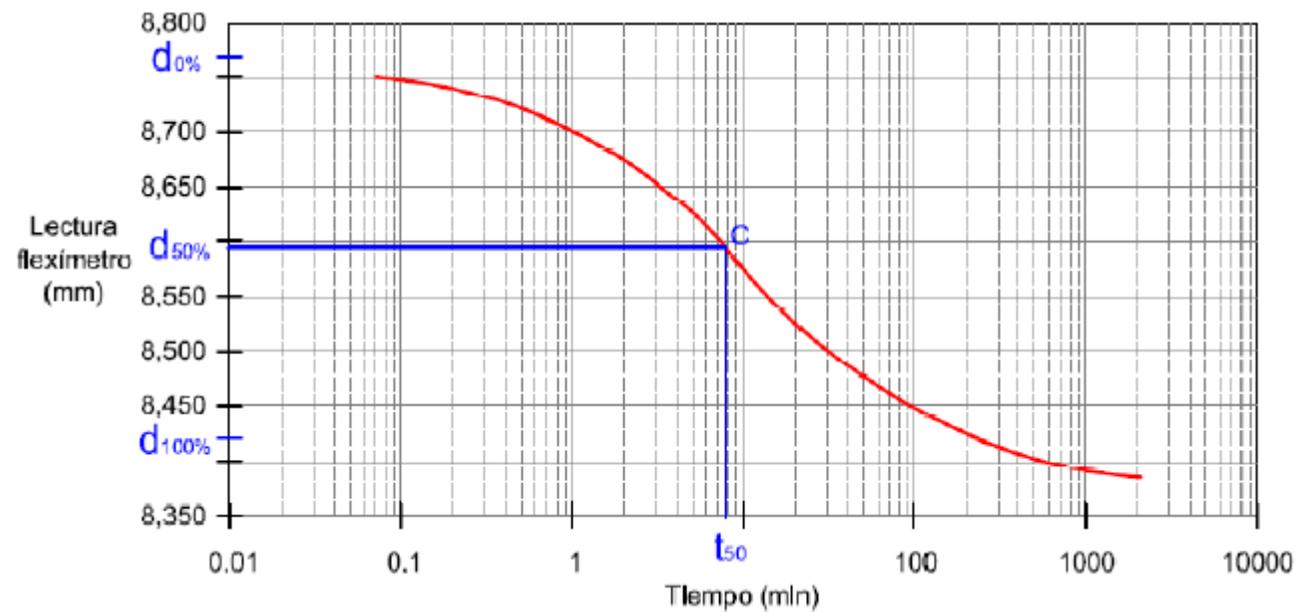
1. Extend the straight line portion of primary and secondary consolidations to intersect at Point A. Point A represents d_{100} (Deformation at 100% primary consolidation).
2. The initial curved portion of the deformation plot versus $\log t$ is approximated to be a parabola on a natural scale. Select times t_1 and t_2 on the curved portion such that $t_2 = 4t_1$. Let the difference of the specimen deformation between $(t_2 - t_1)$ be equal to x .
3. Draw a line horizontal to DE such that the vertical distance BD is equal to x . The deformation corresponding to the line DE is d_0 (Deformation at 0% primary consolidation).
4. The ordinate of Point F on the consolidator curve represents the deformation at 50% primary consolidation (d_{50}).
5. For 50% average degree of consolidation ($U = 50\%$), $T_v = 0.197$ (see Table 7.1, Das FGE 2006).

