

Consolidación de suelos



Mecánica de Suelos y Geología
Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires

Índice



virtualuniversity.issmge.org

- Definición de consolidación unidimensional
- Teoría de la consolidación unidimensional
- Consolidación radial

International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering

Geotechnical Challenges in Mexico City Clay

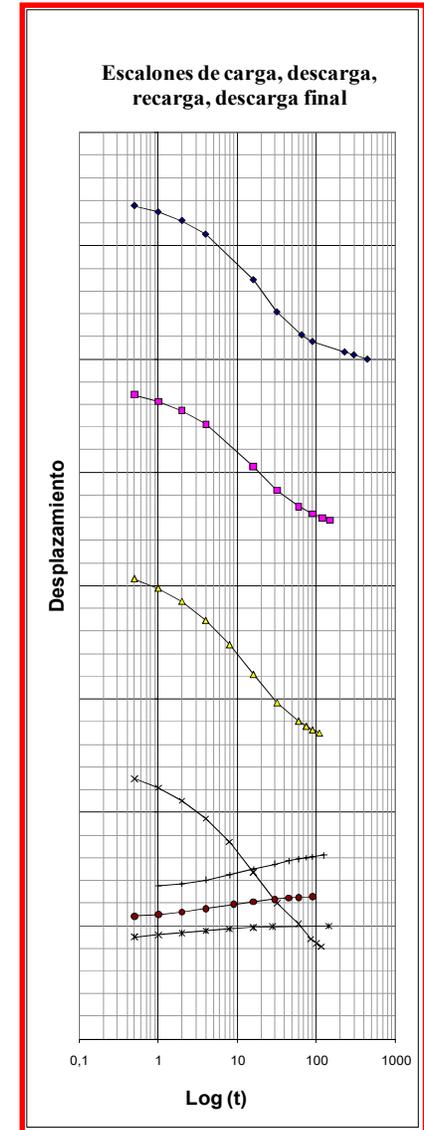
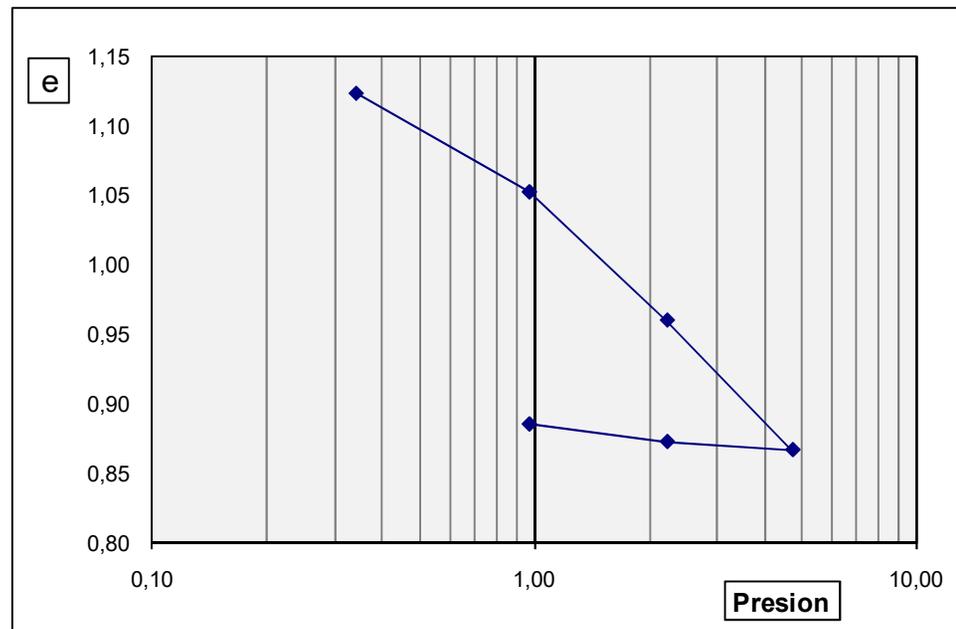
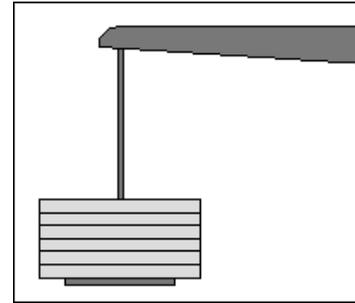
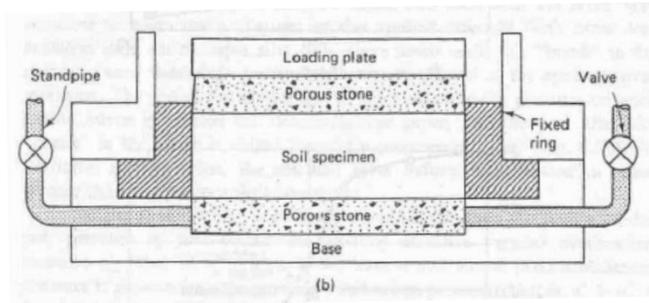
Part of ISSMGE's webinar series
April 18th 2016 @ 12 noon GMT

Delivered by:
Gabriel Auvinet,
Professor at Instituto de Ingeniería,
UNAM, Mexico

