

GEOLOGIA Y GEOTECNIA

2020

(4ta edición)

CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL

DE SUELOS

Dra.Ing. Silvia Angelone

CONSOLIDACIÓN DE SUELOS

Bibliografía:

Juárez Badillo Cap. X,

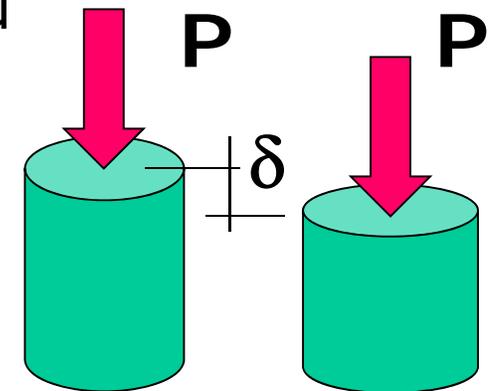
Berry y Reid Cap. 4

Apunte: Consolidación Unidimensional de Suelos. Poliotti,
Sierra, Garibay y Angelone

CONSOLIDACIÓN DE SUELOS

Bibliografía: Juárez Badillo Cap. X, Berry y Reid Cap. 4

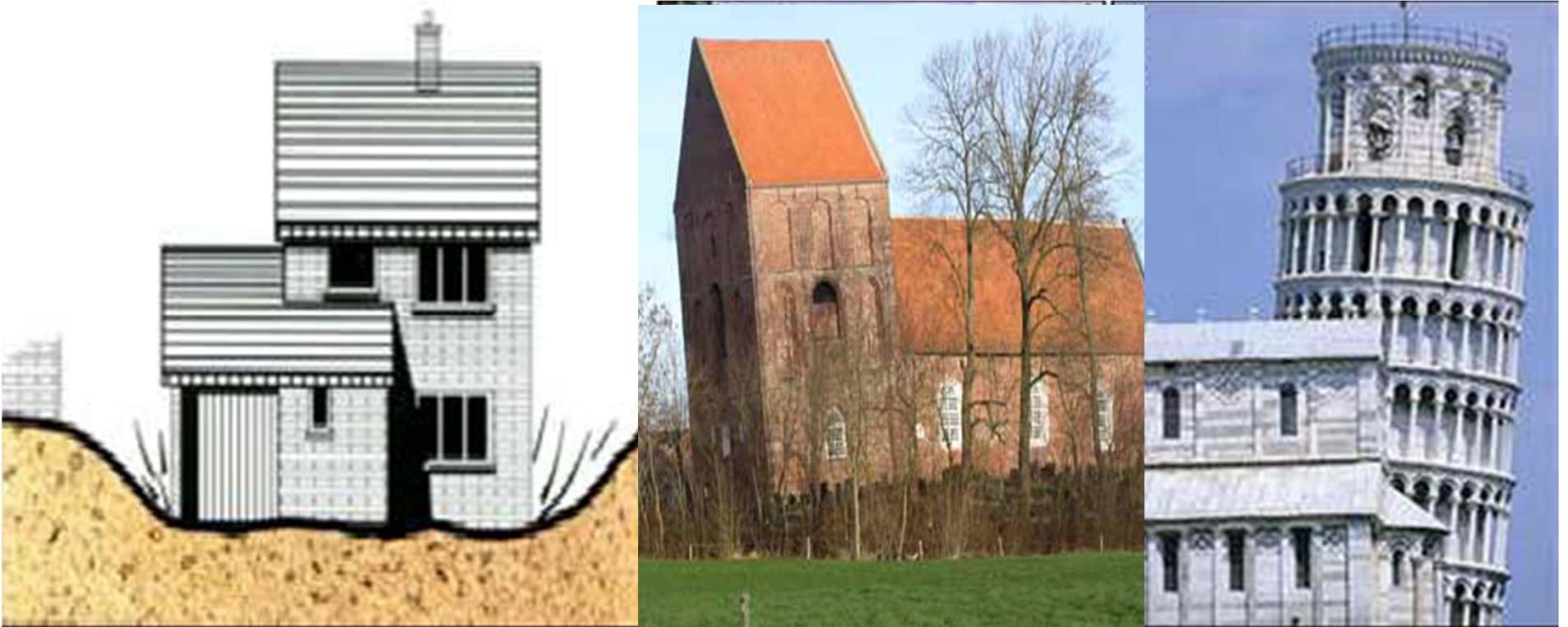
- Todos los materiales experimentan deformaciones cuando se los somete a un cambio de las condiciones de los esfuerzos (tensiones) aplicados.
- Las características tenso-deformación del acero o del hormigón pueden determinarse con un razonable grado de confianza.
- Las propiedades tenso-deformación de un suelo son de distinta característica y dependerán:
 1. del tipo de suelo y su condición in situ
 2. de la forma en que es cargado
 3. de su ubicación en la naturaleza
 4. etc.



El suelo, en general,

- Sufre **deformaciones superiores** a las que se dan en la estructura que transmite la carga
- Estas deformaciones no siempre se producen instantáneamente ante la aplicación de la carga, sino a lo **largo del tiempo**.

