



DEFORMACIONES EN SUELOS

PARTE 1

DIFERIDOS EN EL TIEMPO

**Area de Geotecnia.
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA**



DEFORMACIONES EN SUELOS

CONSOLIDACION

OBJETIVO:

- Identificar el concepto físico del proceso de consolidación
- Conocer el ensayo de laboratorio que se emplea
- Evaluar la magnitud del asentamiento y el tiempo que demanda la consolidación

REFERENCIAS:

- Fundamentos de ingeniería geotécnica. Cuarta edición. BRAJA M. DAS. Capítulo 9 Consolidación.
- Soil Mechanics in Engineering Practice. 3° Edición. Terzaghi, K.; Peck, R. y Mesri, G. Article 16. Compressibility of Confined Layers of Soils

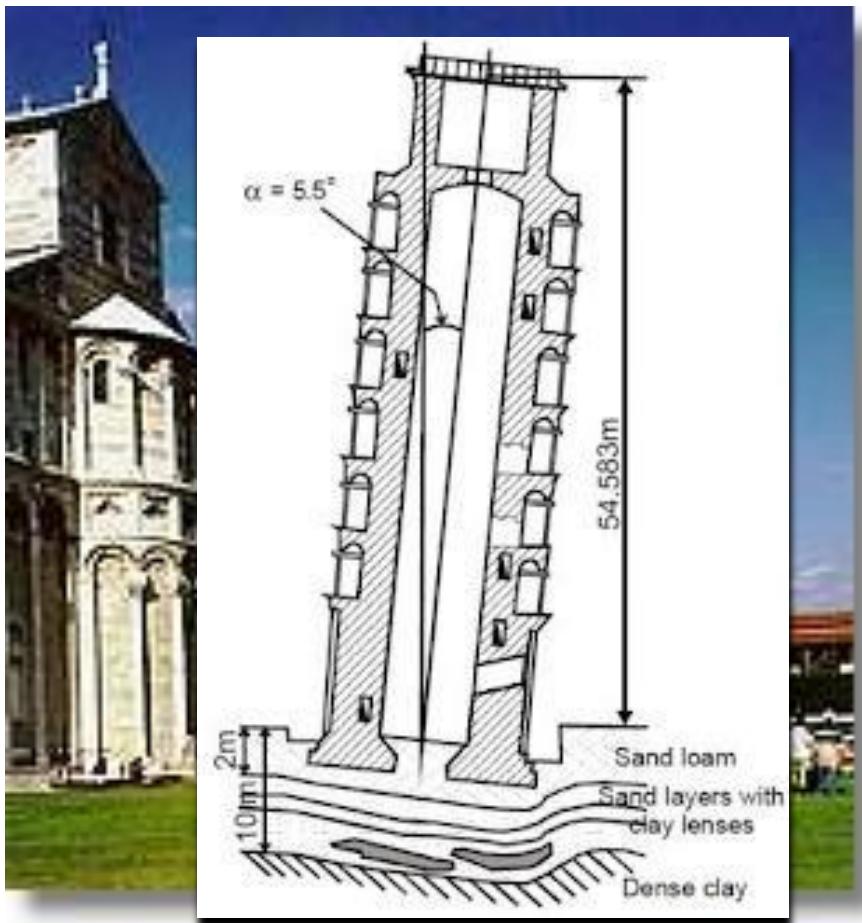
Área de Geotecnia.

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

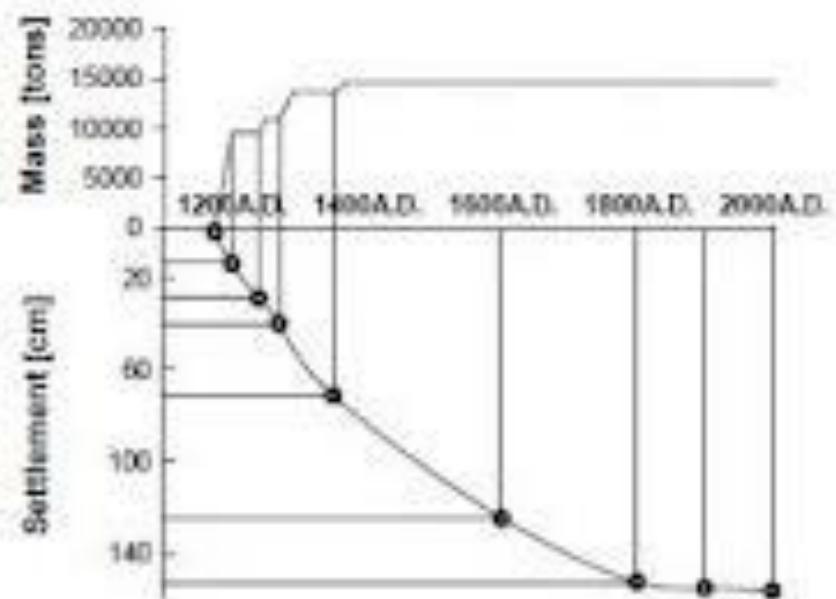
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA



CONSOLIDACION



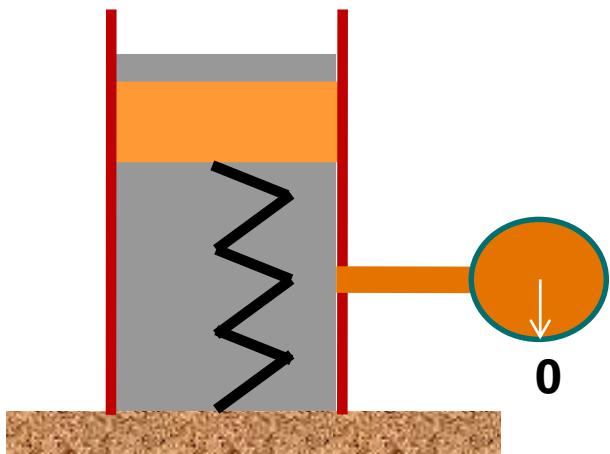
ASENTAMIENTO DIFERIDOS EN EL TIEMPO





MECANISMO ANÁLOGO

CONSOLIDACION (Definición)

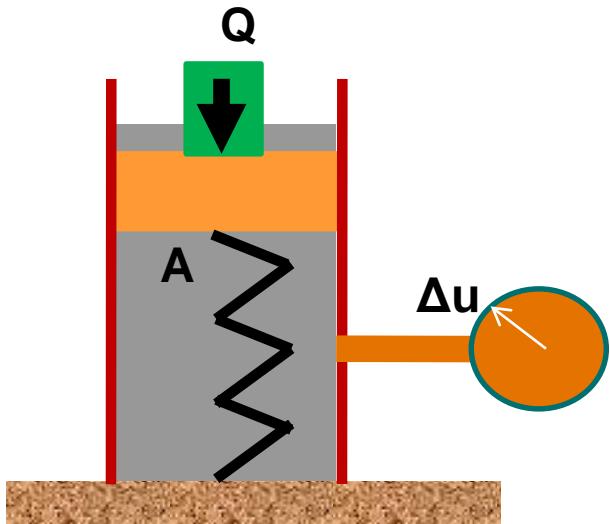


A. Estado Inicial. Recipiente lleno de agua, con resorte vinculado a la tapa. Válvula cerrada



MECANISMO ANÁLOGO

CONSOLIDACION (Definición)



- A. Estado Inicial.** Recipiente lleno de agua, con resorte vinculado a la tapa. Válvula cerrada
- B. Carga Externa.** Se aplica sobre la tapa (presión), la soporta en su totalidad el agua, el resorte (esqueleto sólido suelo) no la siente.

¿Cuánto vale $\Delta\sigma$?

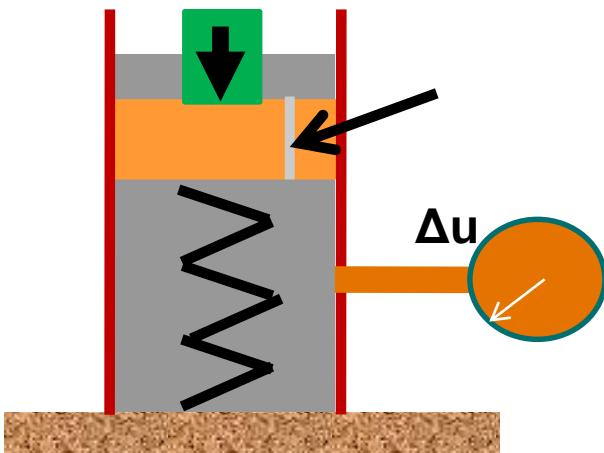
¿Cuánto vale Δu ?

¿Hay asentamientos?