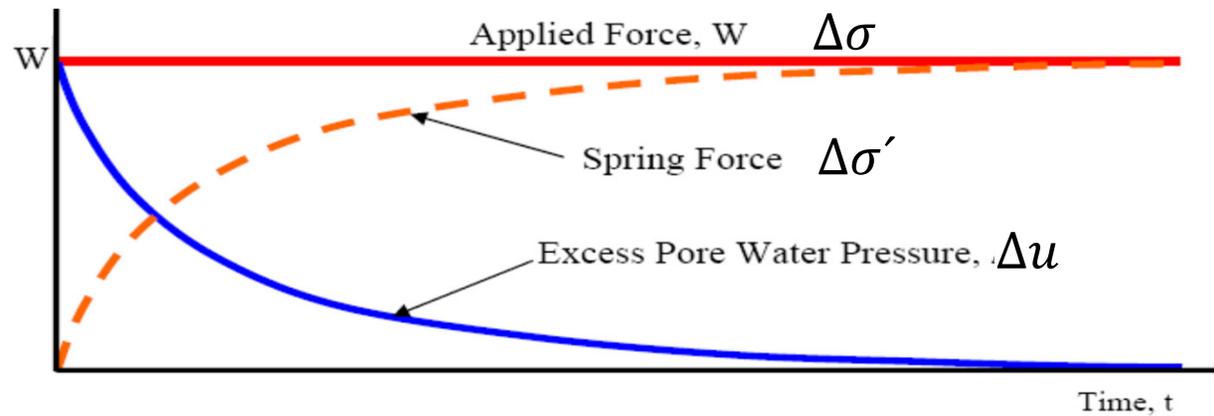
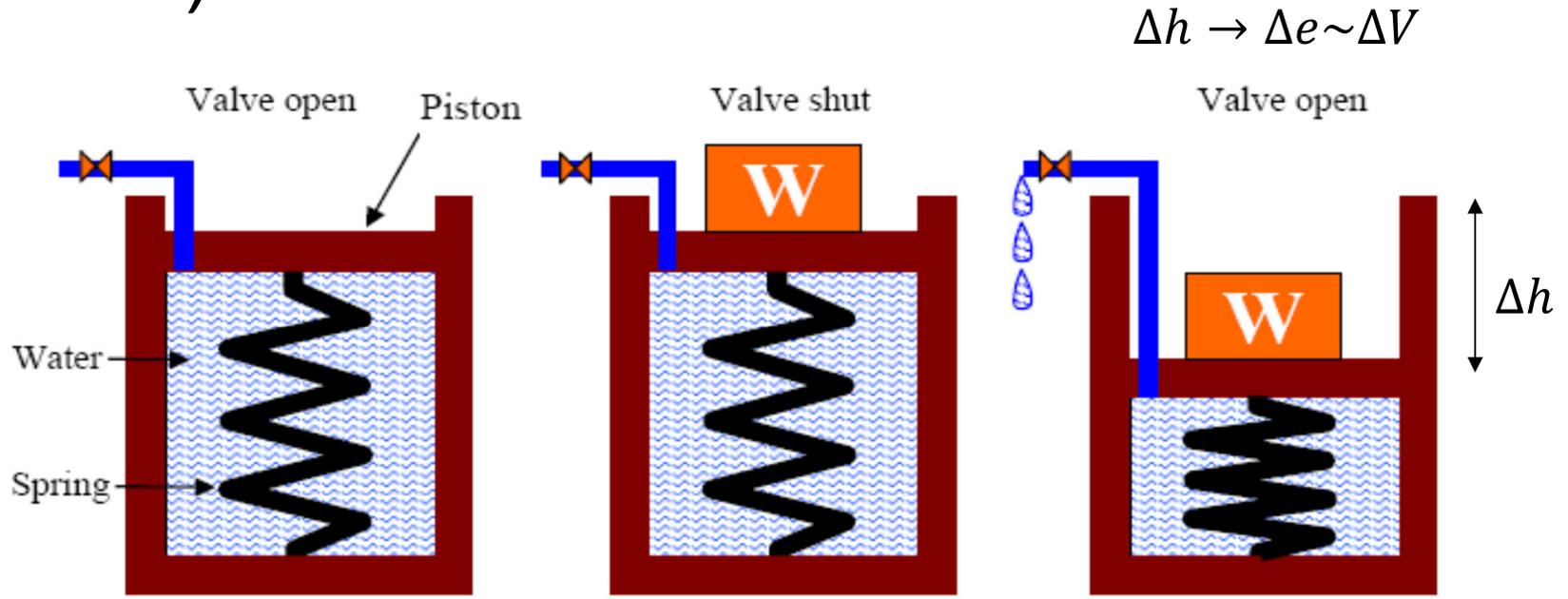
A two day Q&A session will follow the presentation

Ensayo edométrico

¿dónde entra el tiempo?



El problema de la consolidación (analogía mecánica)



$$\Delta\sigma(t) = \Delta\sigma'(t) + \Delta u(t)$$

Índice



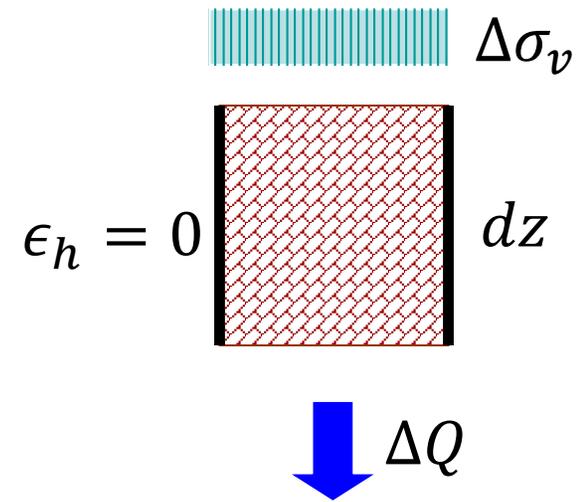
- Definición de consolidación unidimensional
- Teoría de la consolidación unidimensional
- Consolidación radial

Teoría de la consolidación



Hipótesis

- Granos y agua incompresibles
- Suelo saturado
- Flujo y movimiento unidireccionales
- Ley de Darcy
- Permeabilidad y rigidez constantes en todo el proceso

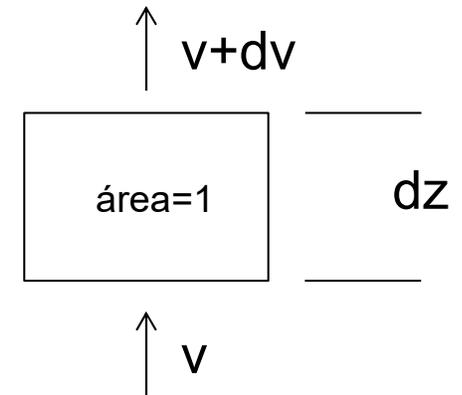


Teoría de la consolidación



En un instante dt ocurren a la vez

- Se expulsa agua dV_l
- El elemento disminuye su volumen dV_s



Líquido: Por continuidad + Darcy

$$dV_l = 1 \cdot \frac{\partial v}{\partial z} dz \cdot dt = k \frac{\partial i}{\partial z} dz \cdot dt = k \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} dz \cdot dt = \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz \cdot dt$$

Sólido: La reducción de volumen produce un incremento de tensión efectiva vertical

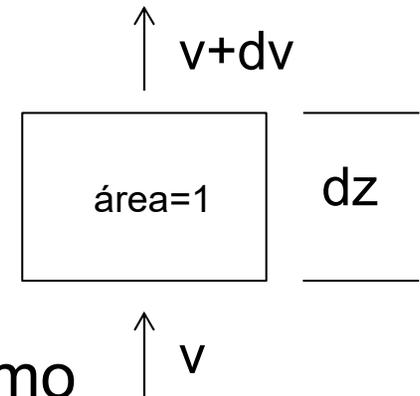
$$dV_s = 1 \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial t} dt \cdot dz = \frac{1}{E_{oed}} \frac{\partial \sigma'_v}{\partial t} dt \cdot dz$$

Teoría de la consolidación



Como la tensión total es constante

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



Por lo que el equilibrio de la fase sólida queda como

$$dV_s = \frac{\partial \epsilon}{\partial t} dt \cdot dz = \frac{1}{E_{oed}} \frac{\partial u}{\partial t} dt \cdot dz$$

Como los volúmenes son iguales (suelo saturado) queda

$$dV_l = dV_s \rightarrow \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz \cdot dt = \frac{1}{E_{oed}} \frac{\partial u}{\partial t} dt \cdot dz \rightarrow \boxed{C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t}}$$

Donde $C_v = \frac{k \cdot E_{oed}}{\gamma_w} = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w}$ es el coeficiente de consolidación