Forma esquemática de la consolidación y Casos Famosos

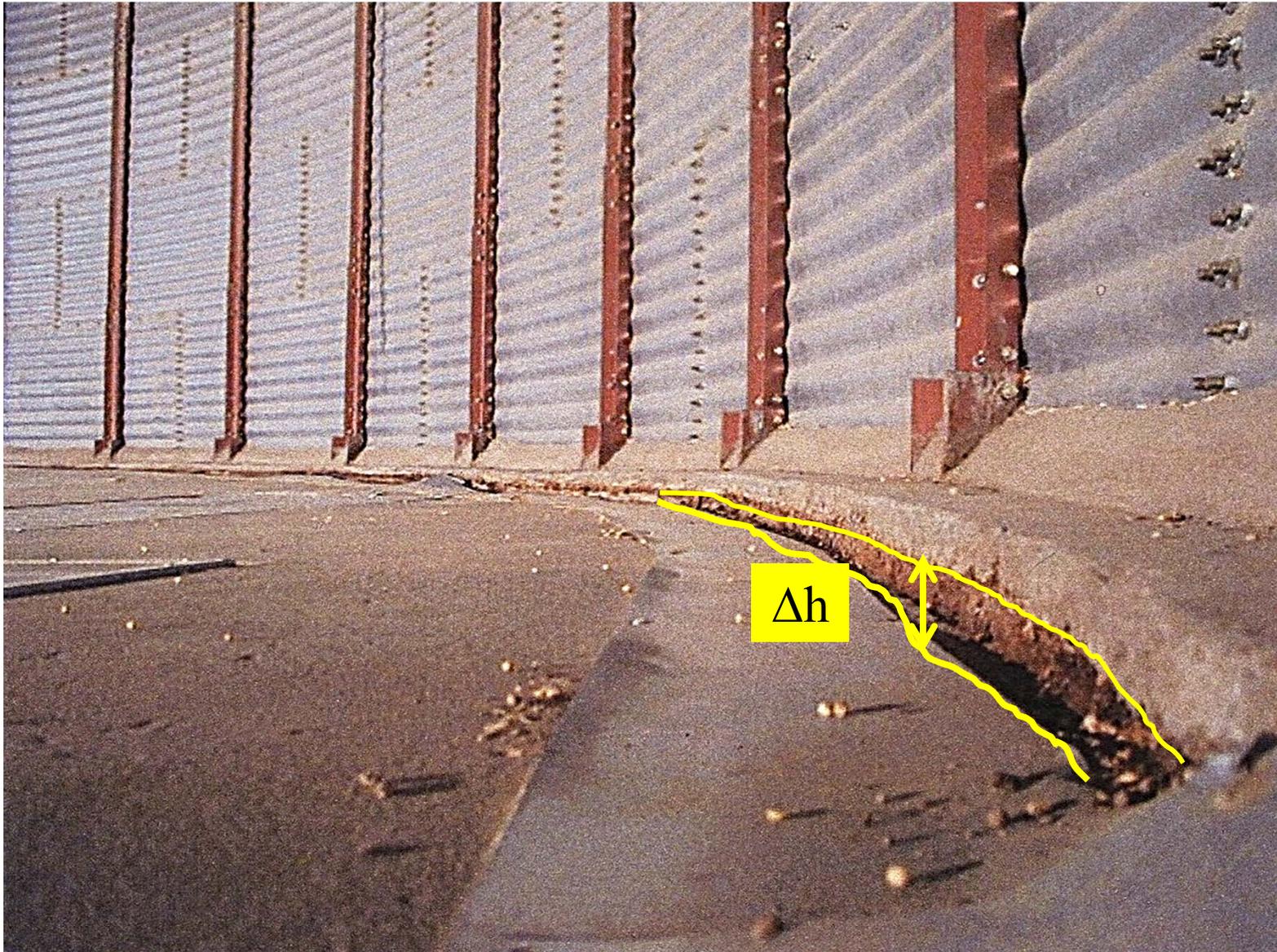


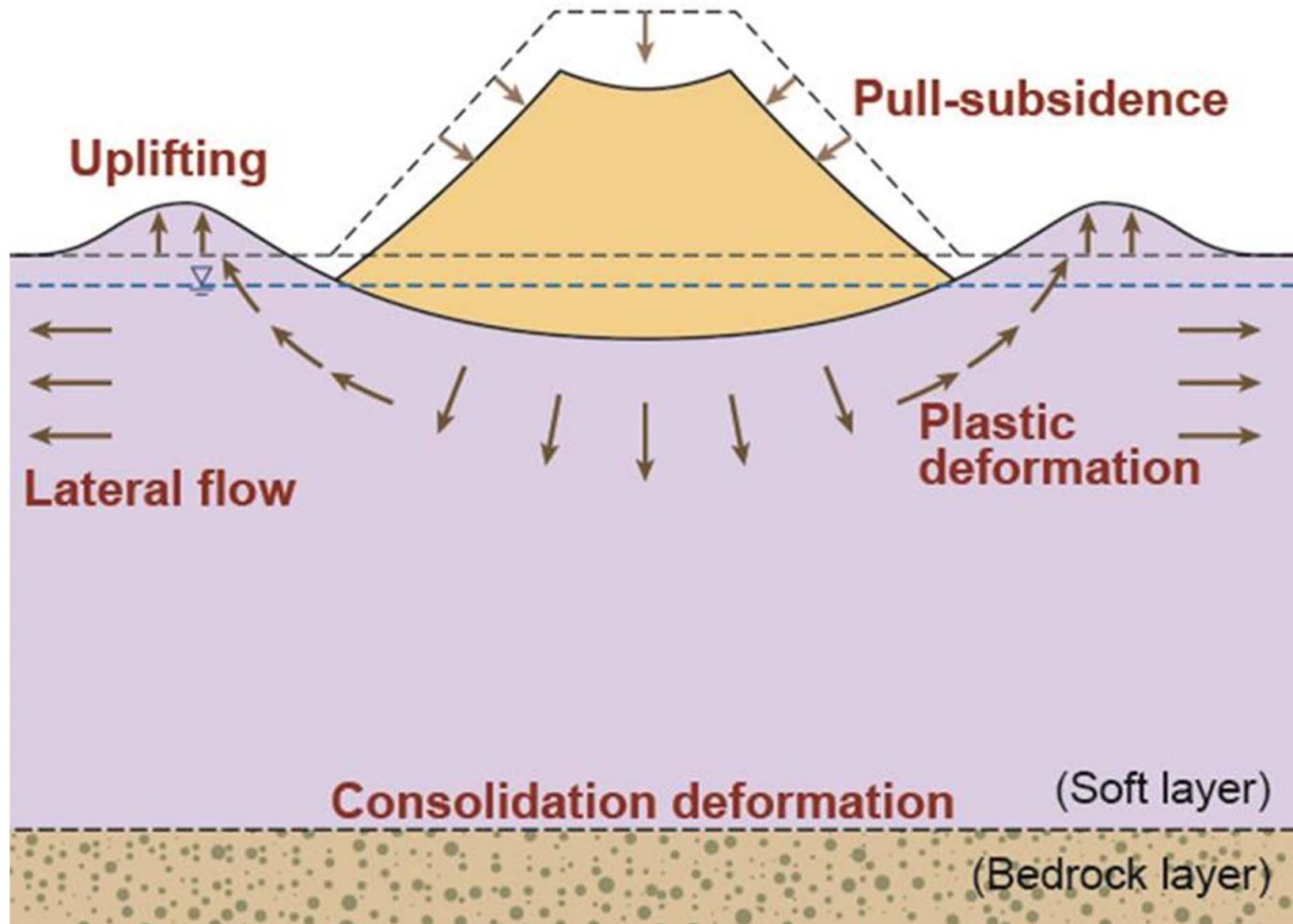
Esquema - Capilla de Suurhusen, Alemania - Torre de Pisa, Italia

¿Porqué se asentó?



¿Porqué se asentó?





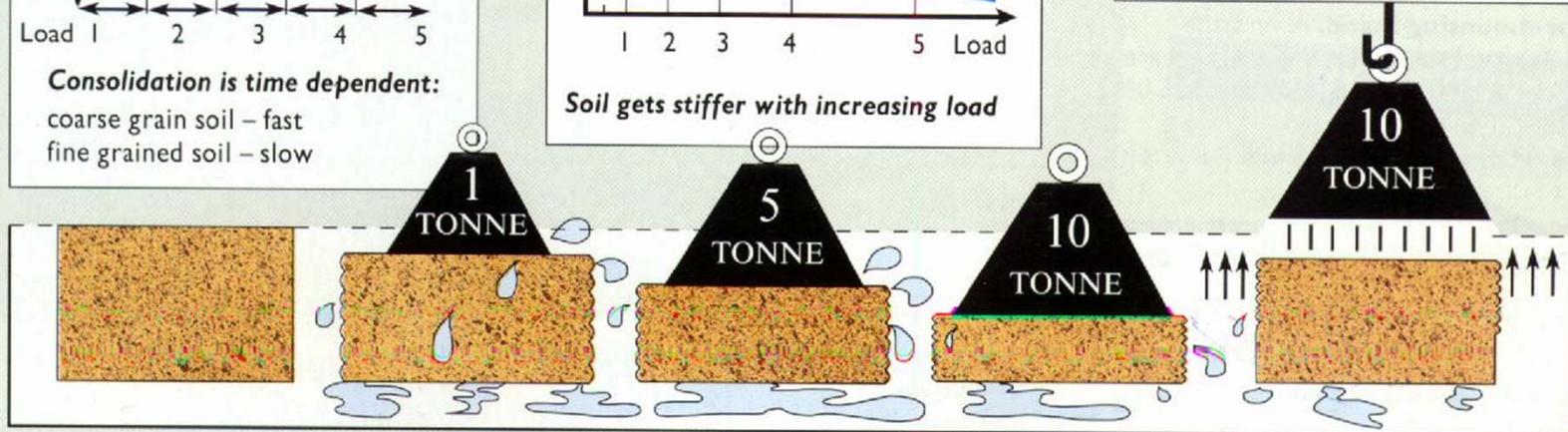
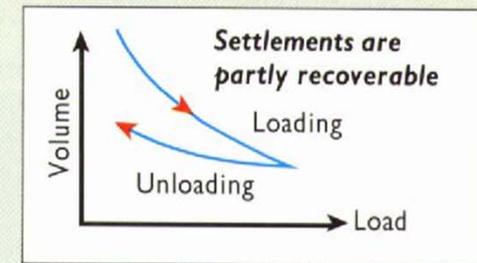
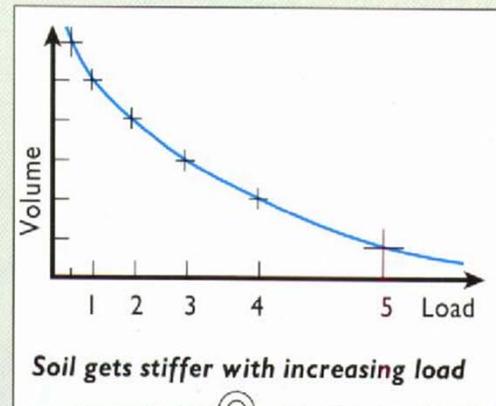
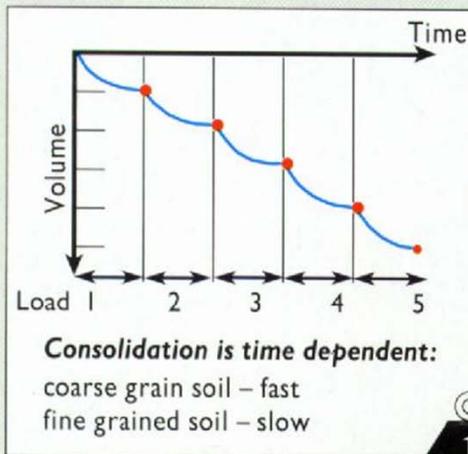
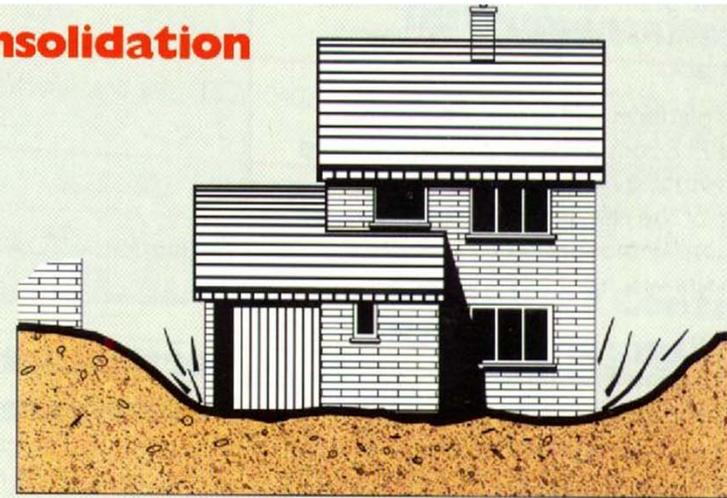
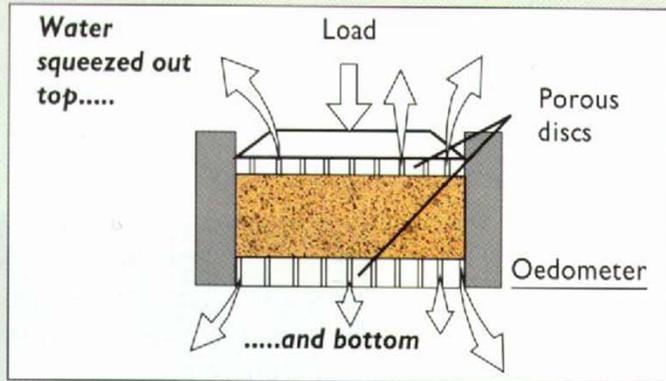