$$T_{50} = 0.197 = \frac{c_v t_{50}}{H_{dr}^2}$$

$$c_v = \frac{0.197 H_{dr}^2}{t_{50}}$$

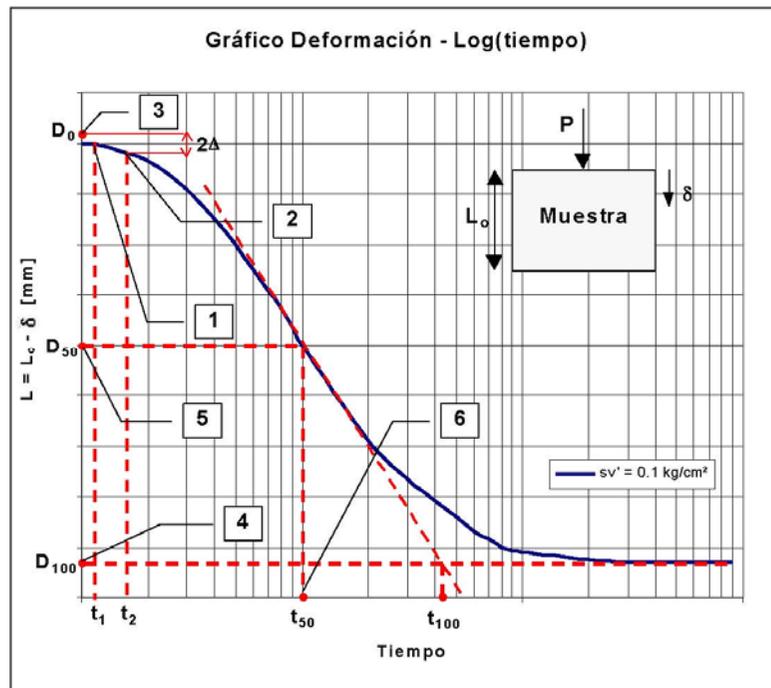
Índices de compresibilidad (VIII)

Método de Casagrande de determinación de C_v



Índices de compresibilidad (VIII)

Método de Casagrande de determinación de C_v



Curva correspondiente a un escalón de carga

En el gráfico deformación v/s Log(t):

- En la parte inicial parabólica de la curva marcar t_1 (si la parte inicial no es parabólica, utilizar D_0 asociado a $t = 0$ y seguir en el paso 4)
- Marcar $t_2 = 4 t_1$. Definidos t_1 y t_2 , ellos determinan sobre la curva la distancia vertical Δ
- Dibujar la distancia 2Δ , y encontrar D_0 en el eje de las ordenadas.
- Dibujar la proyección horizontal del final de la curva de deformación e
- intersecarla con el eje de las ordenadas, punto que define D_{100} .
- Encontrar D_{50} , como la distancia promedio entre D_0 y D_{100} en el eje de las ordenadas.
- Proyectar D_{50} en la curva de deformación y encontrar t_{50} en el eje de las abscisas.
- Calcular C_v como:

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

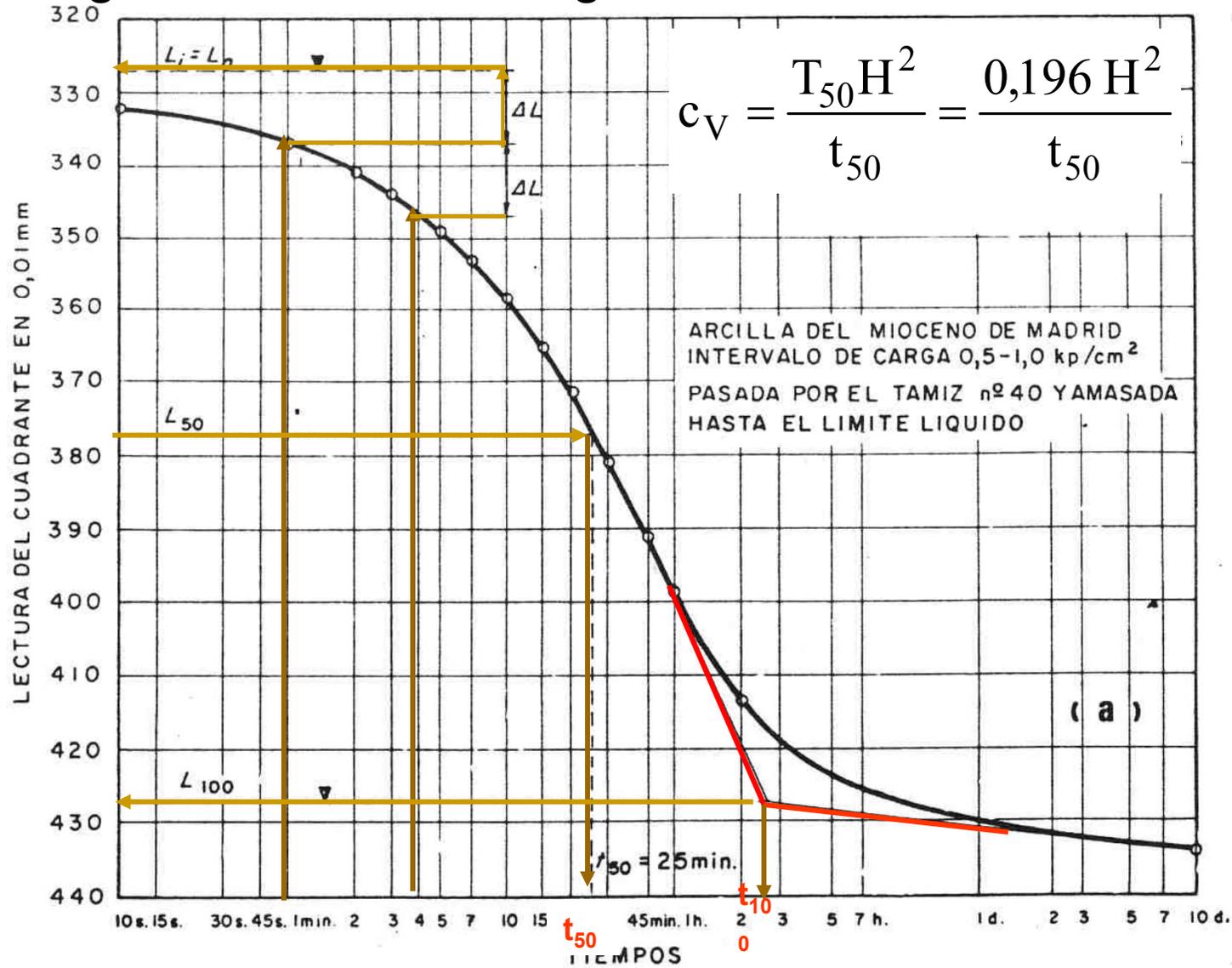
Donde:

T_v (factor tiempo) para $(U = 50\%) = 0.196$

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

Determinación de c_v

Método Logarítmico o de Casagrande

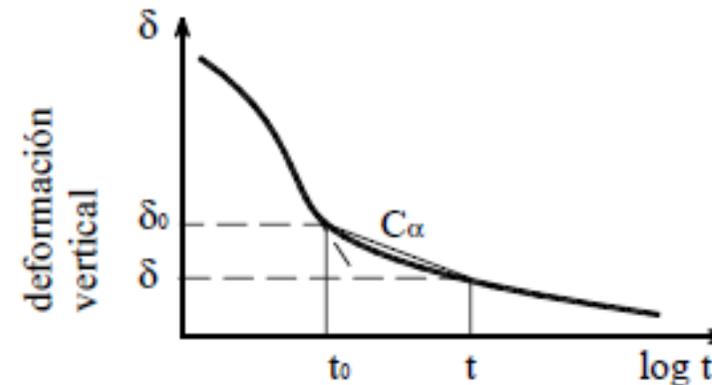


Índices de compresibilidad (IX)

Deformación secundaria C_α

La mayor divergencia entre teoría y realidad

$$\frac{\delta_0 - \delta}{\delta_0} = C_\alpha \cdot \log \frac{t}{t_0}$$



C_α : Índice de consolidación secundaria

Hay una cierta relación entre el índice de compresión y el índice de plasticidad de un suelo arcilloso:

$$C_c \approx 1,35 I.P.$$

Donde:

C_c (= índice de compresión) se puede suponer que cumple la relación: $\frac{C_\alpha}{C_c} \approx 0,05$

Los valores típicos del índice de consolidación secundaria, C_α , son:

$C_\alpha < 0,001 \Rightarrow$ (suelo sobreconsolidado);

$C_\alpha \geq 0,03 \Rightarrow$ (suelo muy blando o tipo orgánico);

$0,02 < C_\alpha < 0,003 \Rightarrow$ (suelo normalmente consolidado).