Solución de la ecuación diferencial $\rightarrow u = u(z, t)$

Teoría de la consolidación

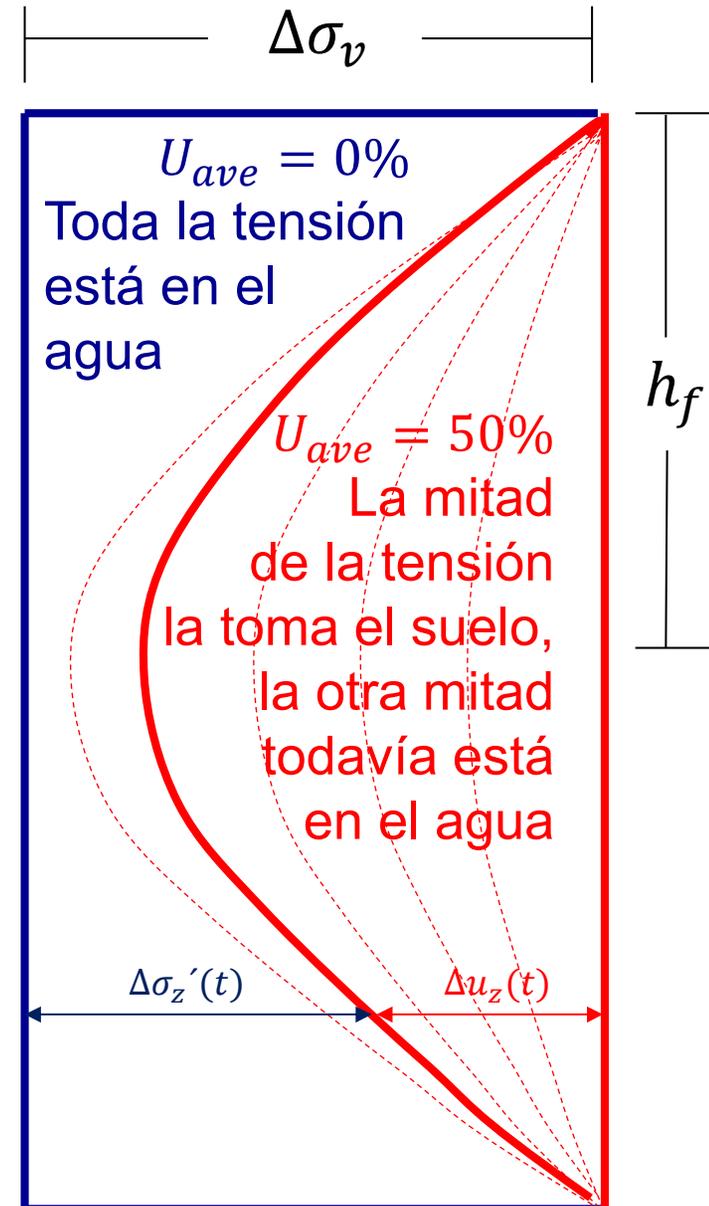
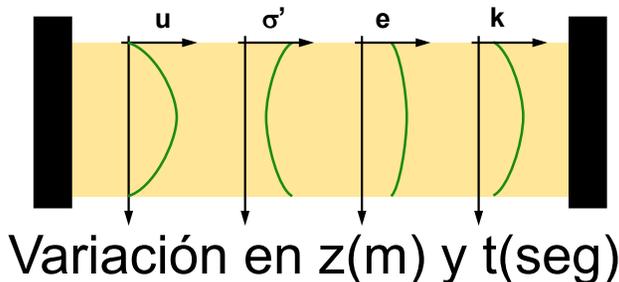


Grado de consolidación local y promedio

$$U_z(t) = \frac{\Delta\sigma_z'(t)}{\Delta\sigma_v} = \frac{\Delta\sigma_z - \Delta u_z(t)}{\Delta\sigma_v} = 1 - \frac{\Delta u_z(t)}{\Delta\sigma_v}$$

$$U_{ave}(t) = \int_0^{2h_f} U_z(t) dt = \frac{\delta(t)}{\delta(t \rightarrow \infty)}$$

El tiempo para alcanzar un grado de consolidación depende de la máxima distancia h_f que debe recorrer el agua → condiciones de drenaje





Teoría de la consolidación

Solución de Taylor (1961)

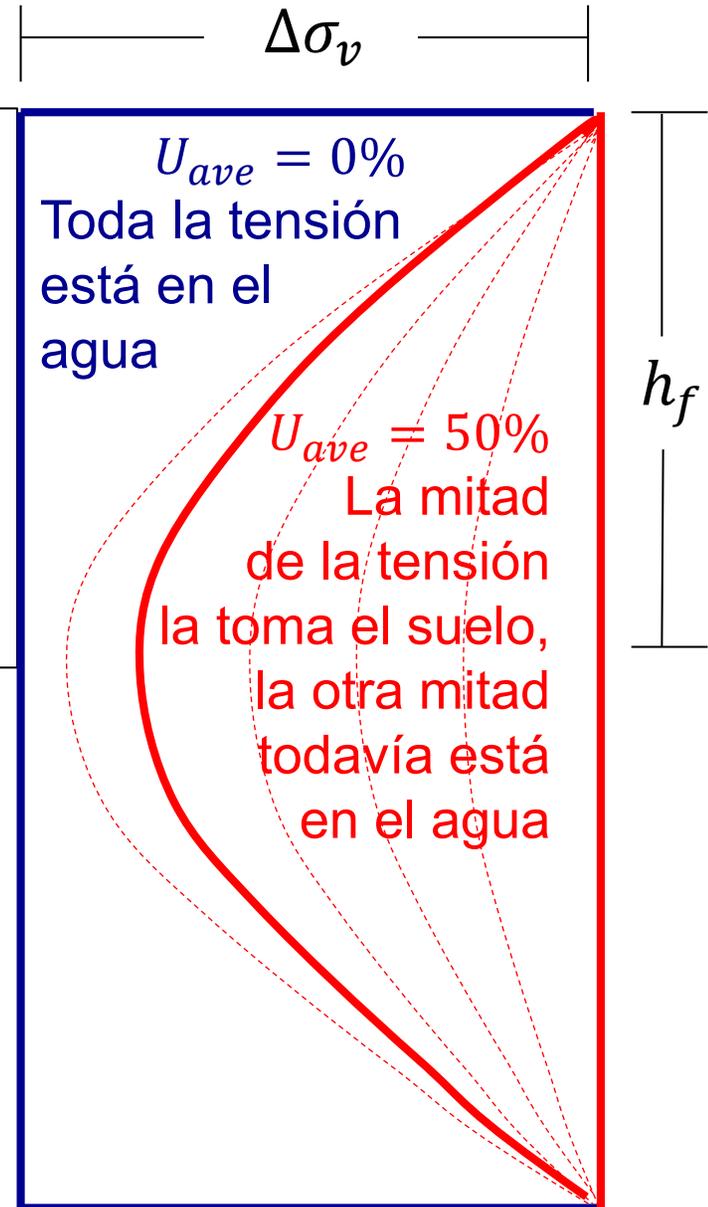
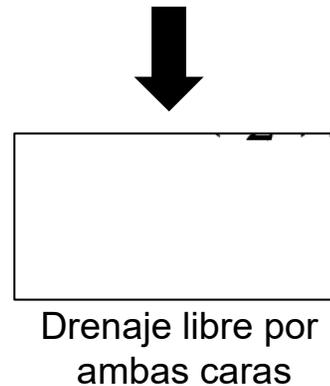
$$U_{ave} = 1 - \frac{\int_0^{2h_f} u_z dz}{2h_f \cdot \Delta\sigma_v} \rightarrow f[T_v]$$