San Pablo - Brasil

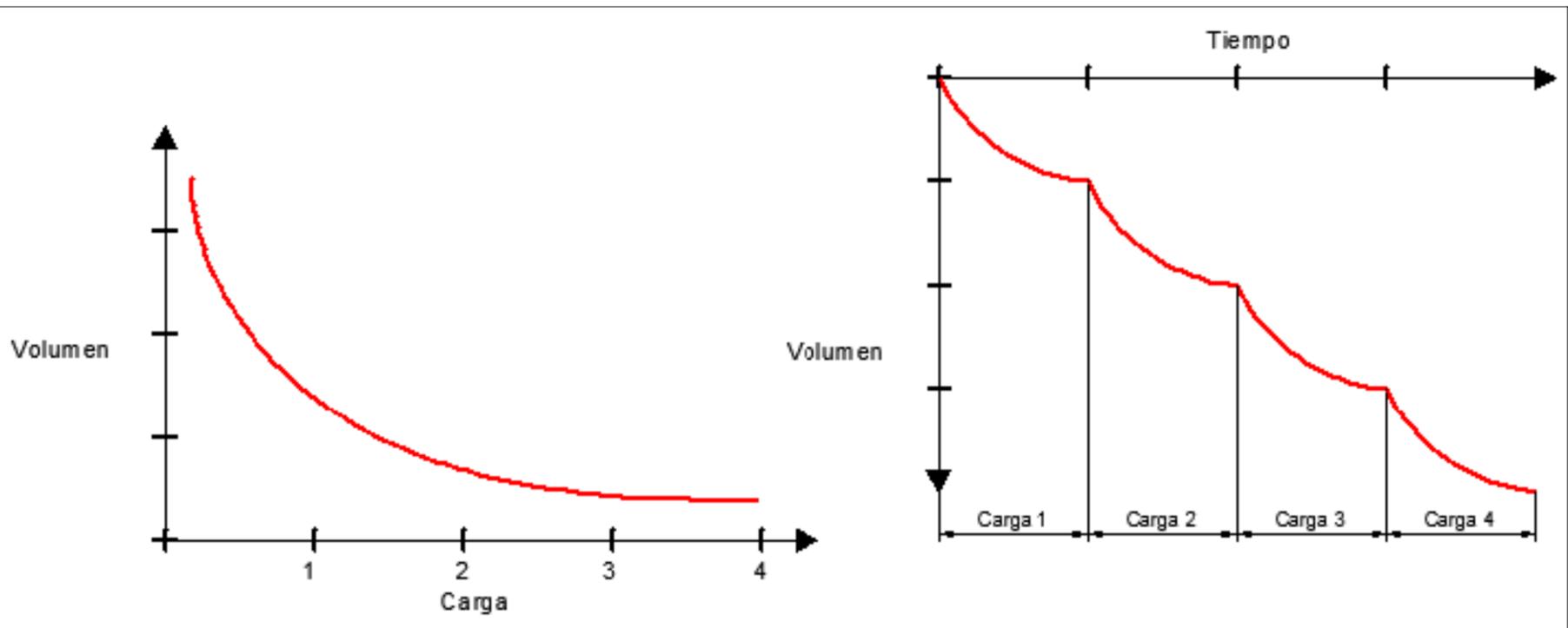


TEORIA DE LA CONSOLIDACION

The Theory of Consolidation



TEORIA DE LA CONSOLIDACION



TEORIA DE LA CONSOLIDACION

Cuando un depósito de suelo se somete a un incremento de *esfuerzos totales*, como resultado de cargas externas aplicadas, se produce un *exceso de presión intersticial*.

La presión neutra se disipa mediante un flujo de agua al exterior, cuya velocidad de drenaje depende de la permeabilidad del suelo.

TEORIA DE LA CONSOLIDACION

Esta disipación de presión intersticial debida al flujo de agua hacia el exterior se denomina CONSOLIDACION, proceso que tiene dos consecuencias:

Reducción del Volumen de poros
Asentamientos

El aumento de la presión efectiva, y por lo tanto un incremento en la resistencia del suelo.

Por lo tanto:

Cuando un suelo se consolida ante una carga externa se produce una disminución de la relación de vacíos y un incremento del esfuerzo efectivo.

TEORIA DE LA CONSOLIDACION

Suelos granulares

- ⇒ la permeabilidad es alta
- ⇒ se disipa rápidamente las presiones neutras
- ⇒ el asentamiento se termina durante la construcción.

Suelos finos arcillosos

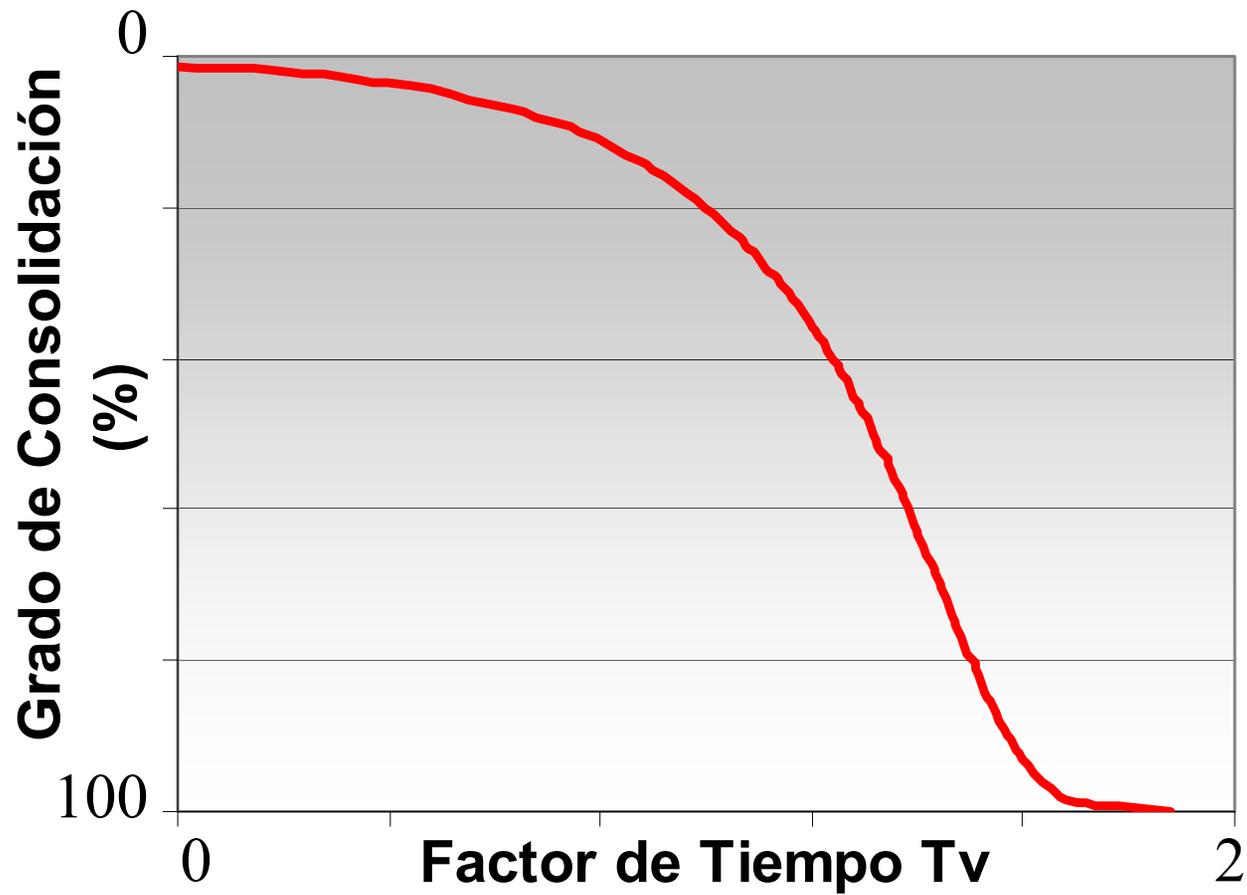
- ⇒ la permeabilidad es muy baja
- ⇒ se disipa muy lentamente las presiones neutras
- ⇒ el asentamientos puede producirse varios años después de finalizada la construcción

PROCESO DE CONSOLIDACION

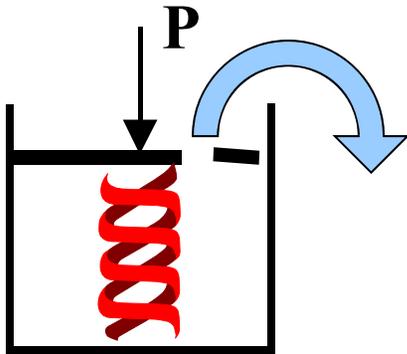
El **proceso de consolidación** se aplica a todos los suelos, pero es más importante en aquellos donde la permeabilidad es baja. Es necesario predecir:

- ✓ *El asentamiento total de la estructura*
- ✓ *El tiempo o velocidad a la cual se produce dicho asentamiento*

GRADO DE CONSOLIDACIÓN VS TIEMPO



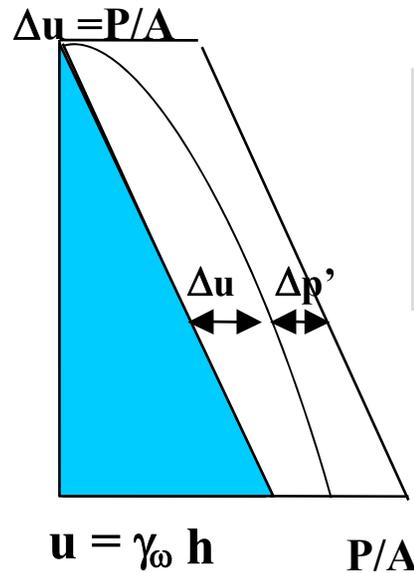
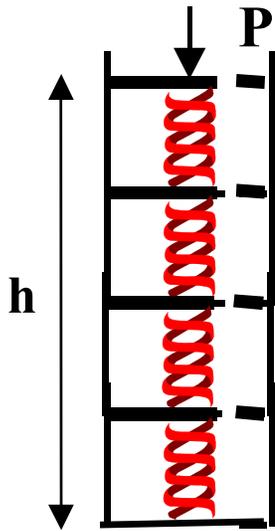
ANALOGÍA MECÁNICA DE TERZAGHI



- **Cilindro de sección A**
- **Pistón sin fricción con una perforación**
- **Fluido incompresible**
- **Resorte**

1. Se aplica P con el orificio cerrado \Rightarrow el resorte no se puede deformar \Rightarrow la carga P la soporta el fluido
2. Se abre el orificio \Rightarrow hay un gradiente de presión P/A que hace que el agua salga al exterior \Rightarrow la carga se transfiere al resorte
3. La velocidad de transferencia de la carga depende del tamaño del orificio y de la viscosidad del fluido.
4. La posición final \Rightarrow la carga la toma el resorte

ANALOGÍA MECÁNICA DE TERZAGHI



Δu : presión en exceso de la hidrostática

p' : presión en el resorte

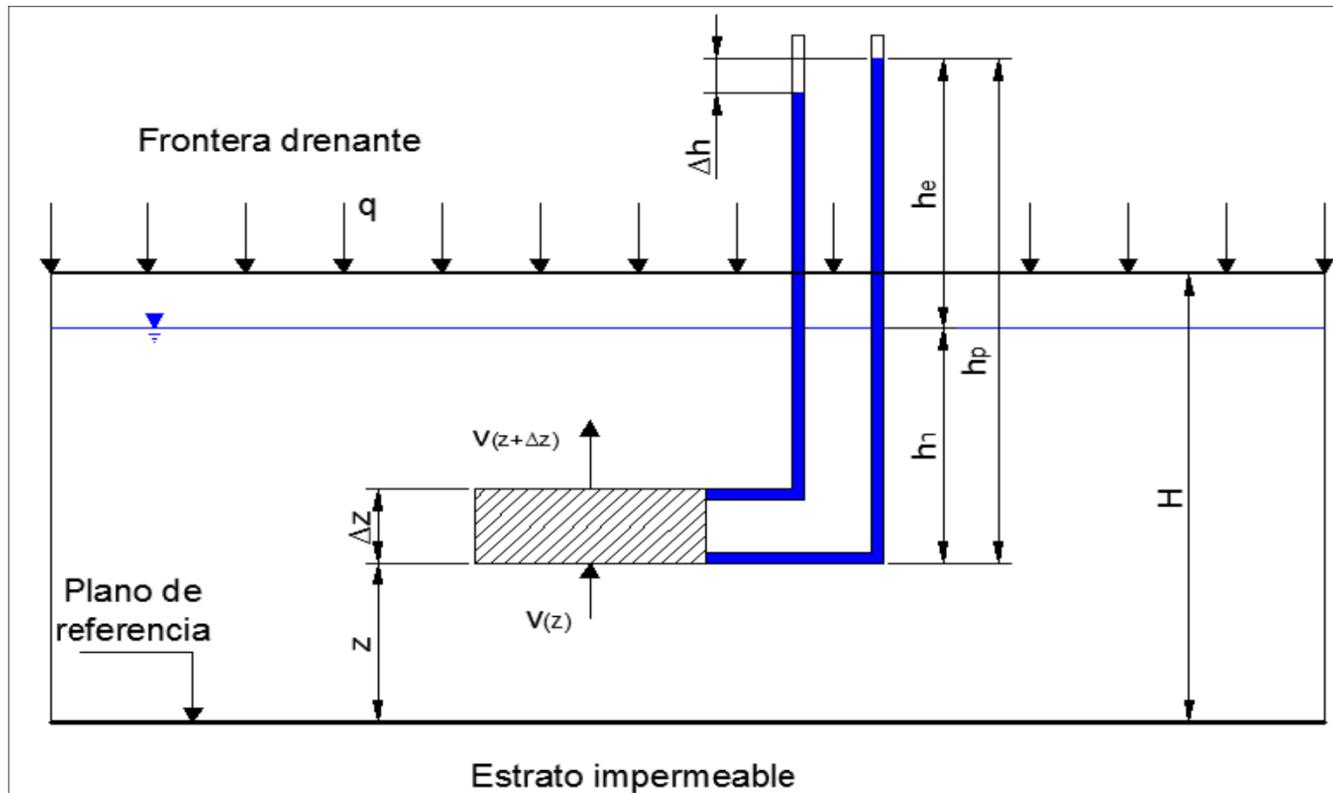
En el suelo:

Estructura de partículas sólidas \Rightarrow Resorte

Agua intersticial \Rightarrow Fluído incompresible

Capilares continuos (vacíos) \Rightarrow Orificios

CONSOLIDACION VERTICAL DE UNA CAPA DE SUELO



HIPOTESIS

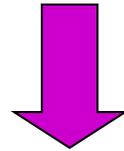
- Suelo homogéneo
- Suelo saturado
- Las partículas del suelo y el agua son incompresibles
- Compresión unidimensional
- Drenaje de agua vertical
- Vale la ley de Darcy
- K_v constante



TEOREMA DE TAYLOR

$$v_Z + \Delta_Z = v_Z + \frac{\partial v_Z}{\partial z} \Delta z + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 v_Z}{\partial z^2} \Delta z^2 + \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 v_Z}{\partial z^3} \Delta z^3 + \dots$$

v= velocidad



Sacando los de 2do orden y más

$$v_{Z+\Delta z} = v_Z + \frac{\partial v_Z}{\partial z} \Delta z$$

Principio de continuidad

Cantidad de flujo
que sale del
elemento por
unidad de tiempo

-

Cantidad de flujo
que entra en el
elemento por
unidad de tiempo

=

Velocidad de
cambio de
volumen del
elemento

Caudal = velocidad x Area

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

$$\Delta z \cdot A \cdot \frac{\partial v_z}{\partial z} = - \frac{\partial V}{\partial t}$$

A = área plana del
elemento

V = Volumen = $\Delta z \cdot A$

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

Velocidad Cambio de Volumen = Cambio de Vol. de Vacíos

(partículas y agua incompresibles)

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

Si $e = V_v / V_s$, $V_s = cte$, Por lo tanto, $V_v = V_s \cdot e$, $V = V_s \cdot (1+e)$

$$V \frac{\partial v_z}{\partial z} = -V_s \frac{\partial e}{\partial t} \quad \longrightarrow \quad \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t}$$

Si por la ley de Darcy $v = k i$, $i = h/z \longrightarrow v_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z}$

Siendo

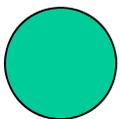
$h = z + h_h + h_e$, es el nivel piezométrico

z : es la posición

h_h : es la carga hidráulica

h_e : es el exceso de presión neutra

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



Si $h_h + z = \text{cte}$ \longrightarrow $\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 h_e}{\partial z^2}$

Si el exceso de presión intersticial

$u_e = h_e \gamma_w$

\longrightarrow $\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2}$

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

$$\frac{k_z (1+e)}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial e}{\partial t}$$

2 incógnitas

u_e y e

Relación entre

u_e y e

Terzaghi supone:

- Comportamiento $\sigma'_v - \varepsilon$ lineal
- Cambio de la deformación proporcional a “e”