Cálculo de asientos totales

Para el cálculo de asientos por consolidación a tiempo infinito en arcillas normalmente consolidadas, relativamente delgadas en relación al ancho de la cimentación y bajo carga uniformemente distribuida.

Un espesor H de capa de arcilla sometida a un aumento de presión efectiva reducirá su espesor en Δe :

$$\frac{s}{H} = \frac{\Delta e}{1+e_0} \rightarrow s = H \cdot \Delta n = H \cdot m_v \cdot \Delta p' \quad \longrightarrow \quad s = H \cdot \frac{1}{E_m} \cdot \Delta p'$$

$$m_v = \frac{a_v}{1+e_0} = \frac{\Delta e}{\Delta p' \cdot (1+e_0)} = \frac{1}{E_m}$$

$$m_v = \frac{a_v}{1+e_0} = \frac{C_c}{\Delta \sigma' (1+e_0)} \cdot \log_{10} \frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma'}{\sigma'_0}$$

$$S_{ed} = H_0 \cdot \frac{C_c}{1+e_0} \cdot \log_{10} \frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma'}{\sigma'_0}$$

El asiento total de varios estratos es la suma de los asientos de cada uno de ellos.

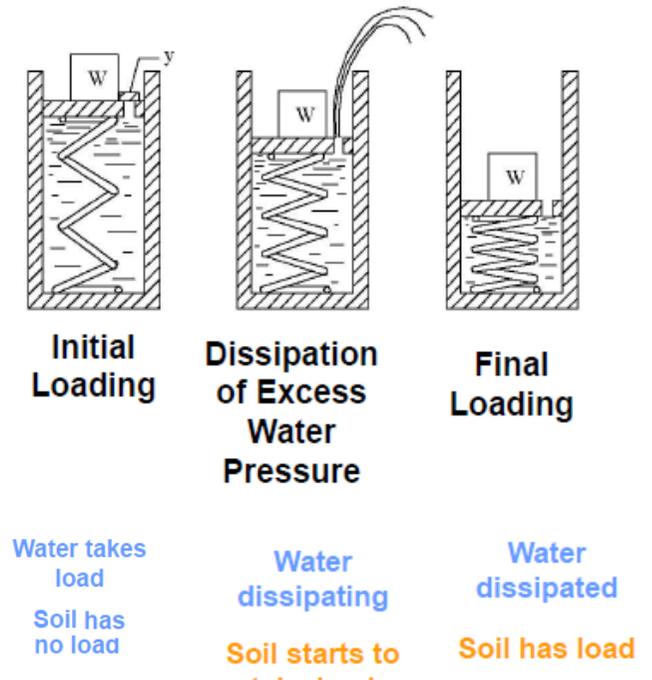
En suelos preconsolidados puede utilizarse el índice de hinchamiento o recompresión C_r

Teoría de la consolidación unidireccional – Terzaghi y Frölich 1943 (I)