- $U_{ave} < 60\% \rightarrow T_v \cong \frac{\pi}{4} U_{ave}^2$
- $U_{ave} > 60\% \rightarrow T_v \cong -0.933 \log(1 - U_{ave}) - 0.085$

U_{ave} (%)	T_v
0	0
25	0.049
50	0.197
75	0.477
90	0.848
95	1.129
~99	~3
100	∞

El tiempo requerido para alcanzar un grado de consolidación se calcula con

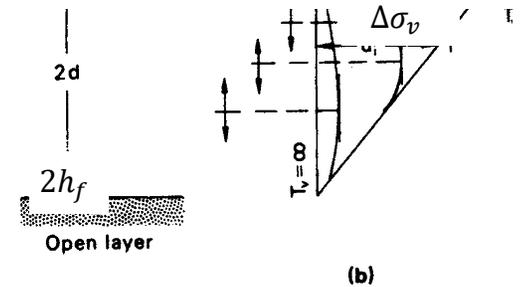
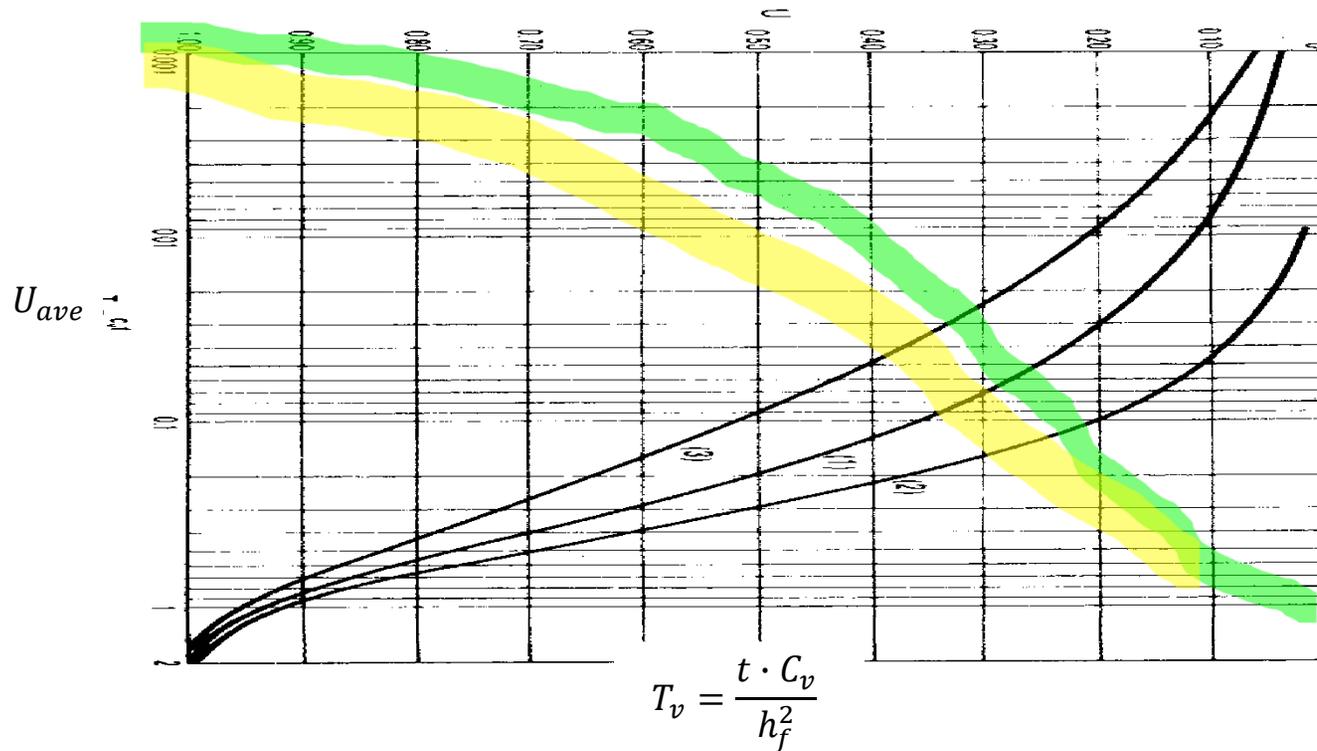
$$t = \frac{T_v h_f^2}{C_v}$$



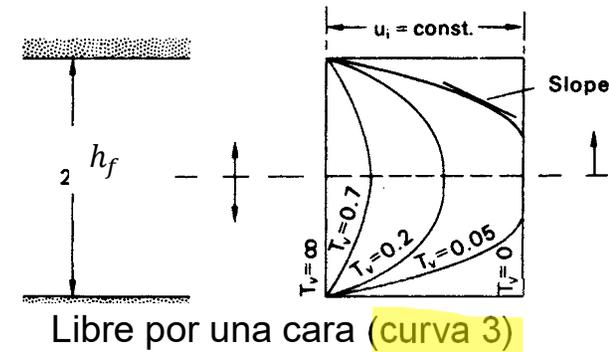


Teoría de la consolidación: condiciones de drenaje

- La relación $U_{ave} \leftrightarrow T_v$ no siempre es la misma y depende de las condiciones de drenaje



Libre por ambas caras (curva 1)