⇒ Existe una relación entre $e - \sigma'_v$

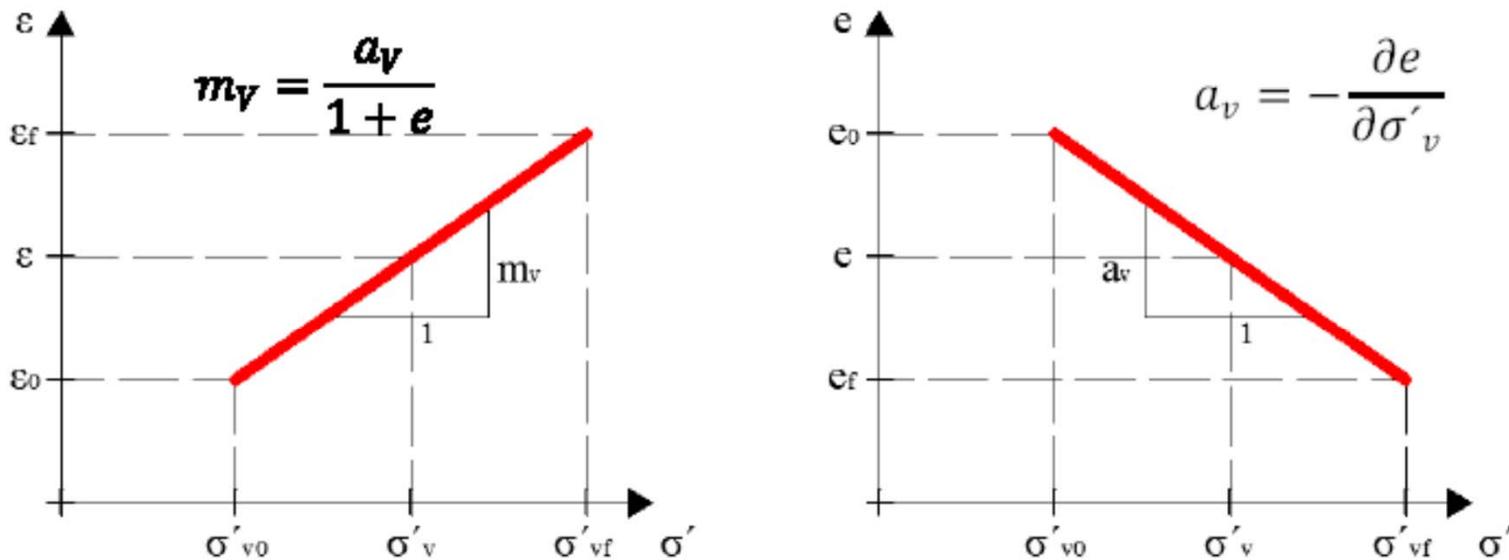


Figura 8 Relaciones ε vs. σ'_v y e vs. σ'_v

m_v : coeficiente de compresibilidad volumétrica

a_v : coeficiente de compresibilidad

$$\sigma_v = \sigma'_v + u$$

$$u = u_h + u_e$$

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

Derivando respecto a t

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



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

Y además,

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



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

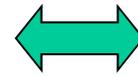
$$\frac{\partial e}{\partial t} = a_v \frac{\partial u_e}{\partial t}$$

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

Ecuación diferencial del

Comportamiento de la consolidación unidimensional

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

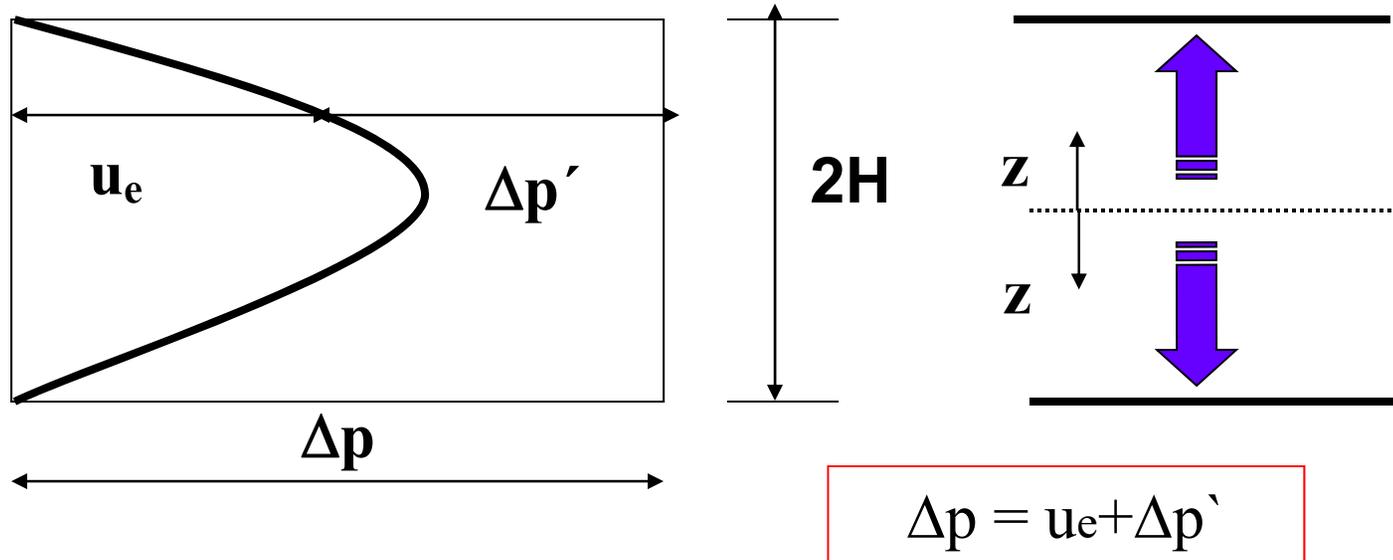


$$c_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t}$$

$$c_v = \frac{k_v(1+e)}{\gamma_w \cdot a_v}$$

coeficiente de consolidación vertical

SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DE COMPORTAMIENTO



Condiciones de borde:

Condición inicial $t = 0 \Rightarrow u_e = u_{oe} = \Delta p$ para $0 \leq z \leq H$

Condición de frontera $\frac{\partial u_e}{\partial z} = 0$ en $z = 0$ $u_e = 0$ en $z = H$

Condición final $t = \infty \Rightarrow u_e = 0$ para $0 \leq z \leq H$

$$\frac{u_e}{u_{oe}} = \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M} \operatorname{sen} \left[M \left(1 - \frac{z}{H} \right) \right] \exp(-M^2 T_V)$$

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

$$T_V = \frac{C_V t}{H^2}$$

factor de tiempo vertical

H es el recorrido del agua

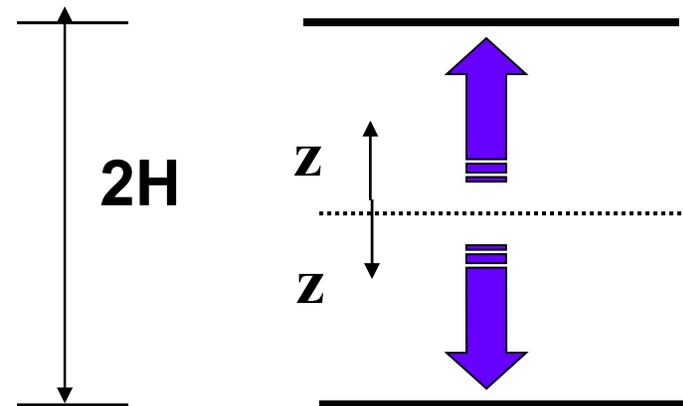
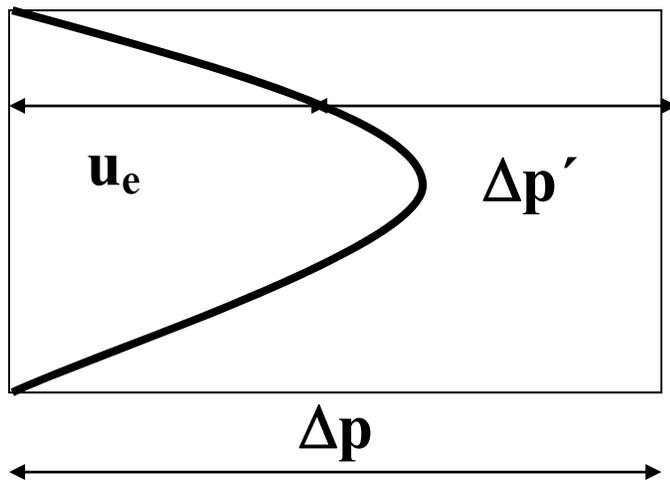
GRADO DE CONSOLIDACION VERTICAL

$$U_V = \frac{e_0 - e}{e_0 - e_f}$$

$$U_V = \frac{\Delta p - u_e}{\Delta p} = 1 - \frac{u_e}{u_{oe}}$$

$$U_V = \frac{\Delta p'}{\Delta p}$$

$$U_V = \frac{s}{s_\infty}$$



$$\Delta p = u_e + \Delta p'$$

Por lo tanto el ***grado de consolidación o porcentaje de consolidación*** del suelo para una profundidad ***z*** para un tiempo ***t*** se define como la relación entre la consolidación que ya se ha producido en ese lugar y la consolidación total que ha de producirse bajo el incremento de carga impuesto