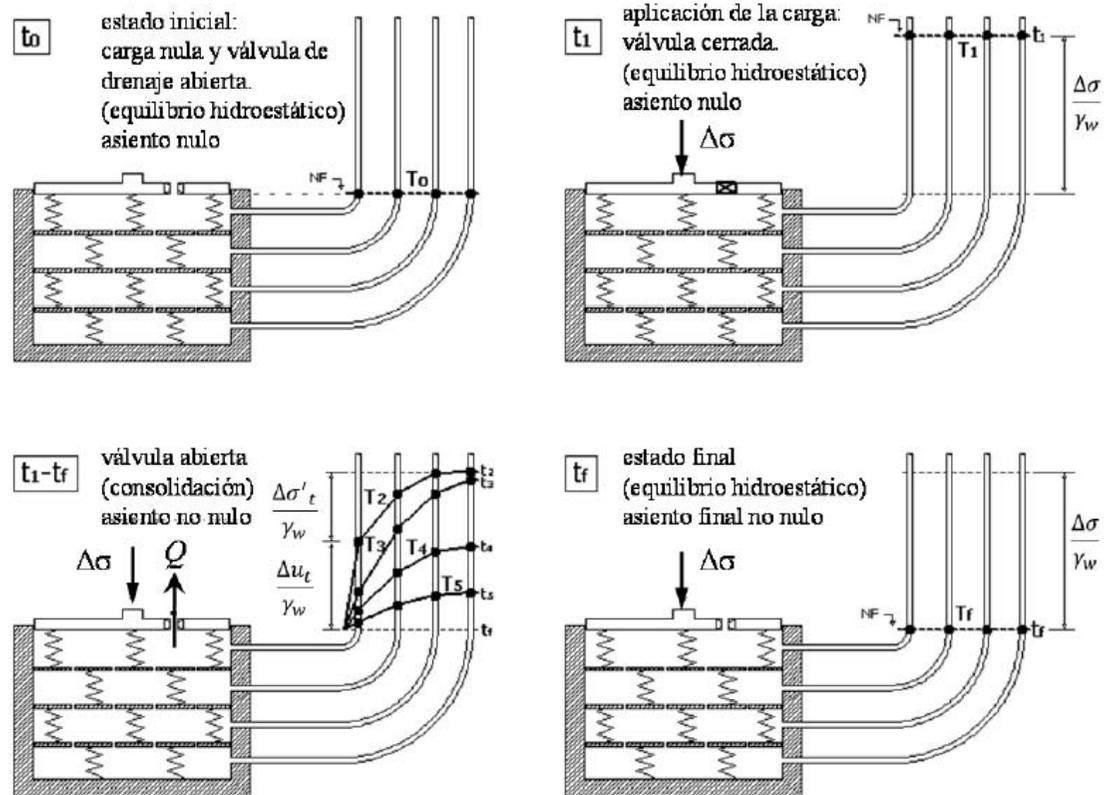
En la consolidación primaria de la teoría de la consolidación de Terzaghi se establecen las siguientes hipótesis:

1. El suelo es homogéneo y el incremento de presión, $\Delta\sigma'$, se aplica instantáneamente.
2. El suelo está completamente saturado ($S_r = 100\%$).
3. El agua es incompresible, -y las partículas sólidas también-.
4. Es aplicable el cálculo infinitesimal al conjunto del suelo (partículas y agua).
5. La compresión del suelo es unidimensional (vertical).
6. El drenaje o flujo es unidimensional.
7. Es aplicable la ley de Darcy.
8. El índice de huecos, e , depende de la presión p' .
9. Se considera el módulo de deformación del suelo, E , constante.
10. Coeficiente de permeabilidad y compresibilidad son constantes en cualquier punto de la capa que se consolida, y no varían con el proceso de la consolidación.
11. Se prescinde del proceso secundario (consolidación secundaria). La lentitud con que se produzca la compresión tiene como causa exclusiva la baja permeabilidad del suelo.

THE SPRING ANALOGY



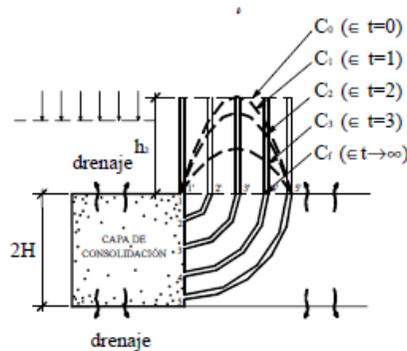
Teoría de la consolidación unidireccional – Terzaghi y Frölich 1943 (II)



Simil hidráulico de Terzaghi-Frölich

Teoría de la consolidación unidireccional – Terzaghi y Frölich 1943 (III)

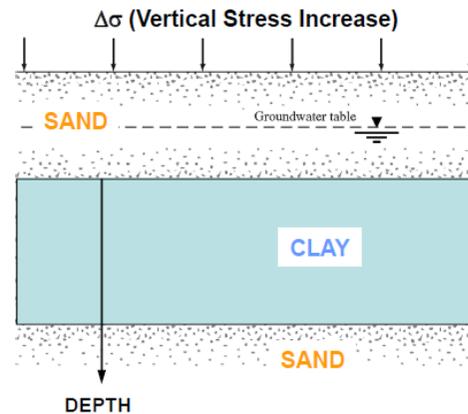
ISOCRONA: curva que da el lugar geométrico de los niveles de agua en los piezómetros en un instante



En $t=0$ la isocrona es horizontal y de altura igual a la presión, que es absorbida por el agua como sobrepresión hidrostática.