MECANISMO ANÁLOGO

CONSOLIDACION (Definición)



Tiempo $\neq 0$

- Disminuye Δu
- Se producen asentamientos
- Se carga el resorte

A. Estado Inicial. Recipiente lleno de agua, con resorte vinculado a la tapa. Válvula cerrada

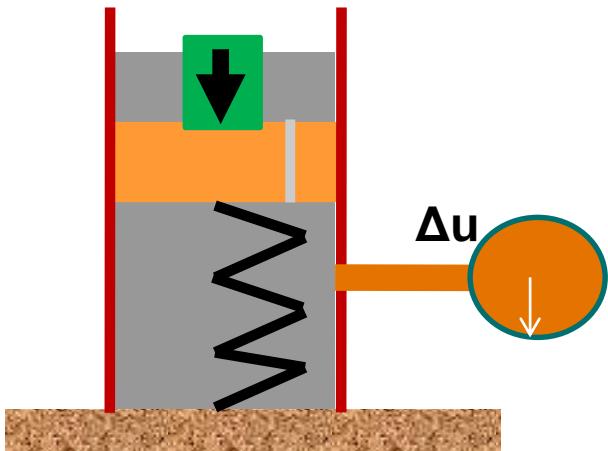
B. Carga Externa. Se aplica sobre la tapa (presión), la soporta en su totalidad el agua, el resorte (esqueleto sólido suelo) no la siente.

C. Apertura de Válvula. El agua drena, el resorte comienza a tomar carga y comprimirse procurando equilibrar la carga



MECANISMO ANÁLOGO

CONSOLIDACION (Definición)



- $\Delta u = 0$
- Se producen nuevos asentamientos
- Y el resorte se carga a una tensión igual a:

$$\Delta \sigma' = \frac{Q}{A}$$

A. Estado Inicial. Recipiente lleno de agua, con resorte vinculado a la tapa. Válvula cerrada

B. Carga Externa. Se aplica sobre la tapa (presión), la soporta en su totalidad el agua, el resorte (esqueleto sólido suelo) no la siente.

C. Apertura de Válvula. El agua drena, el resorte comienza a tomar carga y comprimirse procurando equilibrar la carga

D. Estado Final. El resorte deforma lo necesario para soportar la totalidad de la carga. El drenaje del exceso de agua finaliza



CONSOLIDACION

(Definición)

CONSECUENCIAS

1. **El exceso de presión es inicialmente soportado por el agua intersticial → se incrementa su presión**
2. **Se inicia un proceso “lento” de eliminación de agua para reducir el exceso de presión.**
3. **Se transfiere la presión a la estructura sólida del suelo.**
4. **Ocurre asentamiento a lo largo del tiempo**



CONSOLIDACION (Definición)

FACTORES CONCURRENTES

1. Permeabilidad baja → (Arcillas)
2. Alto grado de saturación → (Saturado o casi saturado).
3. Se aplica una carga externa → (Presiones inducidas).
4. Posibilidad de drenaje



CONSOLIDACION (Definición)

TEORIA DE CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL

CONDICIONES INICIALES (Terzaghi 1925):

1. El suelo está complementamente saturado.
2. El medio es isotrópico y homogéneo.
3. Se cumple la ley de Darcy.
4. El flujo es unidimensional y en dirección vertical
5. El coeficiente de permeabilidad es constante
6. Se produce un incremento de presión Δp constante en el tiempo
7. Los sólidos y el agua se consideran incompresibles.



CONSOLIDACION (Definición)

TEORIA DE CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL

HIPOTESIS:

1. El cambio de volumen en el suelo es igual a volumen de agua expulsado.
2. El volumen de agua expulsado es igual al cambio en el volumen de vacíos.
3. La compresión aplicada en sentido vertical, sólo produce como cambio de volumen un asentamiento (cambio en altura).



CONSOLIDACION (Definición)

TEORIA DE CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL

Cambio de volumen por variación de flujo en elemento

$$(q_z + dq_z) - q_z = \frac{\partial V}{\partial t}$$

Aplicando ley de Darcy y las hipótesis

$$k \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} dx dy dz = \frac{\partial V}{\partial t}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$



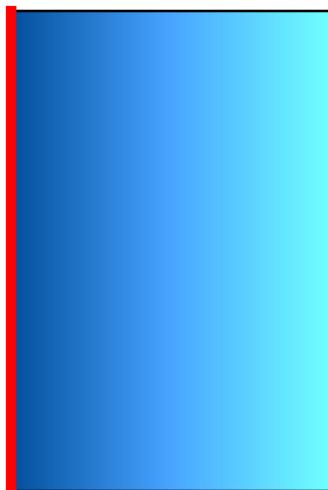
CONSOLIDACION (Definición)