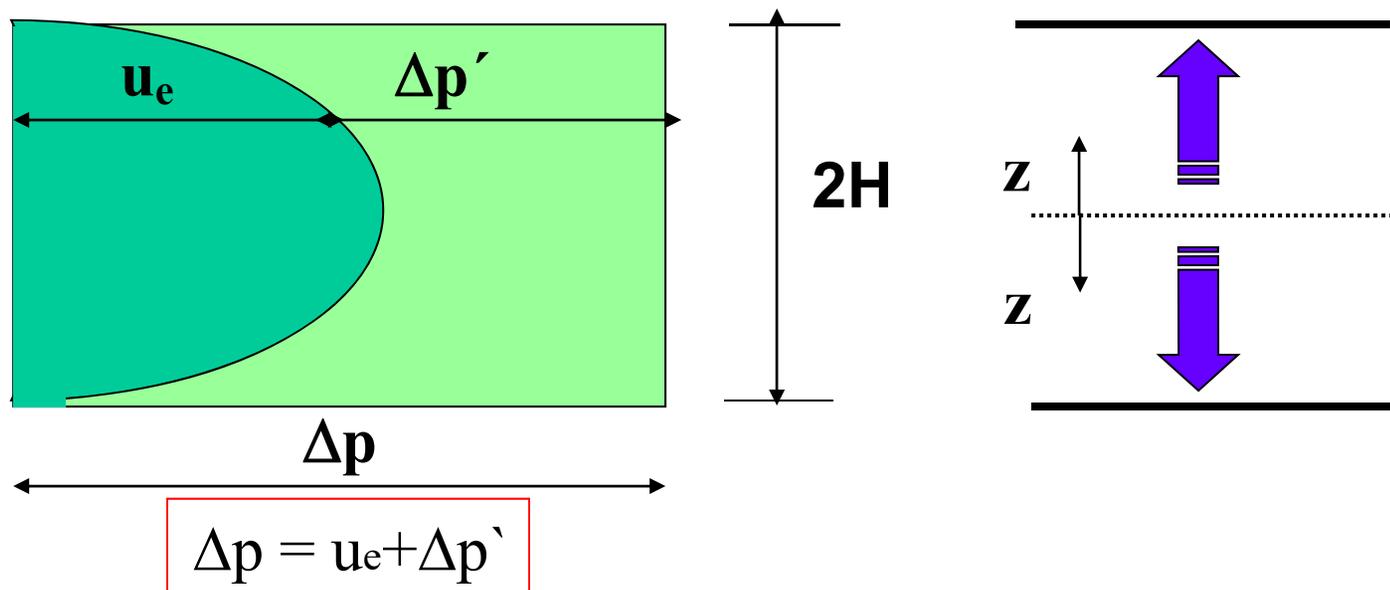
GRADO PROMEDIO DE CONSOLIDACION

Del estrato es :
$$\bar{U}_V = 1 - \frac{1}{H} \int_0^H \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M} \operatorname{sen} \left[M \left(1 - \frac{z}{H} \right) \right] \exp(-M^2 T_V)$$

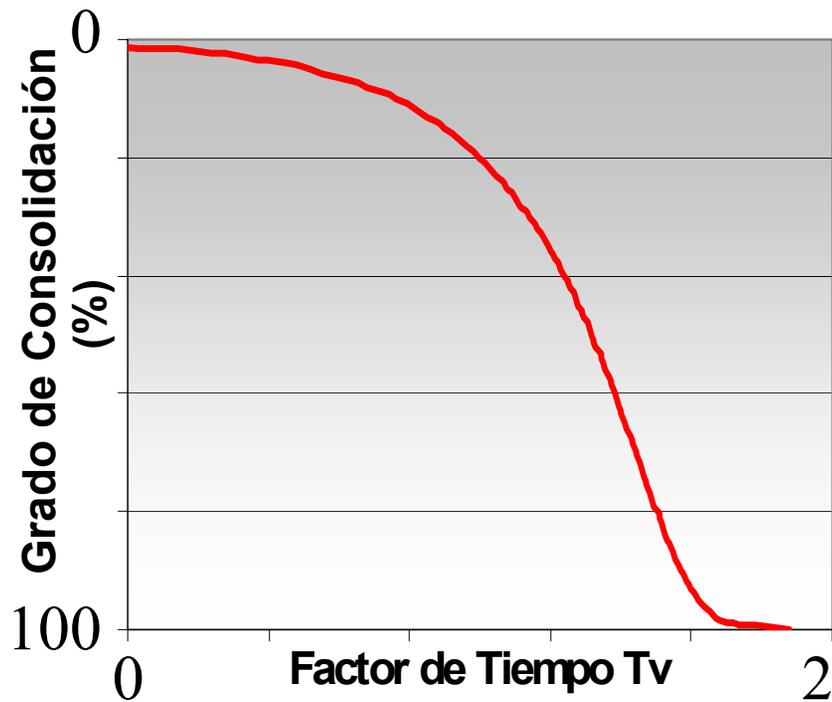
$$U_V = 1 - \frac{u_e}{u_{oe}}$$

$$\bar{U}_V = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} \exp(-M^2 T_V)$$

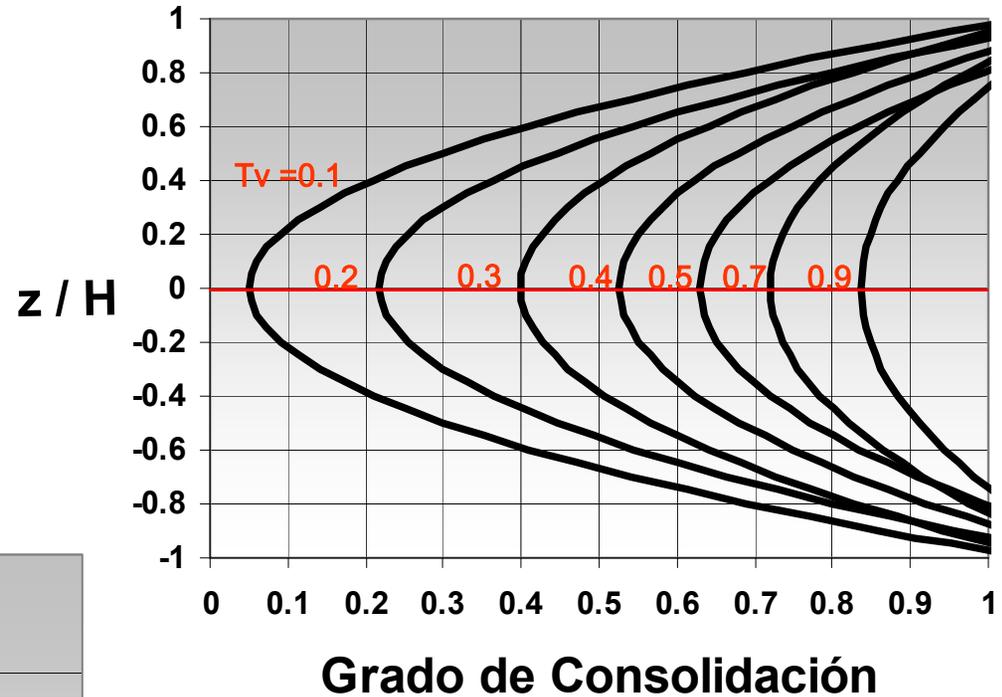
y refleja el **asentamiento** en la superficie de la capa



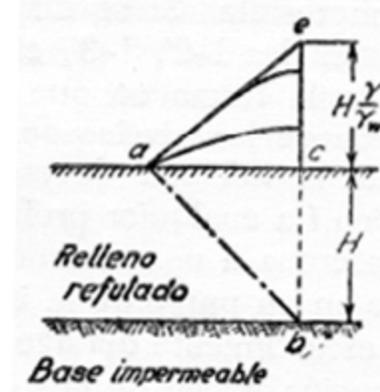
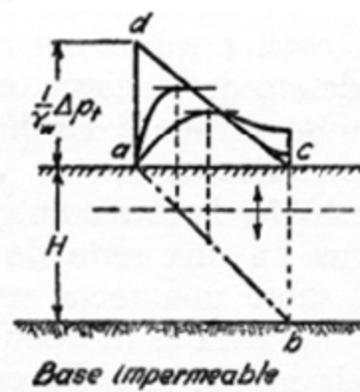
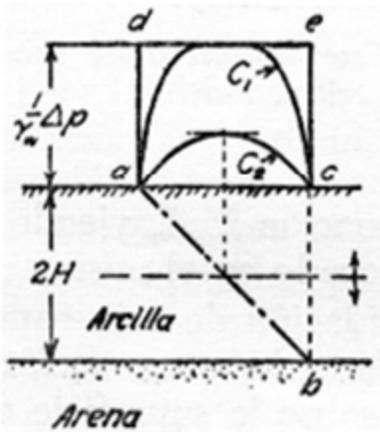
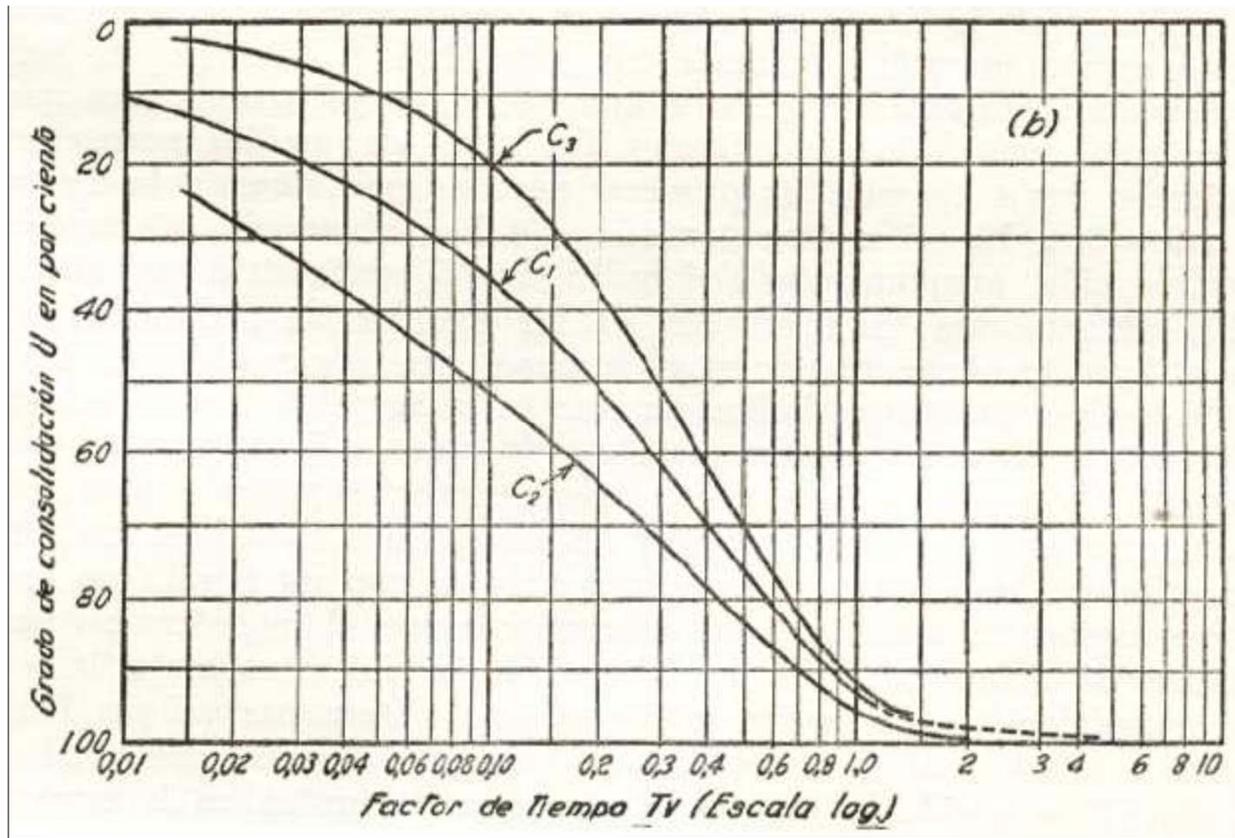
Para valores dados de T_v
se puede valorar U_v promedio