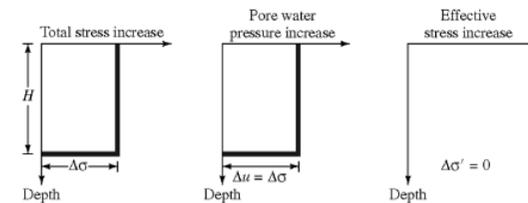
En los primeros instantes los bordes se consolidan rápidamente puesto que el agua se disipa fácilmente al estar en zonas próximas a las capas drenantes.

Para t infinito se supone isocrona horizontal ya que se ha disipado toda la presión hidrostática.

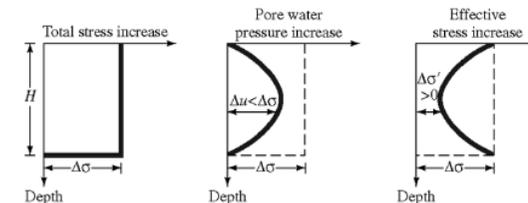


Ref.: Fundamental of Geological Engineering (2005)

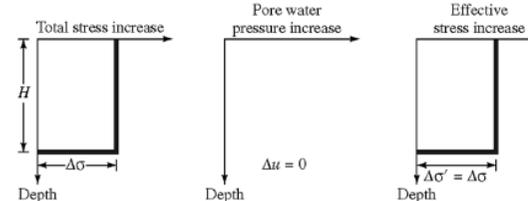
Para $t=0$



Para $t=0$ a $t=$ infinito



Para $t=$ infinito



Teoría de la consolidación unidireccional – Terzaghi y Frölich 1943 (IV)

Para determinar el tiempo en el que se produce un determinado porcentaje de asiento:

Partimos de la velocidad del agua con la que se atraviesa el espesor de la capa (dz).

La velocidad de cambio de volumen será igual a la cantidad de flujo que sale menos la cantidad de flujo que entra por unidad de tiempo.

$$v = k \cdot i = -k \cdot \frac{\partial h}{\partial z}$$

$$u = h \cdot \gamma_w \rightarrow h = \frac{u}{\gamma_w} \rightarrow dh = \frac{1}{\gamma_w} \left(\frac{\partial u}{\partial z} dz \right)$$

$$v = -k \frac{1 \cdot \partial u}{\gamma_w \partial z} \Rightarrow \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{k \cdot \partial^2 u}{\gamma_w \partial z^2}$$

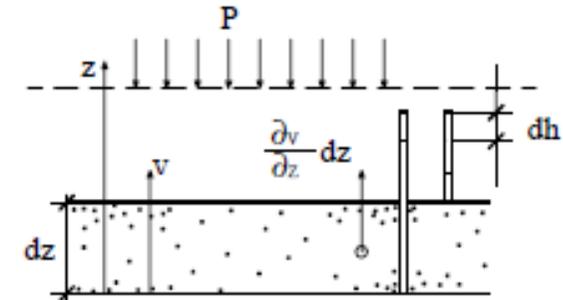
La diferencia de volumen del estrato será Δn ya que consideramos el suelo y el agua como incompresibles:

$$\Delta n = m_v \cdot \Delta p'$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = m_v \frac{\partial(\Delta p')}{\partial t}$$

$$\text{Como } \Delta p'_{\text{total}} = \text{Cte.}, \text{ y } \Delta p = \Delta p' + u \rightarrow \frac{\partial(\Delta p')}{\partial t} = -\frac{\partial u}{\partial t}$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = -m_v \frac{\partial u}{\partial t}$$