TEORIA DE CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL

$t=0$

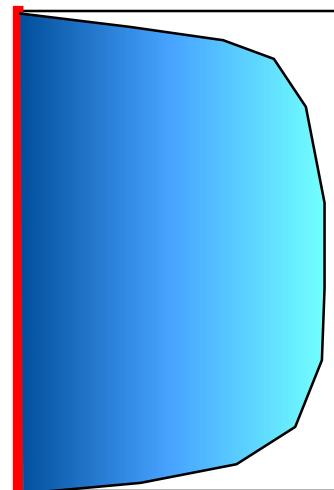
$$\Delta u = \Delta p$$

$$K \rightarrow \infty$$



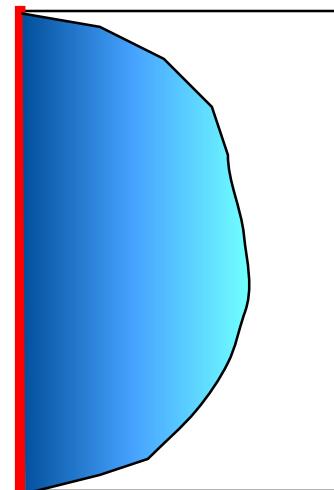
$T=0$

$$K \rightarrow \infty$$



$T \rightarrow \infty$

$$K \rightarrow \infty$$

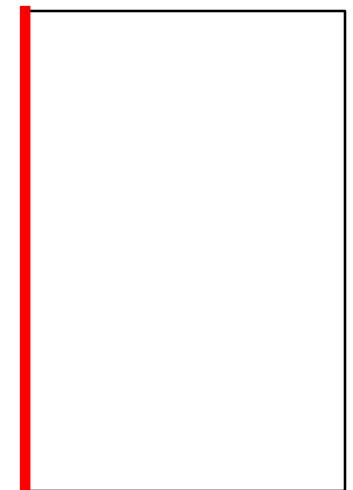


$t=\infty$

$$\Delta u = 0$$

$$\Delta \sigma' = \Delta p$$

$$K \rightarrow \infty$$



$$K \rightarrow \infty$$

$$K \rightarrow \infty$$

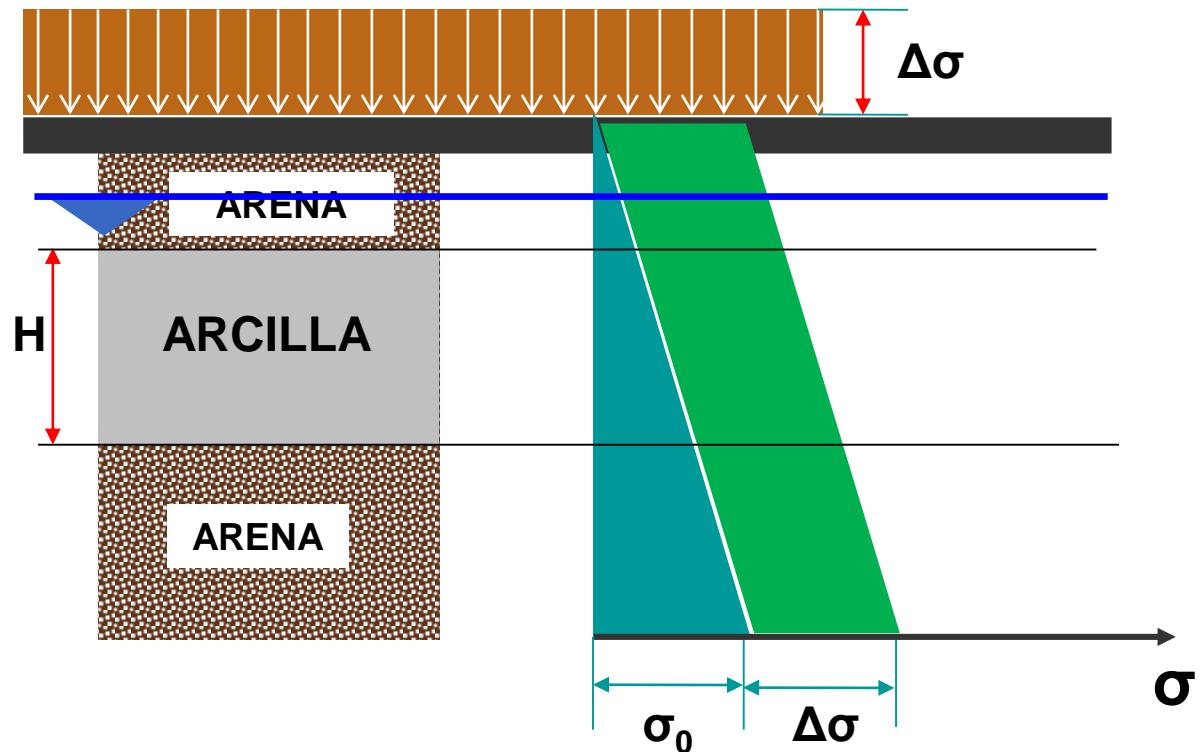
$$K \rightarrow \infty$$

$$K \rightarrow \infty$$

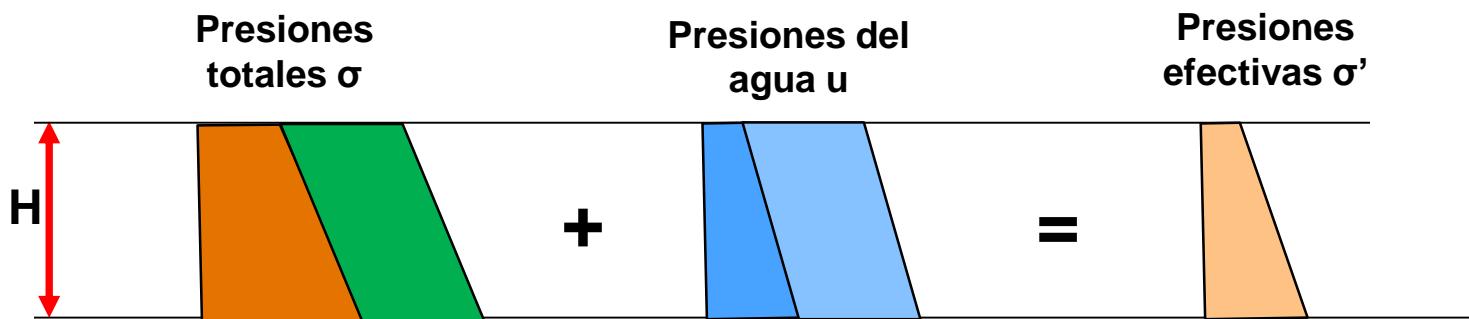
EVOLUCION DE LA PRESIÓN DE POROS



CONSOLIDACION (Definición)

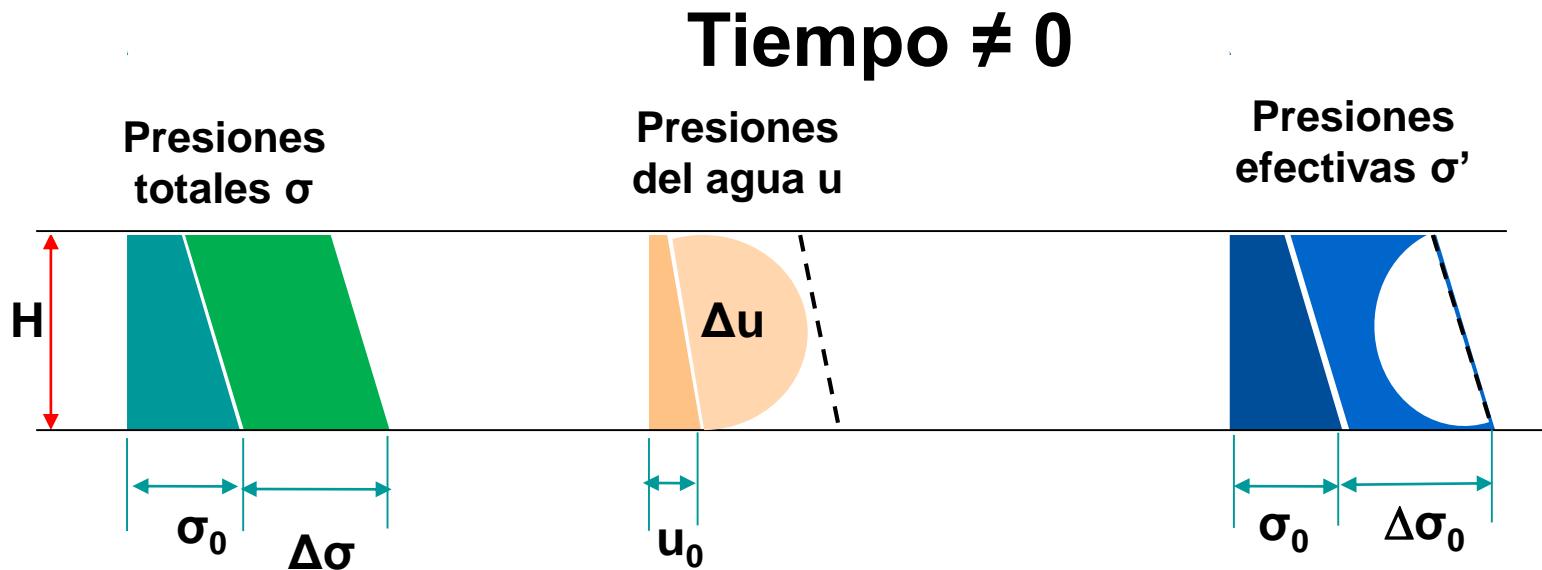


Interpretación del Fenómeno en el Suelo



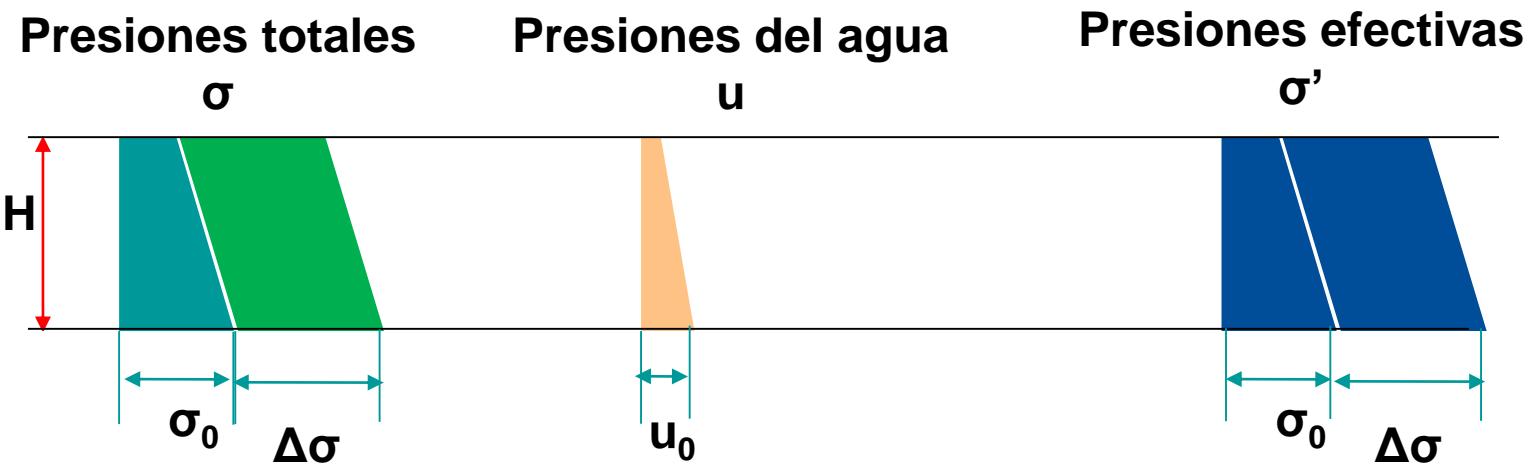
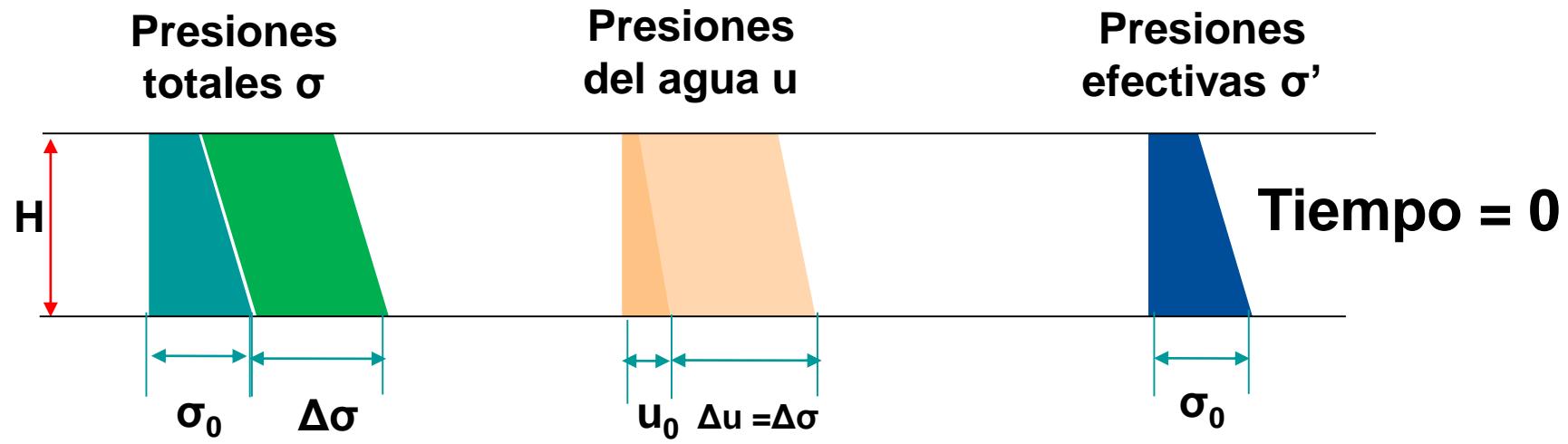