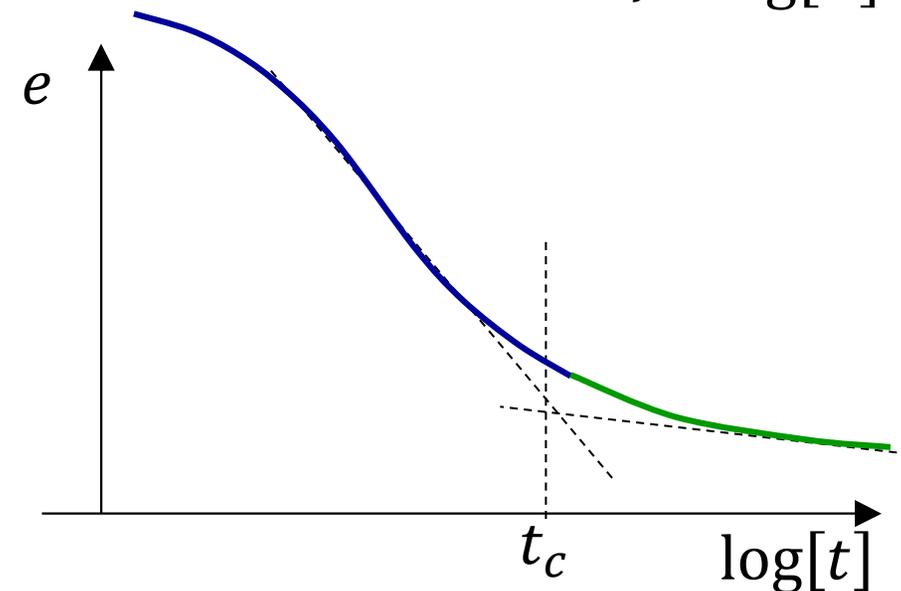
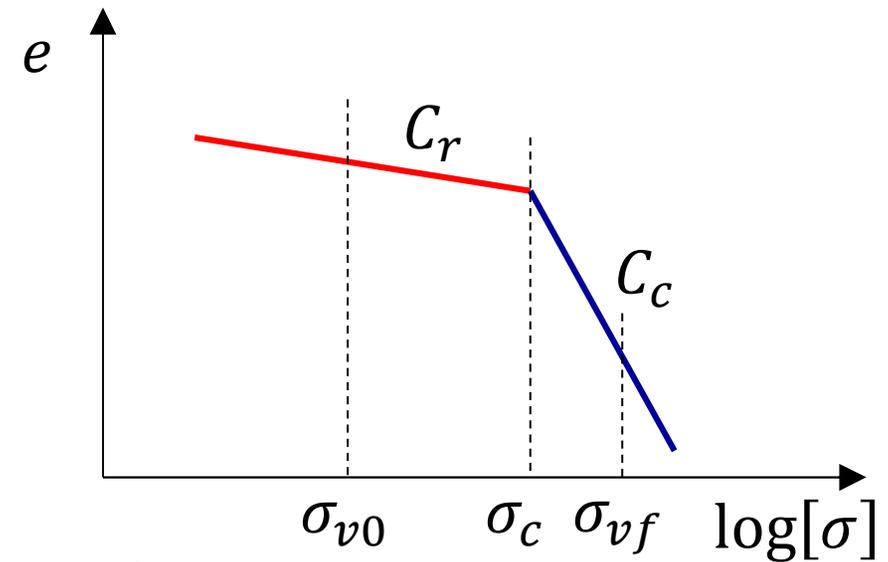
(Craig. Soil Mechanics)

Compresión vs. consolidación



La compresión primaria es un fenómeno elastoplástico acrónico

La consolidación es un fenómeno de flujo cuya velocidad ($\sim C_v = \frac{k \cdot E_{oed}}{\gamma_w}$) depende de la conductividad hidráulica del suelo



Viscoplasticidad y compresión secundaria de arcillas



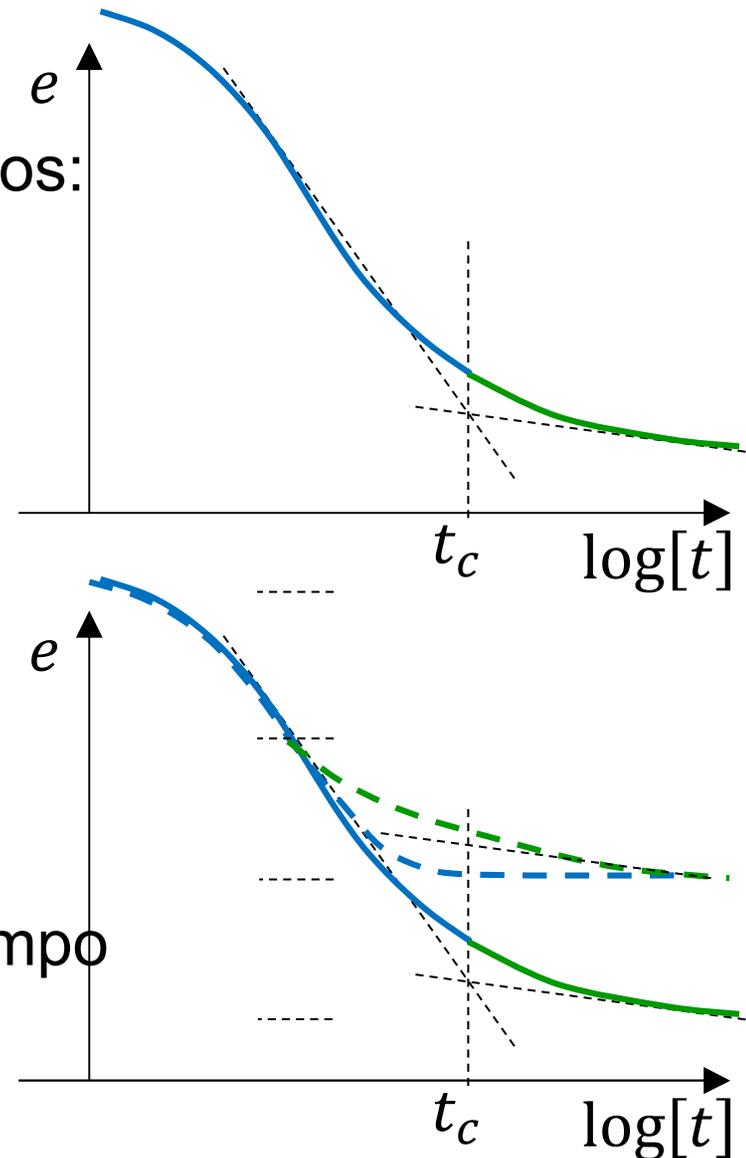
- Teoría “clásica” de compresión de suelos: la **compresión secundaria** comienza con el fin de la **compresión primaria**

$$- \Delta e = f[\sigma_{vf} - \sigma_{vi}] + f[t]$$

- Viscoplasticidad: la **deformación viscosa está siempre presente**

- Velocidad depende de distancia entre tensión y tensión de fluencia
- No se puede separar el efecto del cambio de tensión del efecto del tiempo