ISOCRONAS

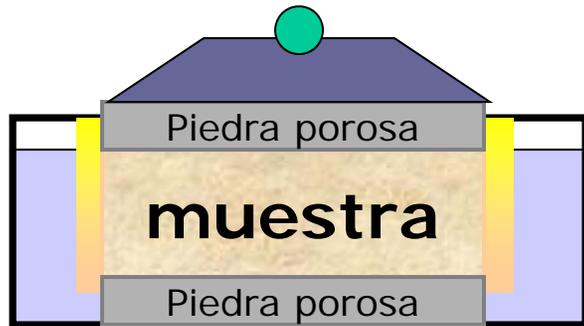


**GRADO DE
CONSOLIDACION
PROMEDIO**

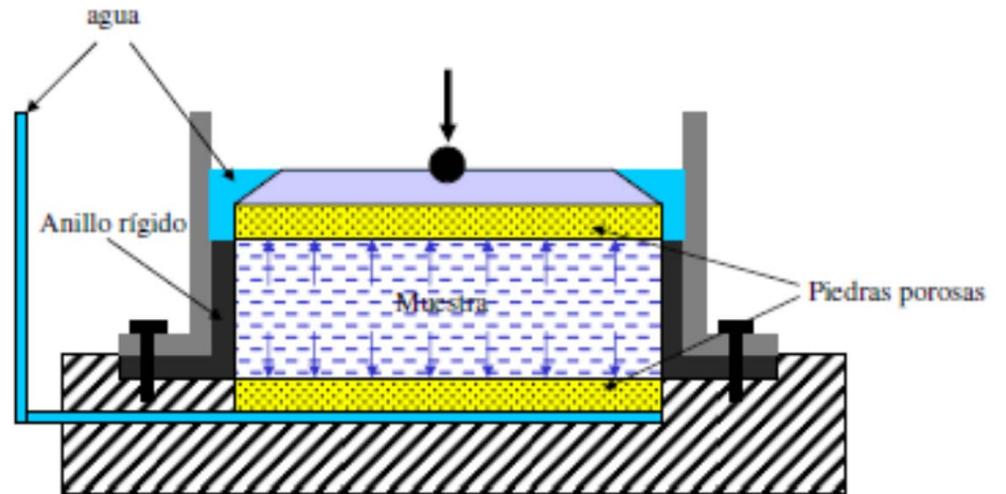


Condiciones de drenaje y de carga para las curvas C_1 , C_2 y C_3

ENSAYO DE CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL

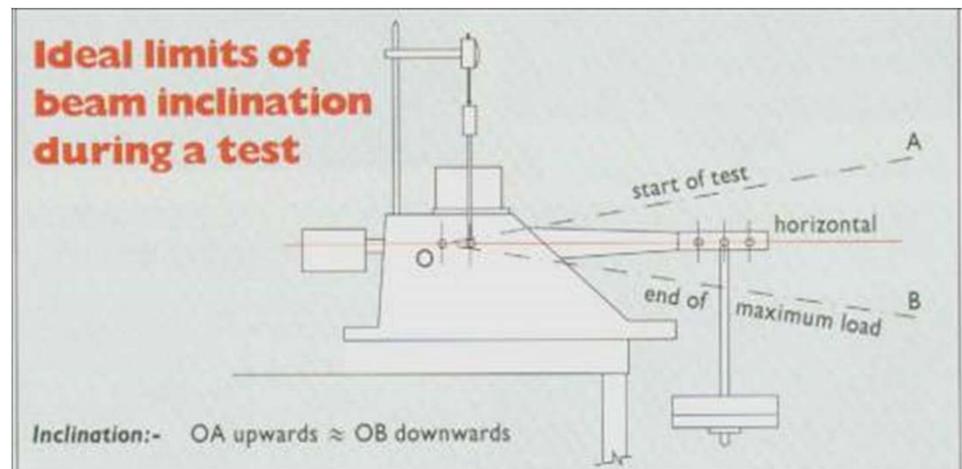
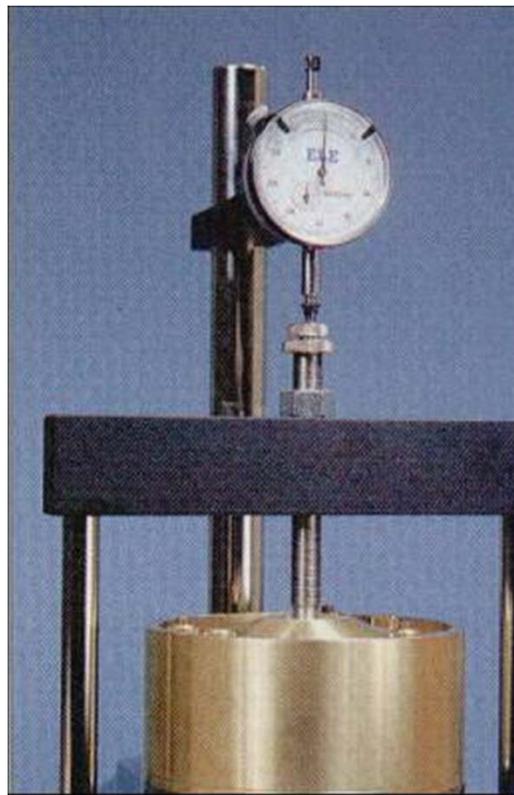
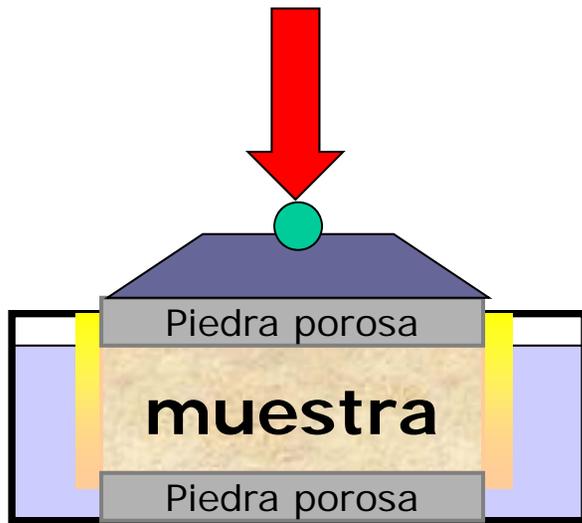