CONSOLIDACION (Definición)





CONSOLIDACION (Definición)



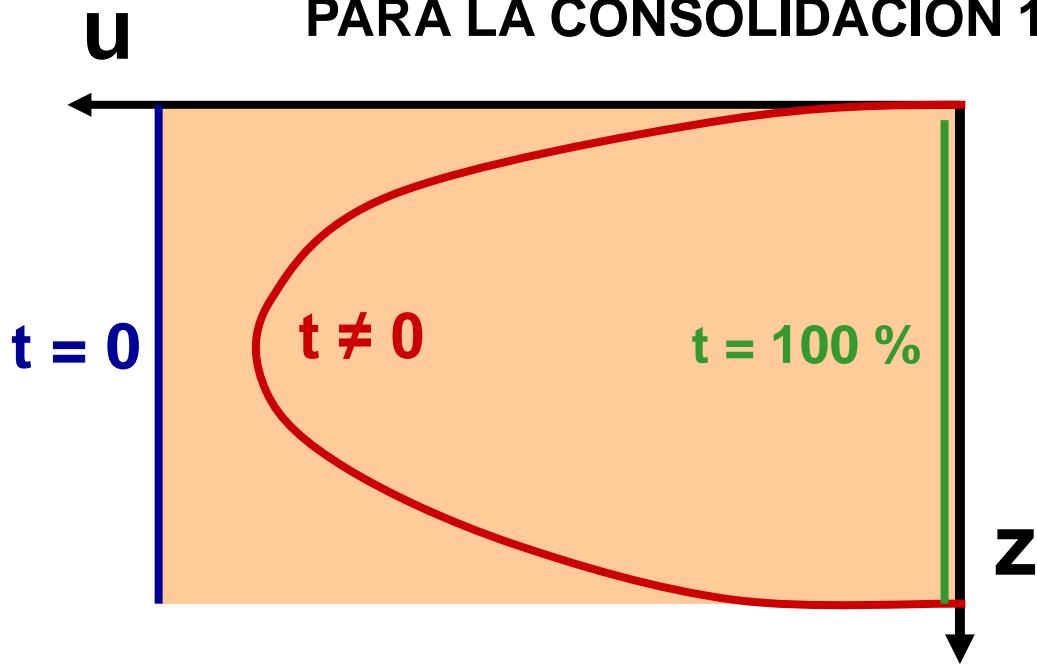
Tiempo = t_{100} de consolidación



CONSOLIDACION

(Definición)

VARIACION DE LA PRESION DE POROS EN EL TIEMPO
PARA LA CONSOLIDACION 1D



$$u = \frac{4\sigma}{\pi} \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{1}{2n+1} \left[\operatorname{sen} \frac{(2n+1)\pi z}{2H} \right] e^{-(2n+1)^2 \pi^2 T/4}$$

$$u = \sum_{m=0}^{m=\infty} \left[\frac{2u_0}{M} \operatorname{sen} \left(\frac{Mz}{H_{dr}} \right) \right] e^{-M^2 T_v}$$

$$M = \frac{\pi}{2}(2m + 1)$$

$$T_v = \frac{c_v t}{H_{dr}^2} = \text{factor tiempo}$$



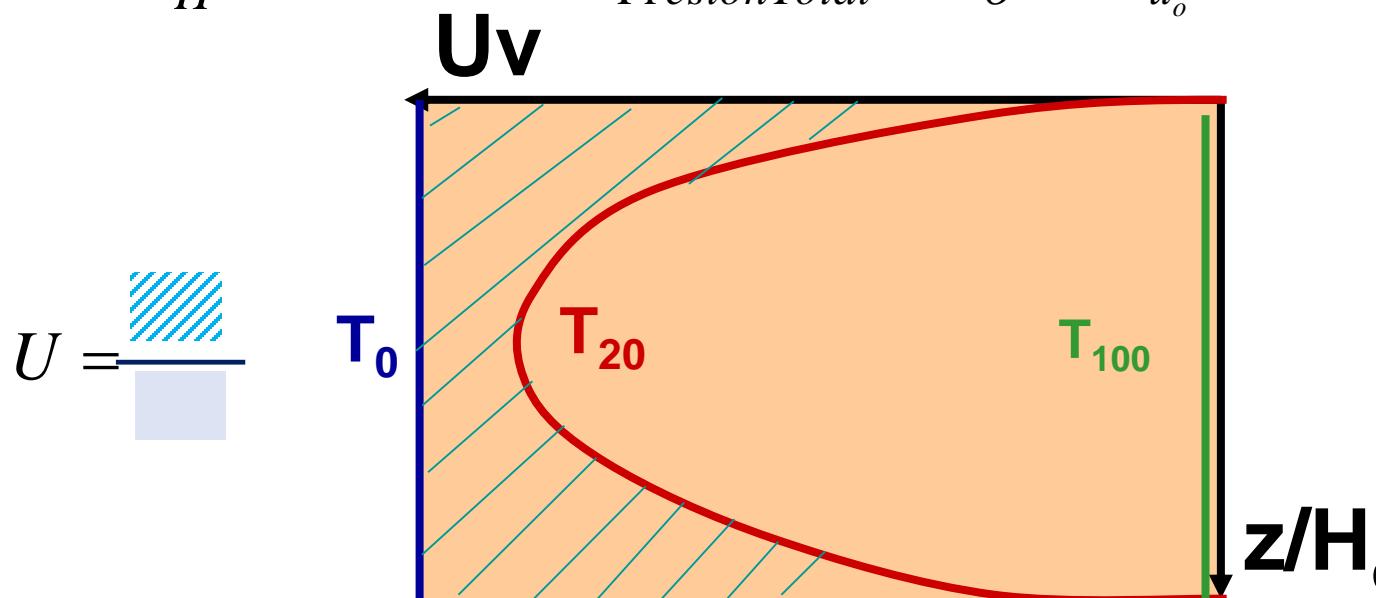
CONSOLIDACION

(Definición)

MODIFICACION DE ESCALAS

$$T = \frac{C_v t}{H^2}$$

$$U_v = \frac{\text{Presion Efectiva}}{\text{Presion Total}} = \frac{\sigma - u}{\sigma} = \frac{u_o - u}{u_o}$$