$$- \Delta e = f[\sigma_{vf} - \sigma_{vi}, t]$$



Fin de la consolidación primaria

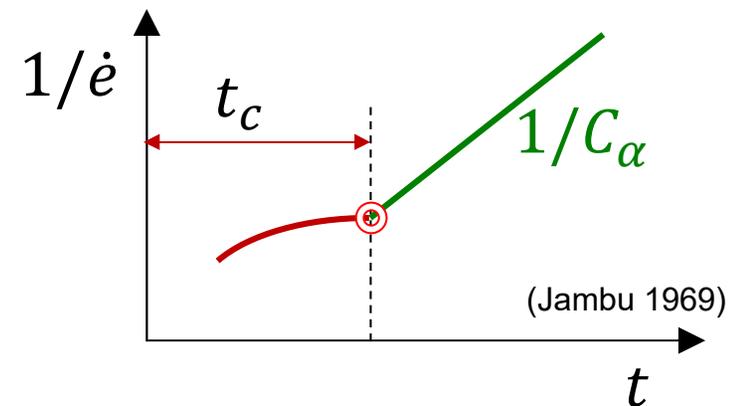
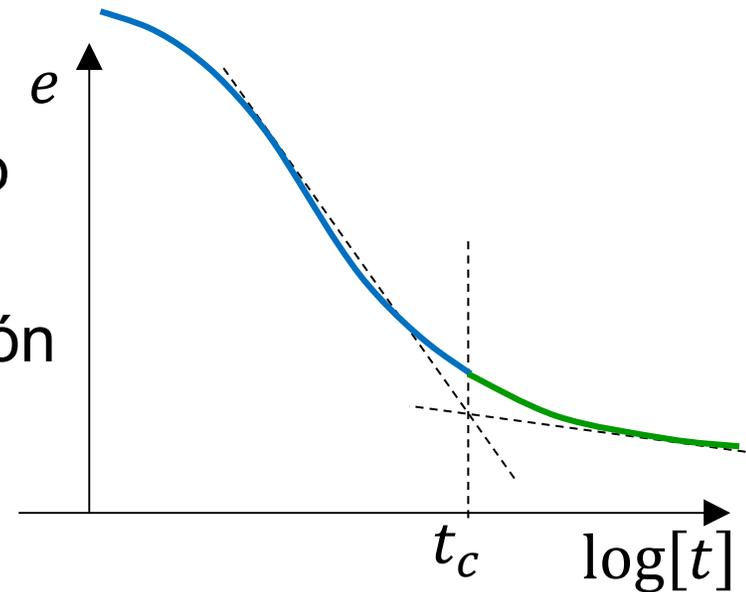


La **consolidación primaria** termina cuando toda la muestra tiene $\Delta u = 0$

- Pero eso no es el final de la deformación (consolidación secundaria)

consolidación secundaria lineal en $\log[t]$

- Mientras hay compresión primaria la curva $1/\dot{\epsilon} - t$ es no lineal
- En el 100% de la consolidación primaria se hace lineal



Fin de la consolidación primaria

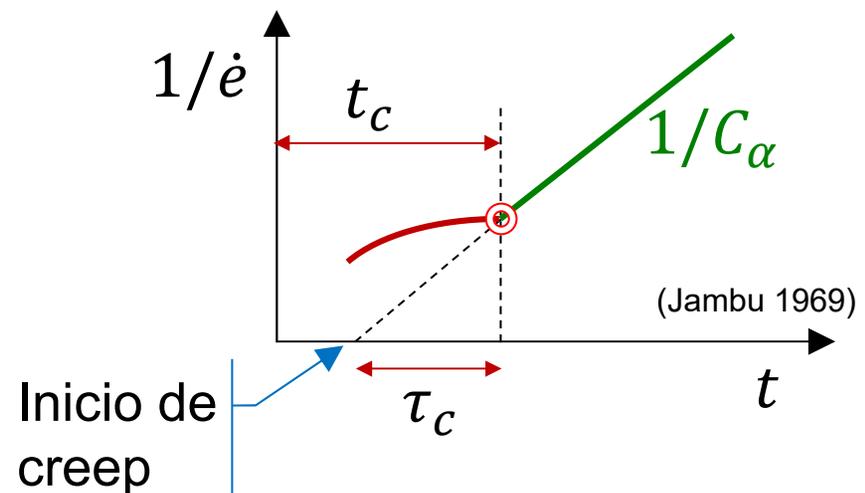
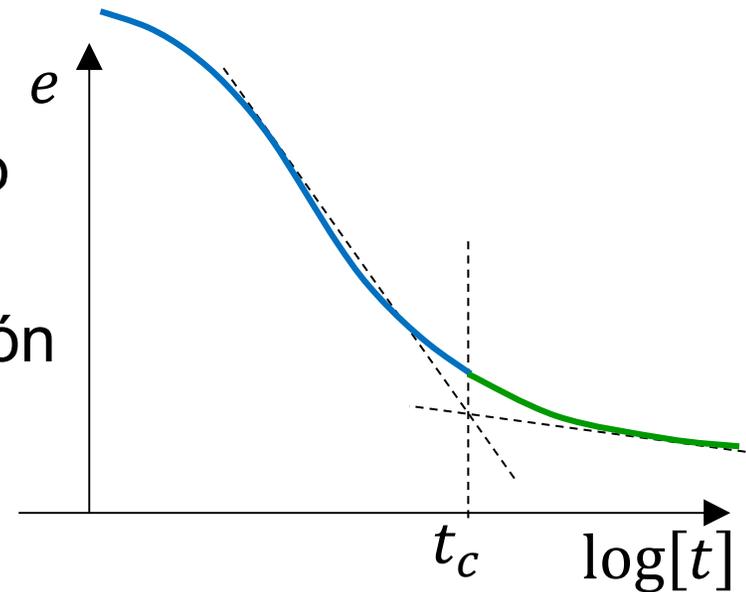


La **consolidación primaria** termina cuando toda la muestra tiene $\Delta u = 0$

- Pero eso no es el final de la deformación (consolidación secundaria)

consolidación secundaria lineal en $\log[t]$

- Mientras hay compresión primaria la curva $1/\dot{\epsilon} - t$ es no lineal
- En el 100% de la consolidación primaria se hace lineal
- El *creep* “empieza” antes, en $t_c - \tau_c$





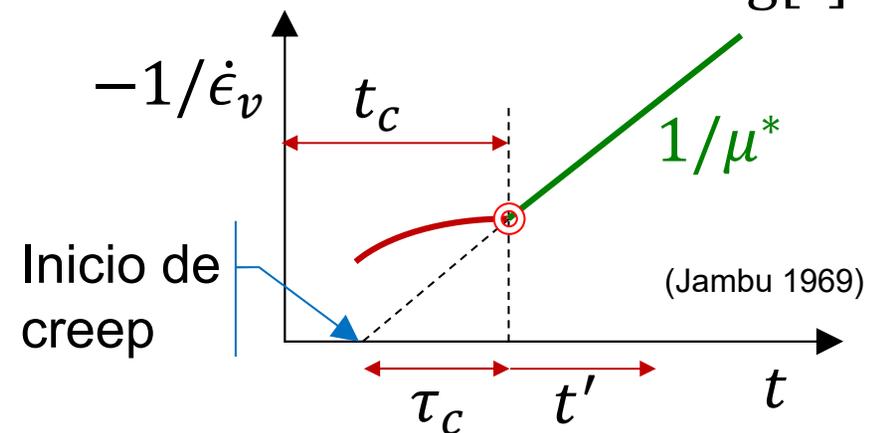
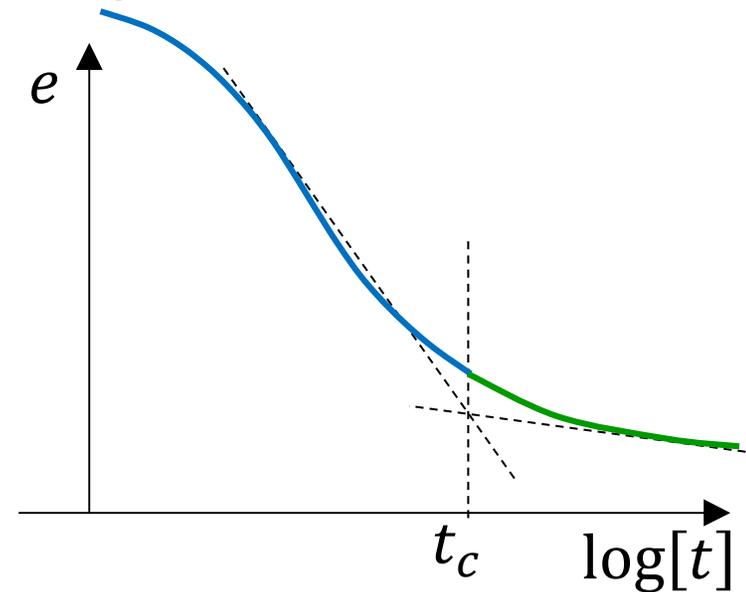
Interpretación del ensayo de edómetro convencional (escalones de 24 hs)