$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{\gamma_w \cdot m_v} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

Cv

Ecuación diferencial que expresa el proceso de consolidación de estratos horizontales de arcillas y se denomina "Ecuación Diferencial de Consolidación"

Teoría de la consolidación unidireccional – Terzaghi y Frölich 1943 (V)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{\gamma_w \cdot m_v} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

La ecuación puede resolverse con las siguientes condiciones de contorno

$$\left. \begin{array}{l} z=0, u=0 \\ z=2H, u=0 \\ t=0, u=u_0 \end{array} \right\} \longrightarrow u = \sum_{m=0}^{m=\infty} \left[\frac{2u_0}{M} \sin\left(\frac{Mz}{H_{dr}}\right) \right] e^{-M^2 T_v} \quad \text{con} \quad M = \frac{\pi}{2}(2m+1)$$

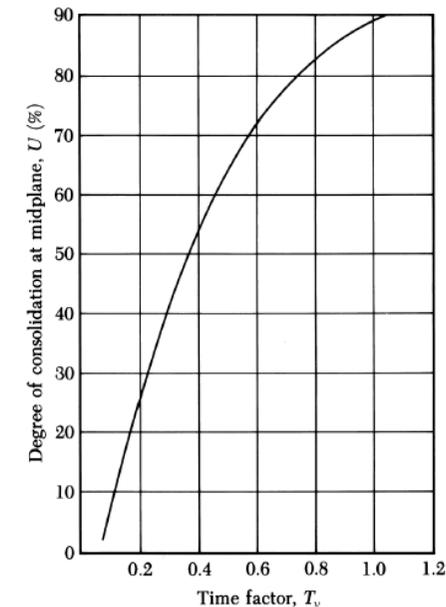
Definimos como **Grado de consolidación (U)** el porcentaje del asiento producido respecto al asiento total de consolidación a tiempo infinito

$$U = \frac{S_t}{S_p}$$

El grado de consolidación se expresa en % y es función de **T_v**, **Factor tiempo**

$$T_v = \frac{c_v t}{H^2_{dr}}$$

El grado de consolidación y el factor tiempo se relacionan mediante la siguiente aproximación



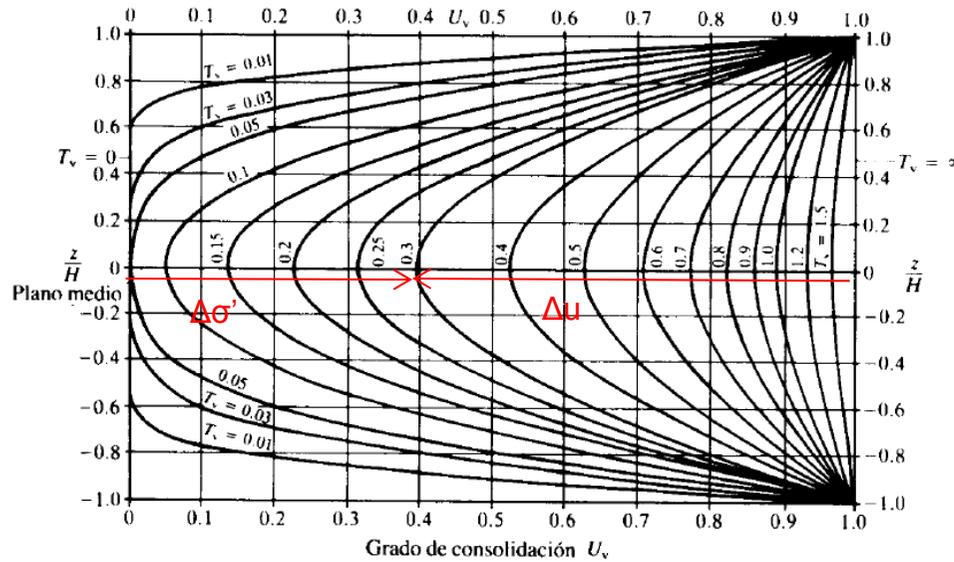
U can be approximated by the following relationships:

$$\text{For } U = 0\% \text{ to } 60\%, T_v = \frac{\pi}{4} \left(\frac{U\%}{100} \right)^2$$