$$U = \frac{\text{Uv}}{1 + e^{-Uv}}$$

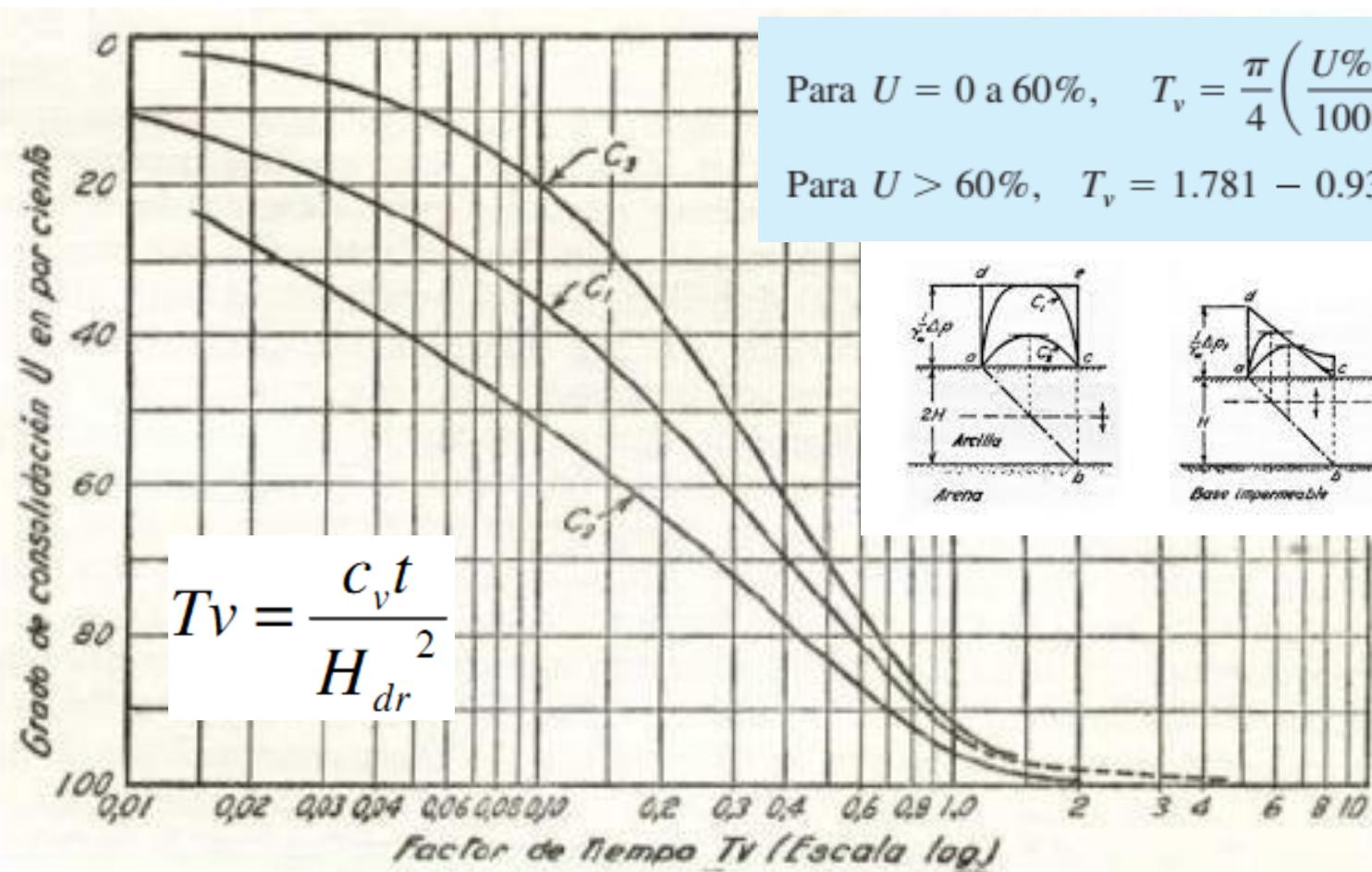
$$U = 1 - \frac{1}{H} \int_0^H \frac{u_o - u}{u_o} dz$$

GRADO CONSOLIDACION PROMEDIO



CONSOLIDACION (Definición)

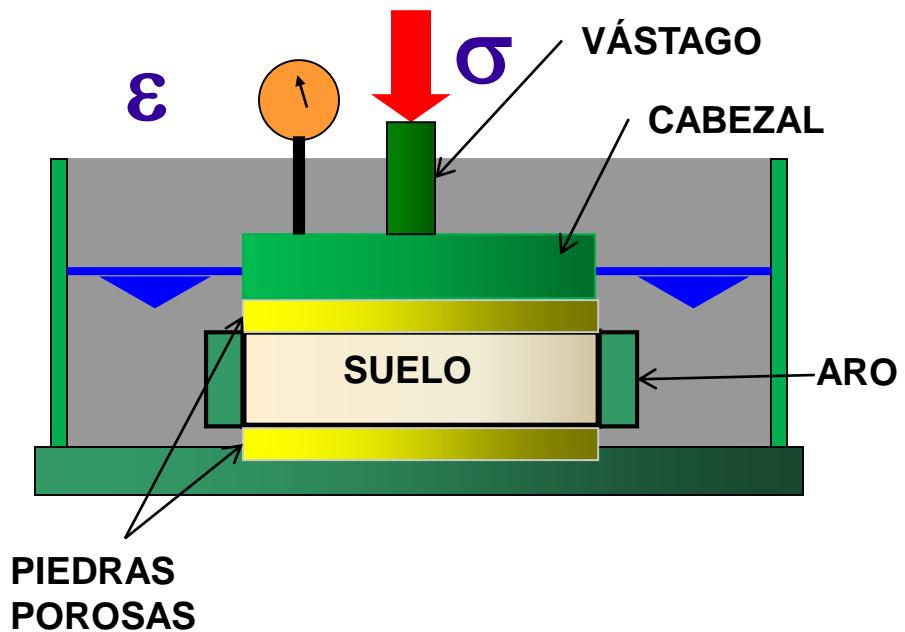
TEORIA DE CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL





CONSOLIDACION (Ensayos)

Ensayo de Consolidación o Edométrico
(Norma ASTM D2435)





CONSOLIDACION (Ensayos)

Ensayo de Consolidación o Edométrico
(Norma ASTM D2435)





CONSOLIDACION

(Ensayos - Resultados)

PRESIONES

INICIAL = 12,5 kPa

Duplican las presiones

25,0 kPa

50,0 kPa

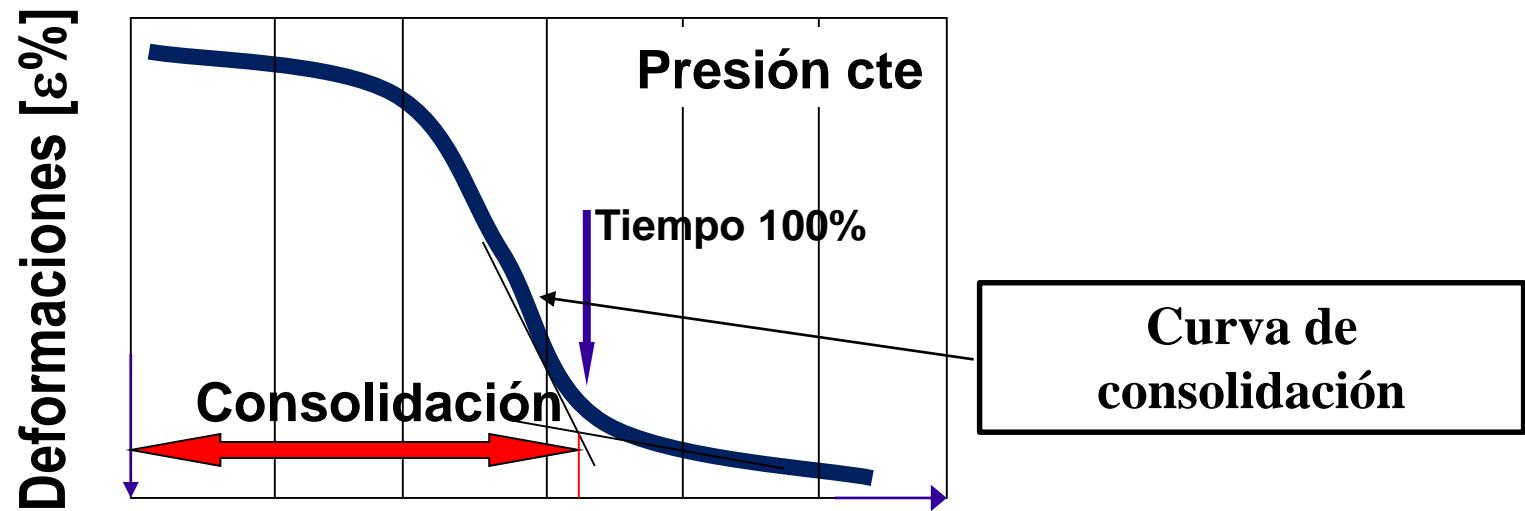
100,0 kPa

.