La **consolidación primaria** tarda entre segundos (arenas) y horas-días (arcillas)

- Escalón 24 hs incluye **consolidación secundaria**

Compresión secundaria lineal en $\log[t]$

- Mientras hay compresión primaria la curva $1/\dot{\epsilon}_v - t$ es no lineal
- El *creep* “empieza” antes del fin de la compresión primaria



$$\epsilon_v = -C_s \log[\sigma_v/\sigma_{v0}] - (C_c - C_s) \log[\sigma_v/\sigma_{vc}] - C_\alpha \log[(t' + \tau_c)/\tau_c]$$

Índice

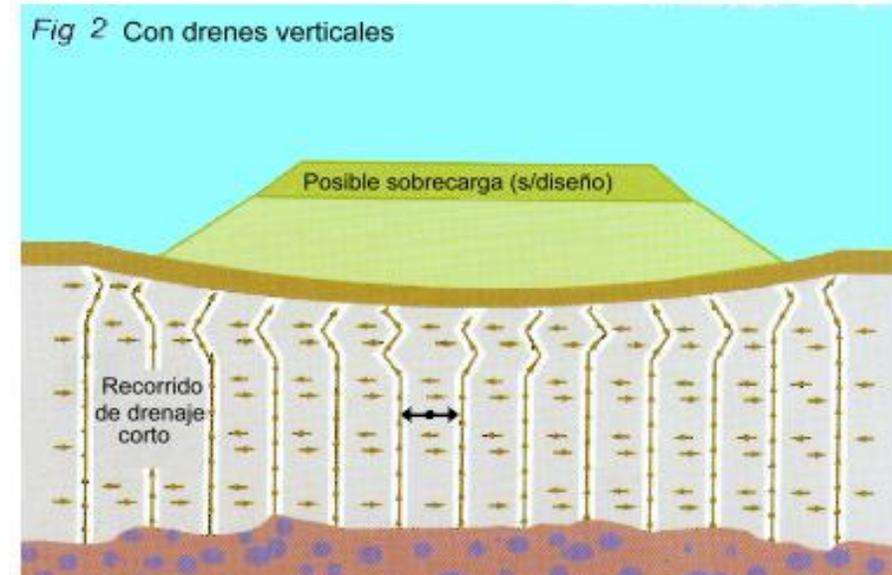
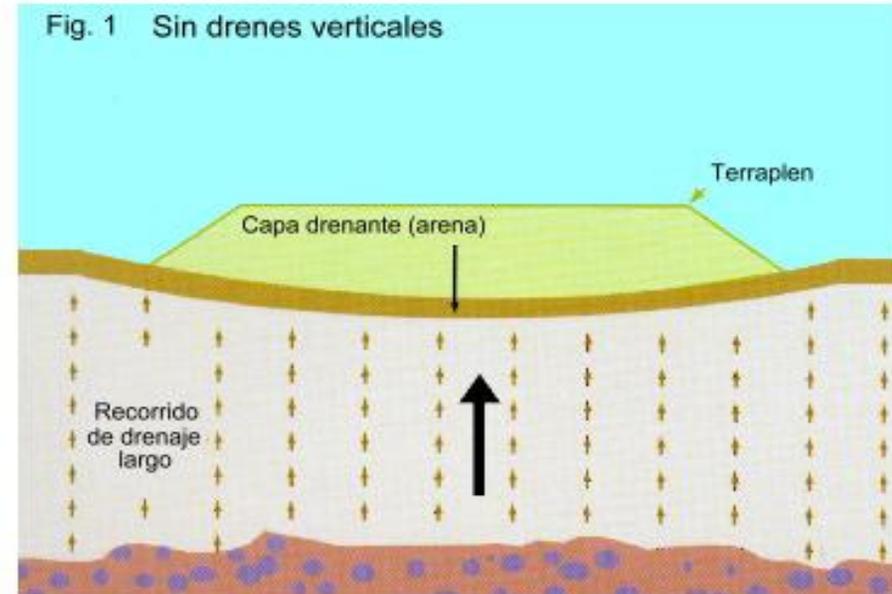
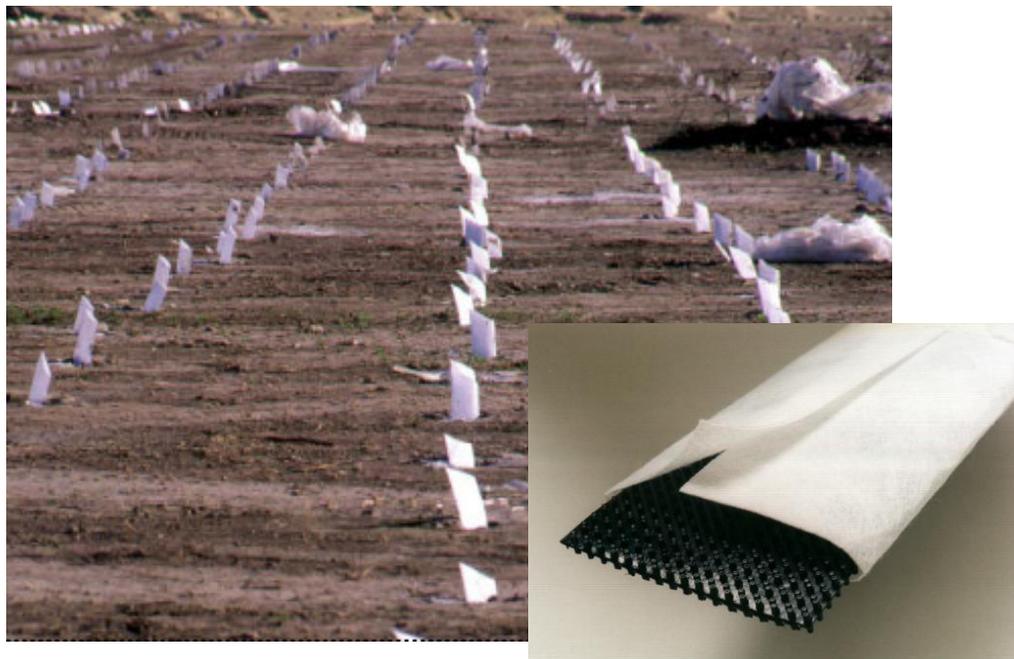