Anillo flotante



Anillo fijo









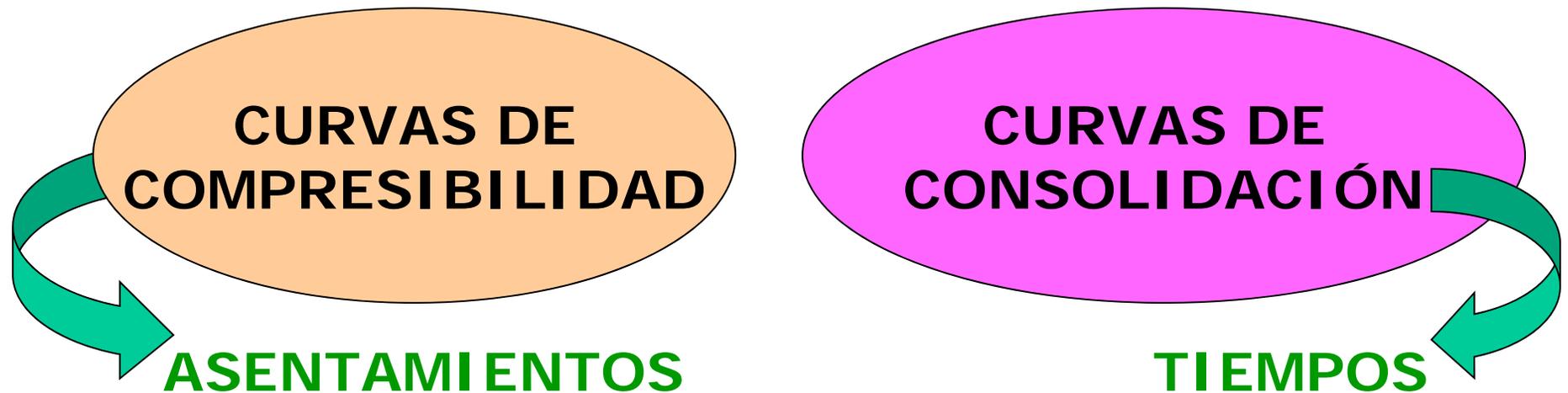
ENSAYO

Aplicación de distintos escalones de carga

(2.5, 5, 10, 20, 40, 80, 160, 320, 80, 20 y 2.5 N/ cm²)

En cada uno de los escalones de carga, se mide la deformación para distintos intervalos de tiempo

(0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, etc minutos)



CURVAS DE CONSOLIDACION

➔ **TAYLOR** Def. vs \sqrt{t}

➔ **CASAGRANDE** Def. vs Log t

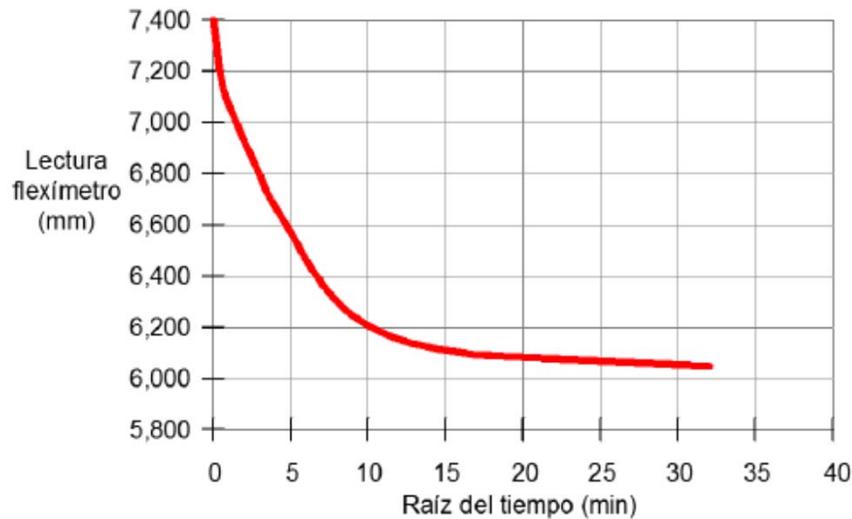


Figura 18 Curva deformación - \sqrt{t}

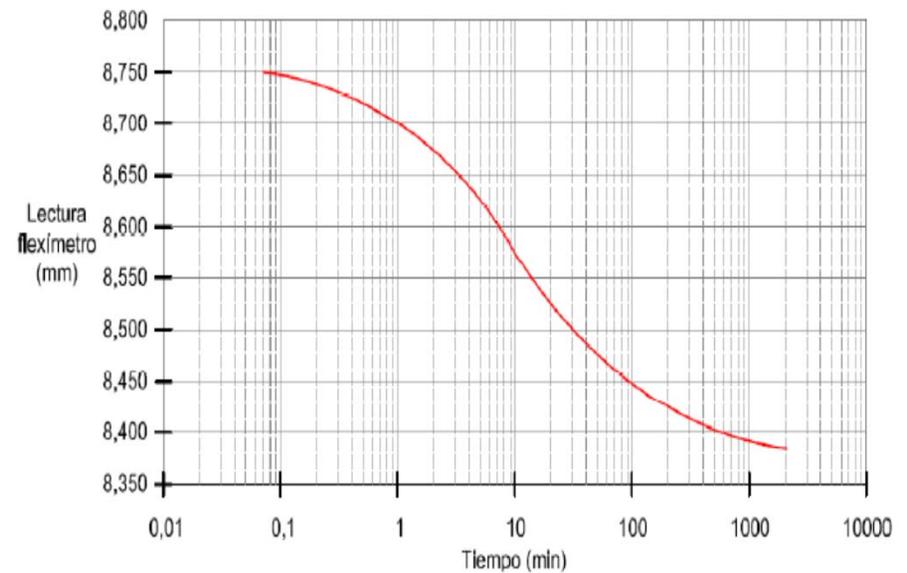


Figura 14 Curva teórica de consolidación

CURVA DE COMPRESIBILIDAD

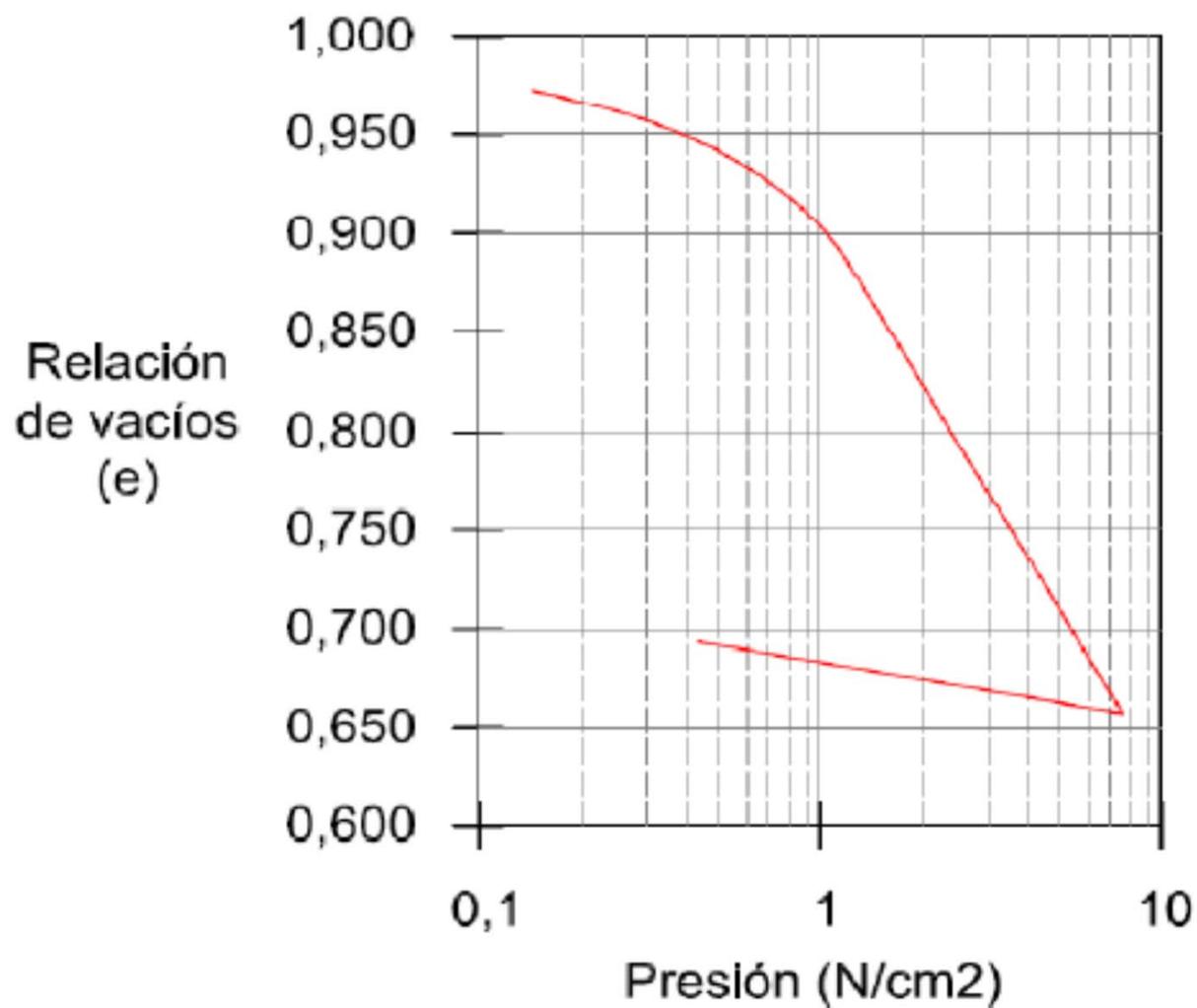


Figura 22 Curva de compresibilidad