1600,0 kPa

C_v = Coeficiente de consolidación

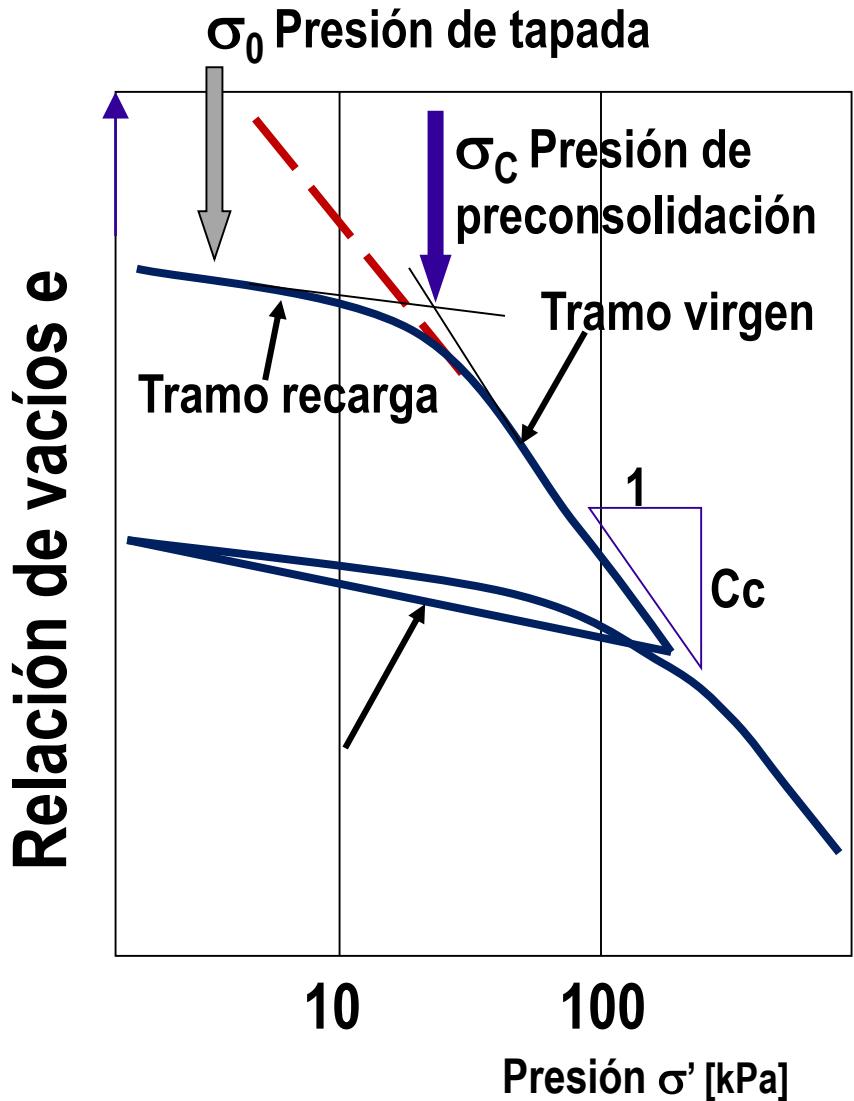
$$C_v = \frac{T \cdot H^2}{t} \left[\frac{m^2}{días} \right]$$





CONSOLIDACION

(Ensayos - Resultados)



$$\sigma_0 = \sigma_c$$

ARCILLAS NORMALMENTE CONSOLIDADAS

$$\sigma_0 < \sigma_c$$

↓

ARCILLAS PRECONSOLIDADAS

$$Cc = \frac{\Delta e}{\log \frac{\sigma_F}{\sigma_0}}$$



CONSOLIDACION

(Ensayos - Resultados)

- **Coeficiente de Compresibilidad (a_v):** Pendiente de recta tangente a Curva de Compresibilidad

$$a_v = -\frac{de}{d\sigma} \quad a_v = -\frac{\Delta e}{\Delta \sigma}$$

- Pendiente de Tramo virgen: **Índice de Compresión (C_c)**
- Pendiente de Tramo descarga: **Índice de Hinchamiento (C_s)**

$$C_c = \frac{e_{\text{inicial}} - e_{\text{final}}}{\log\left(\frac{\sigma'_{\text{final}}}{\sigma'_{\text{inicial}}}\right)}$$

$$C_s = \frac{e_{\text{final}} - e_{\text{inicial}}}{\log\left(\frac{\sigma'_{\text{inicial}}}{\sigma'_{\text{final}}}\right)}$$



CONSOLIDACION

(Ensayos - Resultados)

Valores orientativos del Indice de Compresión

$$Cc = 0,009(W_L - 10)$$

Skempton (1944)

$$Cc = 0,5 \cdot \gamma_s \cdot \left[\frac{P_I}{100} \right]$$

Wroth and Wood (1978)

$$Cc = 0,141 \cdot \gamma_s^{1,2} \cdot \left[\frac{1 + e_o}{\gamma_s} \right]^{2,38}$$

Rendon – Herrero (1980)

$$Cc = 0,2343 \cdot \gamma_s \cdot \left[\frac{W_L}{100} \right]$$

Nagaraj and Murty (1985)

$$\frac{Cc}{Cs} \approx 0,15 \text{ a } 0,30$$

Indice de expansión

$$Cs = 0,00046 \cdot W_L \cdot \gamma_s$$

Indice de expansión



CONSOLIDACION (Ensayos - Resultados)

Historia de Tensiones de las Arcillas

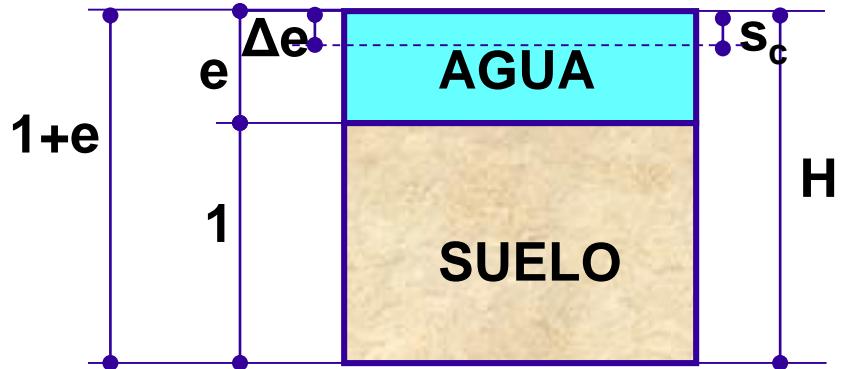
Comportamiento σ - ϵ depende de historia de tensiones

- **Arcilla Normalmente Consolidada:** Aquélla que nunca estuvo sometida a tensiones efectivas mayores a las actualmente existentes
- **Arcilla Sobreconsolidada:** Aquélla que alguna vez estuvo sometida a tensiones efectivas mayores a las actualmente existentes

$$\text{OCR} = \frac{\sigma_p}{\sigma_o}$$



CONSOLIDACION (Asentamiento)



$$s_c = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H$$

$$\frac{s_c}{H} = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$$

donde:

s_c = Asentamiento por consolidación

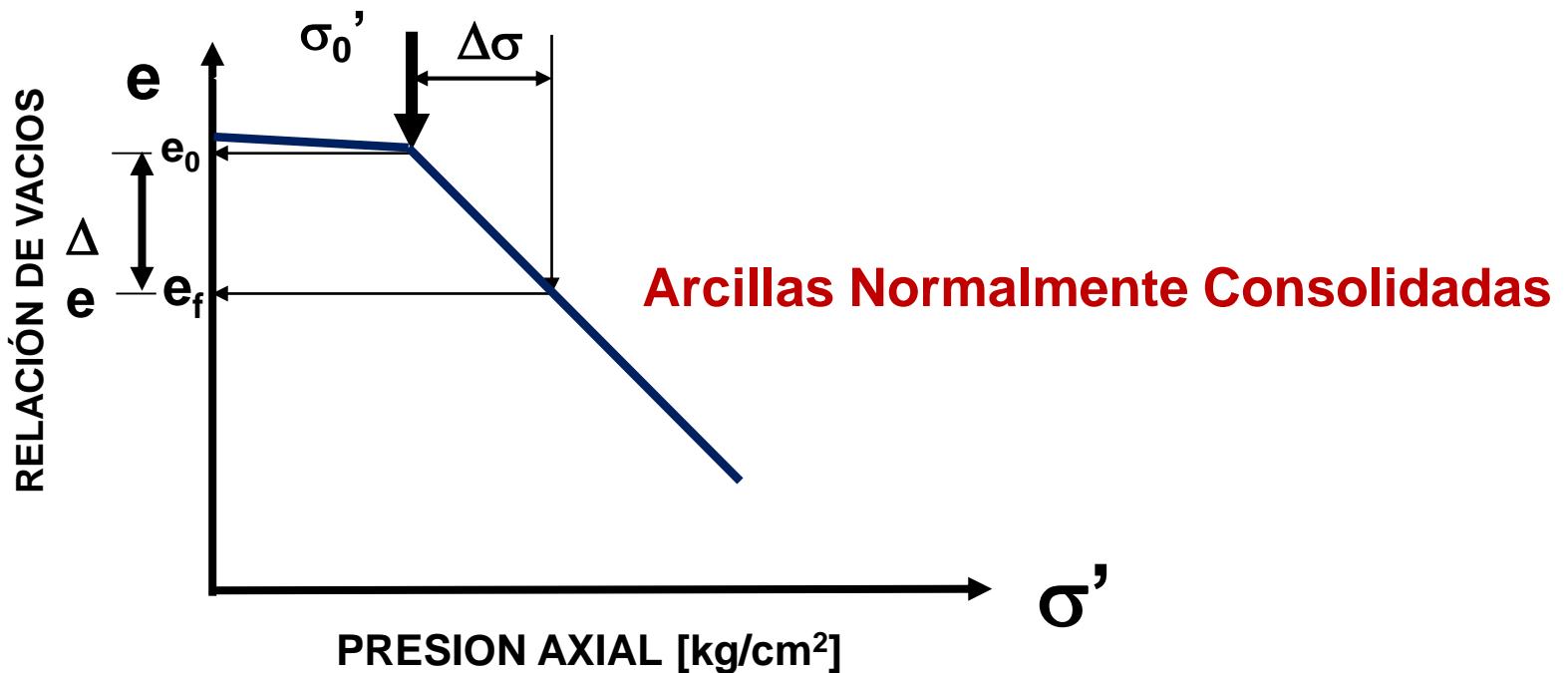
e_0 = Relación de vacíos inicial

Δe = Incremento de la relación de vacíos

H = Espesor del estrato considerado



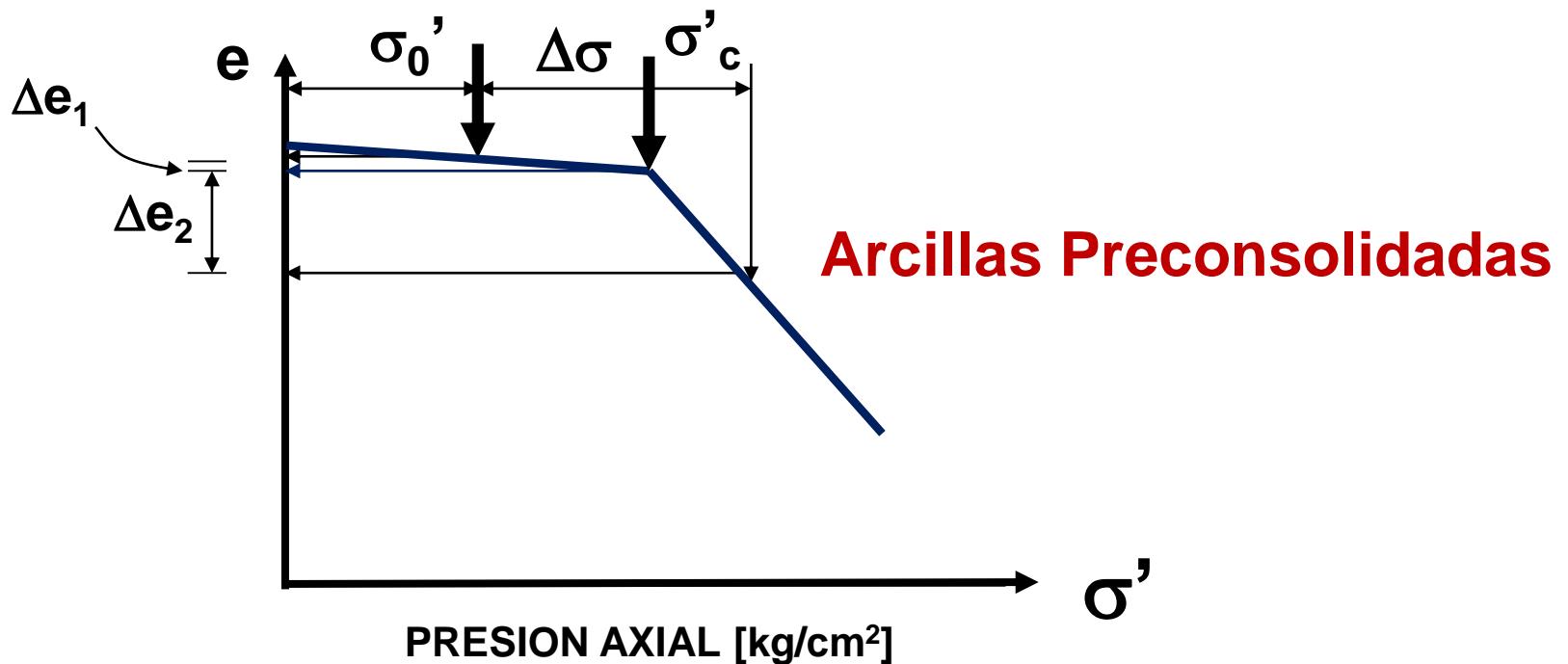
CONSOLIDACION (Asentamiento)



$$s_c = C_c \frac{H}{1+e_0} \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma}{\sigma'_0}$$



CONSOLIDACION (Asentamiento)



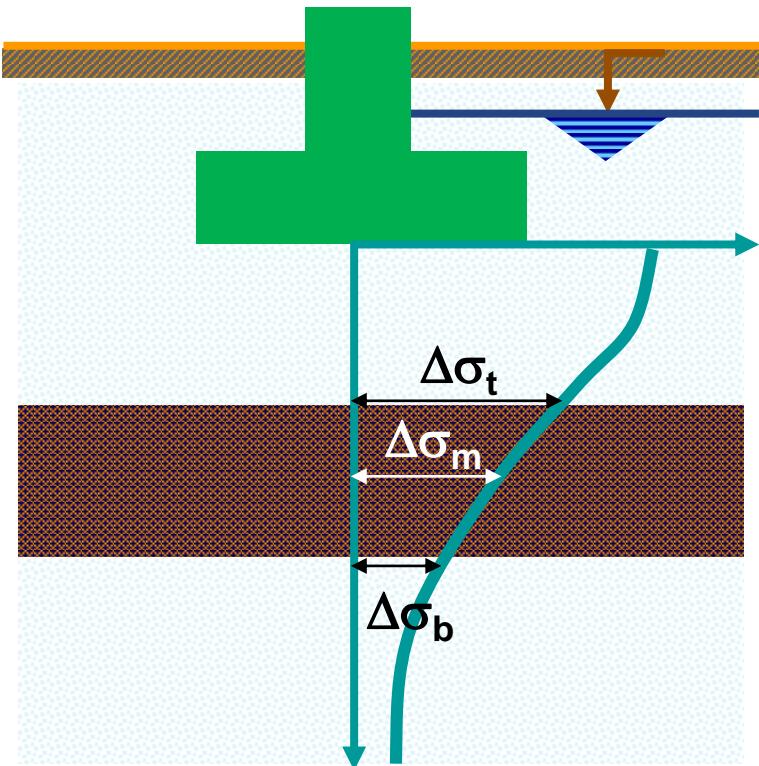
$$s_c = C_r \frac{H}{1+e_0} \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} + C_c \frac{H}{1+e_0} \log \frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma}{\sigma'_c}$$



CONSOLIDACION (Asentamiento)

Tensiones Medias Inducidas

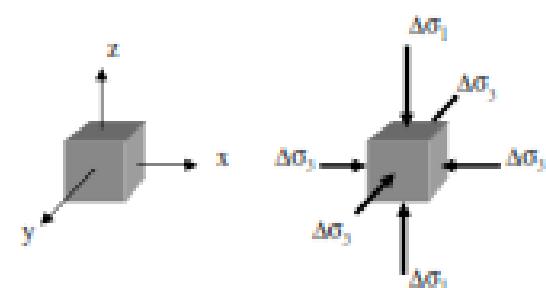
$$\Delta \sigma_{\text{Prom}} = \frac{1}{6} (\Delta \sigma_t + 4 \Delta \sigma_m + \Delta \sigma_b)$$





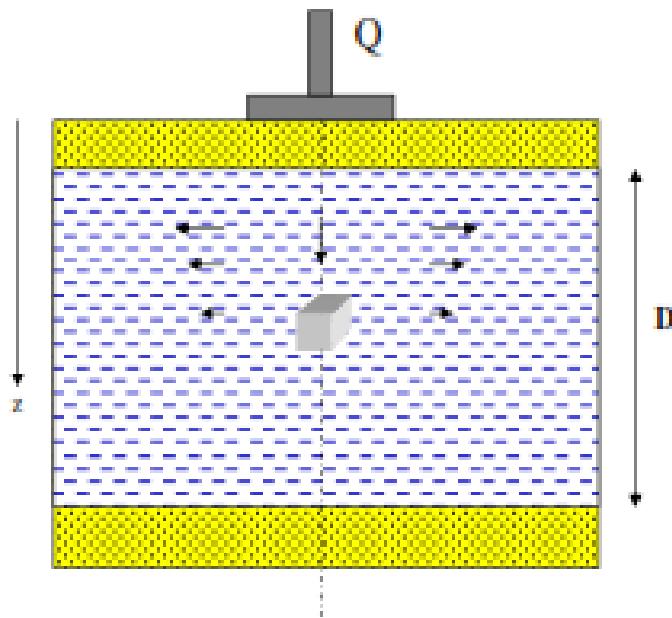
CORRECCION POR CARGA LOCALIZADA NO 1D

Corrección de Skempton – Bjerrum de los asentamientos por consolidación unidimensional



$$S_{c(ad)} = \int \frac{\Delta e}{(1 + e_s)} dz = \int m_v \cdot \Delta \sigma \cdot dz$$

$$\Delta u = \Delta \sigma_3 + A \cdot [\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3]$$



$$S_c = \int m_v \cdot \Delta u \cdot dz = \int m_v \cdot [\Delta \sigma_3 + A \cdot (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)] \cdot dz$$

$$K_{cor} = \frac{S_c}{S_{c(ad)}} = \frac{\int_0^D m_v \cdot \Delta u \cdot dz}{\int_0^D m_v \cdot \Delta \sigma_1 \cdot dz} = A + (1 - A) \cdot \frac{\int_0^D \Delta \sigma_3 \cdot dz}{\int_0^D \Delta \sigma_1 \cdot dz}$$