- Definición de consolidación unidimensional
- Teoría de la consolidación unidimensional
- Consolidación radial

Drenes verticales



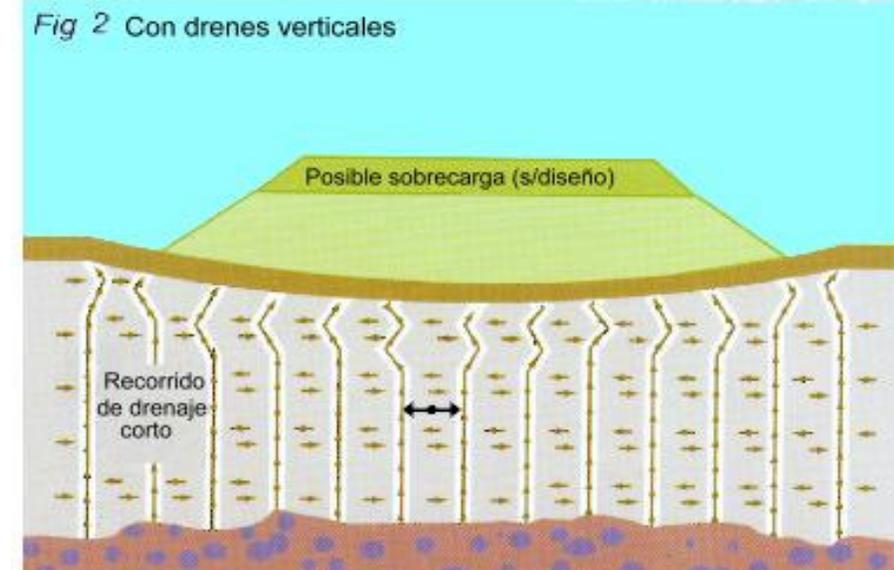
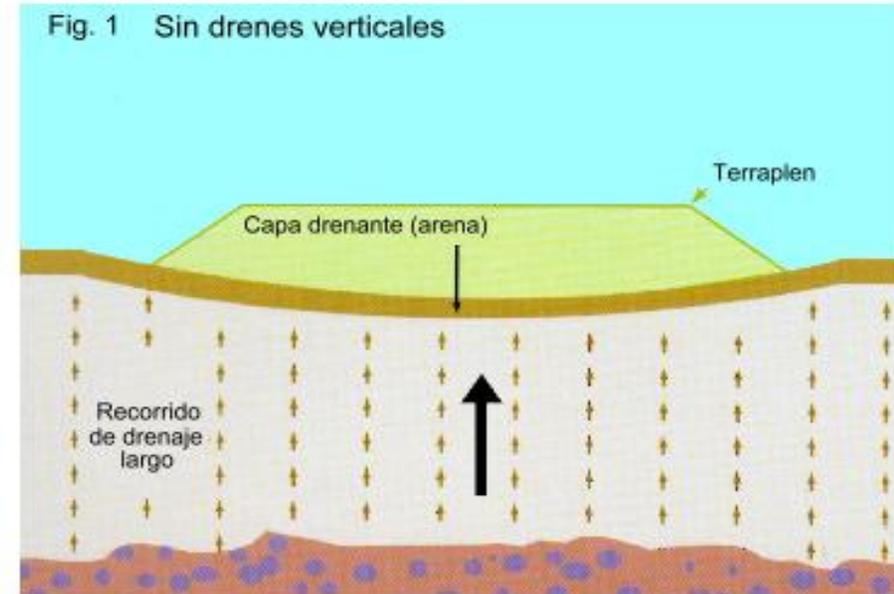
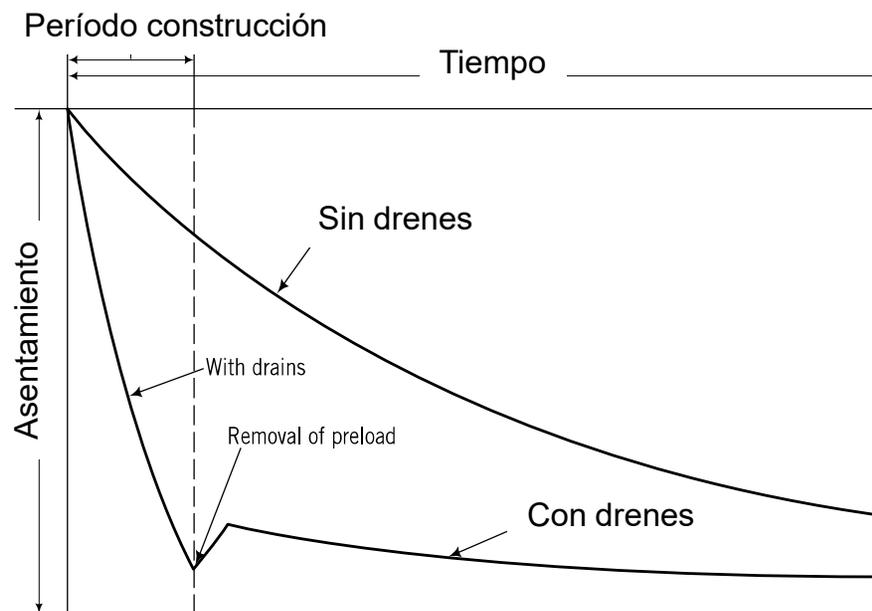
Para acelerar el proceso de consolidación se pueden instalar drenes verticales que inducen flujo radial



Drenes verticales



Para **acelerar** el proceso de consolidación se pueden instalar drenes verticales que inducen flujo radial



Teoría de consolidación radial



Analogía con la consolidación vertical

$$C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \rightarrow C_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{\partial u}{\partial t}$$

- Con $C_h = \frac{k_h \cdot E}{\gamma_w}$

Solución (Barron 1942): $U_r = 1 - e^{-\frac{8T_r}{\mu_s}}$

- Con $T_r = \frac{C_h \cdot t}{D^2}$

- Y $\mu_s = \ln \left(\frac{D}{d} \right) - \frac{3}{4}$

Consolidación radial + vertical: $1 - U_{rz} = (1 - U_z)(1 - U_r)$

Bibliografía



Básica

- Craig. Soil Mechanics. Spon Press
- Jiménez Salas y otros. Geotecnia y Cimientos. Ed. Rueda
- Powrie. Soil Mechanics. Ed. Spon

Complementaria

- Mitchell. Fundamentals of soil behavior. Wiley.
- Terzaghi, Peck y Mesri. Soil Mechanics in Engineering Practice. Wiley
- USACE. Settlement analysis.