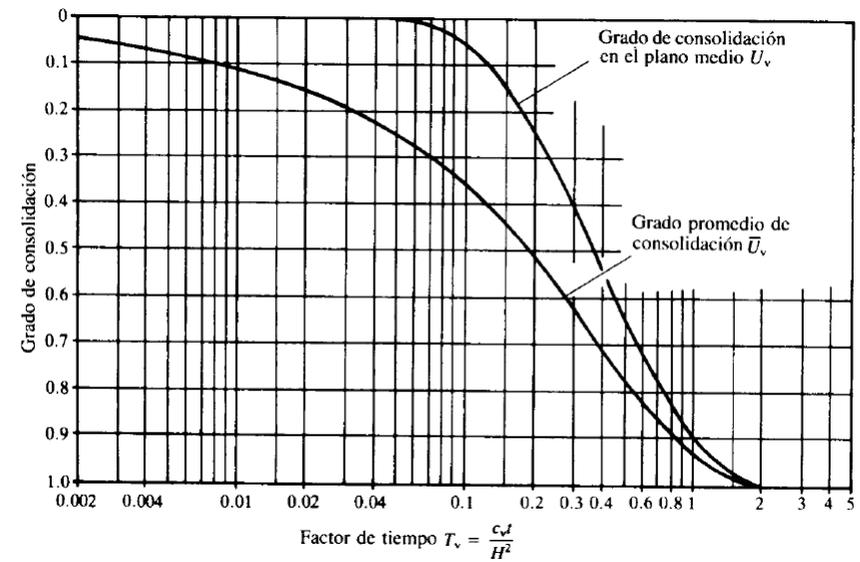
$$\text{For } U > 60\%, T_v = 1.781 - 0.933 \log(100 - U\%)$$



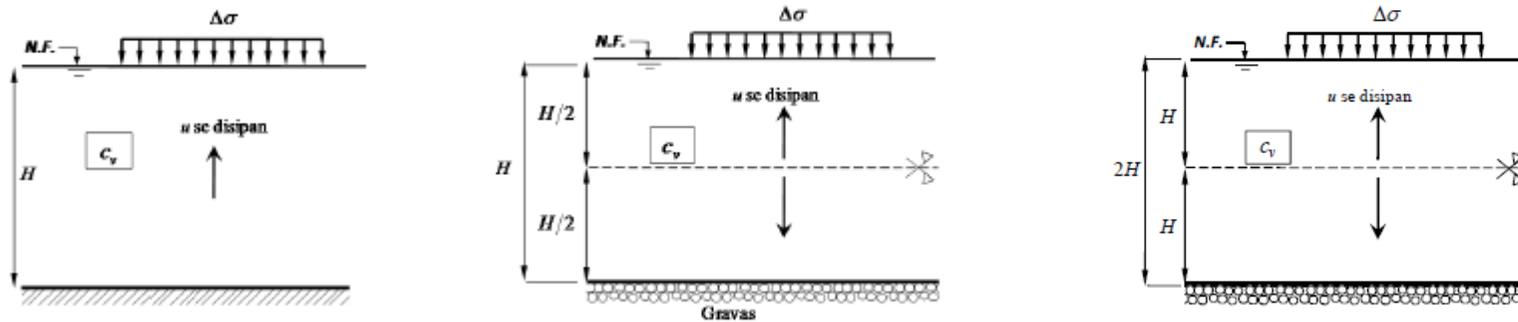
Ábacos del grado de consolidación $U=f(Z, T_v)$



Consolidación promedio $\bar{U}=f(T_v)$ y Consolidación en el plano medio U



La Consolidación promedio refleja el asentamiento en toda la superficie horizontal



Para las situaciones 2 y 3, cuál es el asiento y el tiempo de consolidación si los comparamos con 1?

$$s = H \cdot \frac{1}{E_m} \cdot \Delta p'$$



2.

$$T_v = \frac{c_v t}{H^2}$$

3.