K_{cor} = coeficiente de corrección para una base circular

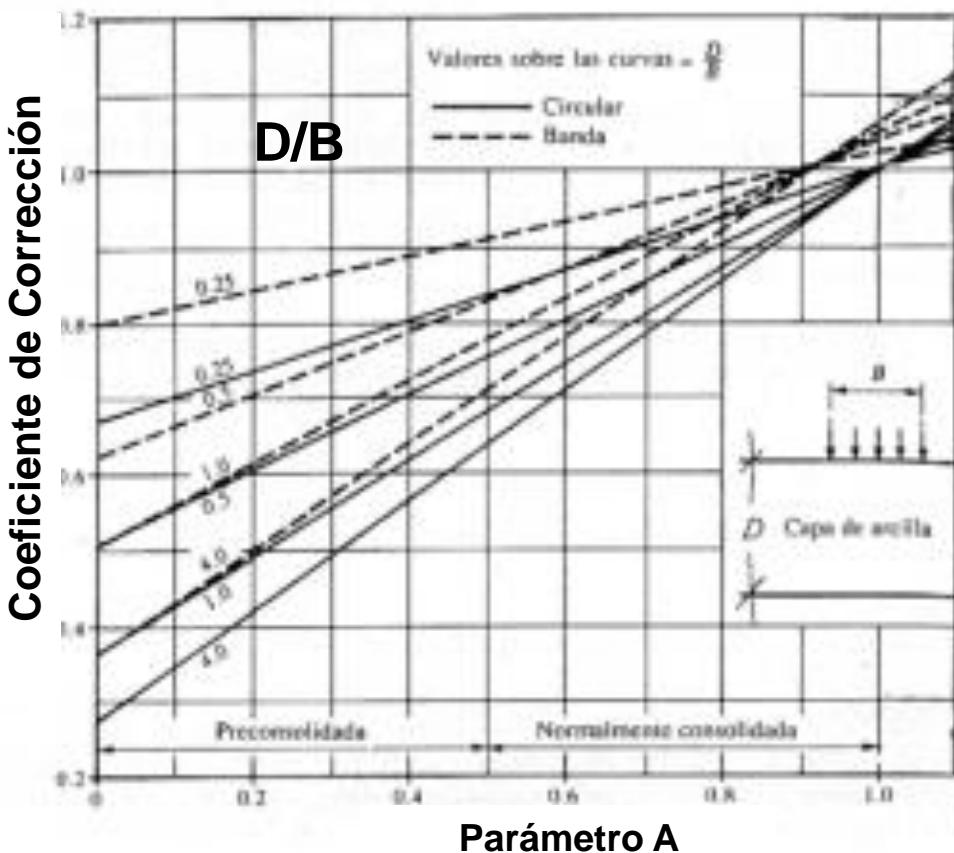


CORRECCION POR CARGA LOCALIZADA NO 1D

Procedimiento

- Calcular el asentamiento por consolidación unidimensional $S_{c(edo)}$
- Calcular el parámetro de presión intersticial "A"
- Determinar D/B
- Obtener el coeficiente de asentamiento del gráfico que se adjunta ingresando con el valor de "A" y encontrando a la recta correspondiente al tipo de fundación y a la relación D/B.
- Calcule el asentamiento corregido utilizando la ecuación:

$$S_c = S_{c(edo)} \cdot \text{Coef. de Asent.}$$



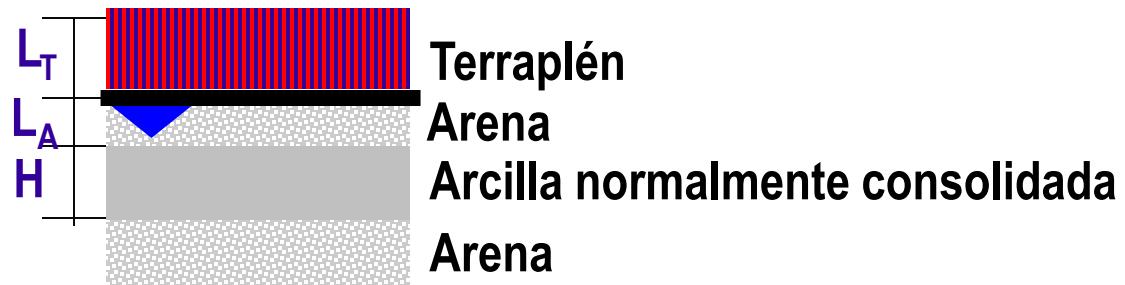
NOTA: "B" es el diámetro de una base circular o el ancho de una zapata continua.



CONSOLIDACION (Ejemplo)

Calcular el asentamiento de la arcilla normalmente consolidada debido a la construcción del terraplén.

Datos: $\gamma_T = 2,00 \text{ t/m}^3$; $L_T = 5,00 \text{ m}$; $L_A = 2,00 \text{ m}$; $\gamma_A = 1,90 \text{ t/m}^3$; $\gamma_e = 1,75 \text{ t/m}^3$; $H = 6,00 \text{ m}$; $C_c = 0,25$; $e_0 = 1,051$; $Cv = 0,0004 \text{ m}^2/\text{días}$.



$$\Delta\sigma = \gamma_T \cdot L_T = 2,00 \text{ t/m}^3 \cdot 5,00 \text{ m} = 10,0 \text{ t/m}^2$$

$$\sigma_0 = (\gamma_A \cdot L_A) + (\gamma_e \cdot H/2) = (1,90 \text{ t/m}^3 \cdot 2,00 \text{ m}) + (1,75 \text{ t/m}^3 \cdot 6,00/2 \text{ m}) = 14,3 \text{ t/m}^2$$

$$\sigma'_0 = \sigma_0 - u = \sigma_0 - \gamma_w \cdot (L_A + H/2) = 14,3 \text{ t/m}^2 - 5,0 \text{ t/m}^2 = 9,30 \text{ t/m}^2$$

$$\sigma_F' = \sigma'_0 + \Delta\sigma = 9,30 \text{ t/m}^2 + 10,0 \text{ t/m}^2 = 19,30 \text{ t/m}^2$$

$$\Delta e = C_c \cdot [\log(\sigma_F'/\sigma'_0)] = 0,25 \cdot \log(19,30/9,30) = 0,079$$

$$\Delta H = [\Delta e / (1 + e_0)] \cdot H = [0,079 / 2,051] \cdot 6,00 \text{ m} = 0,23 \text{ m} = 23,0 \text{ cm}$$



CONSOLIDACION (Ejemplo)

¿Cuántos días son necesarios para que se produzca un asentamiento de 10 cm?

$$U \% = \Delta H_x / \Delta H_T \cdot 100 = 10 \text{ cm} / 23 \text{ cm} = 43,0 \% \rightarrow T_{43} = 0,20$$

$$t_{10 \text{ cm}} = (T_{43} \cdot H^2) / Cv = (0,20 \cdot 3,0^2 \text{ m}^2) / 0,004 \text{ m}^2/\text{días} = 450 \text{ días}$$

Nota: en este caso H es la longitud de drenaje, o sea 3,00 metros, pues existen dos capas drenantes, una arriba y otra abajo.

¿Cuál será el asentamiento a los cuatro años?

$$T = (Cv \cdot t_{4 \text{ años}}) / H^2 = (0,004 \text{ m}^2/\text{días} \cdot 4 \cdot 365 \text{ días}) / 3,0^2 \text{ m}^2 = 0,65 \rightarrow U \% = 85\%$$

$$\Delta H_{4 \text{ años}} = U \% \cdot \Delta H_T = 85 \% \cdot 23 \text{ cm} = 19,50 \text{ cm}$$