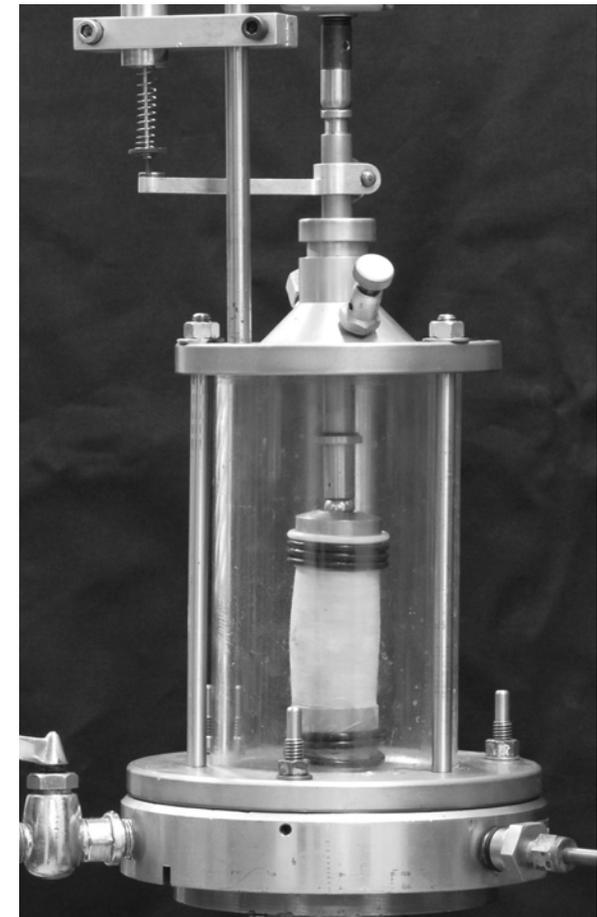


Clase de laboratorio 05: Ensayos triaxiales



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



Índice



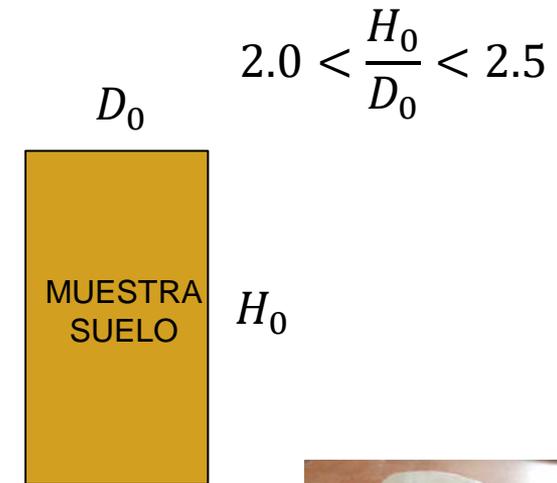
- Introducción: el ensayo triaxial.
- Montaje de muestra.
- Mediciones y equipamiento.
- Etapas de un ensayo triaxial.
- Algunos resultados.

Introducción: el ensayo triaxial



Este ensayo sirve para reproducir en el laboratorio el cambio de estado tensional del terreno.

(y medir parámetros: c' , ϕ , s_u , E)



Estado tensional genérico

Estado tensional hidrostático

Estado tensional desviador

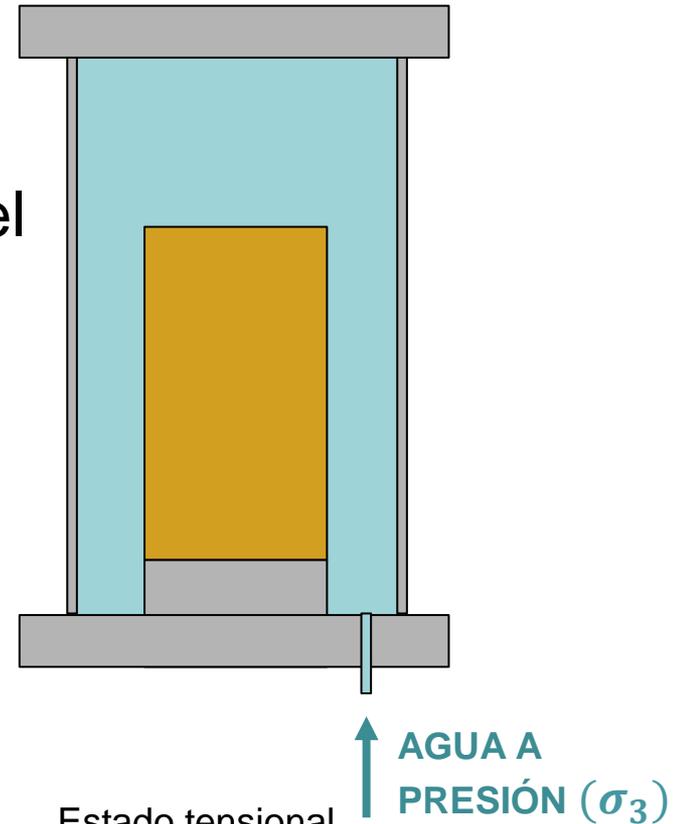
$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_h & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_h & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_1 - \sigma_h & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 - \sigma_h & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 - \sigma_h \end{bmatrix}$$



Introducción: el ensayo triaxial

Este ensayo sirve para reproducir en el laboratorio el cambio de estado tensional del terreno.

(y medir parámetros: c' , ϕ , s_u , E)



FÁCIL DE
APLICAR CON
AGUA A PRESIÓN

Estado tensional genérico

Estado tensional hidrostático

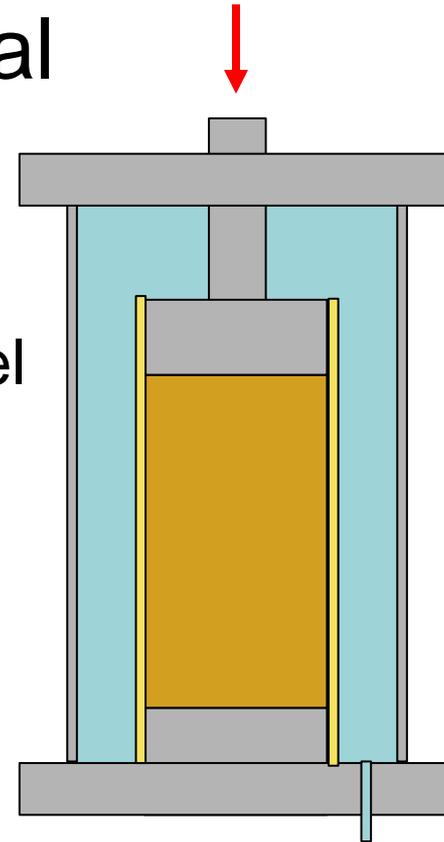
Estado tensional desviador

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_h & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_h & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_1 - \sigma_h & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 - \sigma_h & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 - \sigma_h \end{bmatrix}$$



Introducción: el ensayo triaxial

**CARGA EN EL
PISTÓN (σ_d)**



Este ensayo sirve para reproducir en el laboratorio el cambio de estado tensional del terreno.

(y medir parámetros: c' , ϕ , s_u , E)

**PODEMOS APLICAR UNA
TENSIÓN EN UNA SOLA
DIRECCIÓN CON UN PISTÓN**

Estado tensional genérico

Estado tensional hidrostático

Estado tensional desviador

**AGUA A
PRESIÓN (σ_3)**

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_h & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_h & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_h & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_1 - \sigma_h = \sigma_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



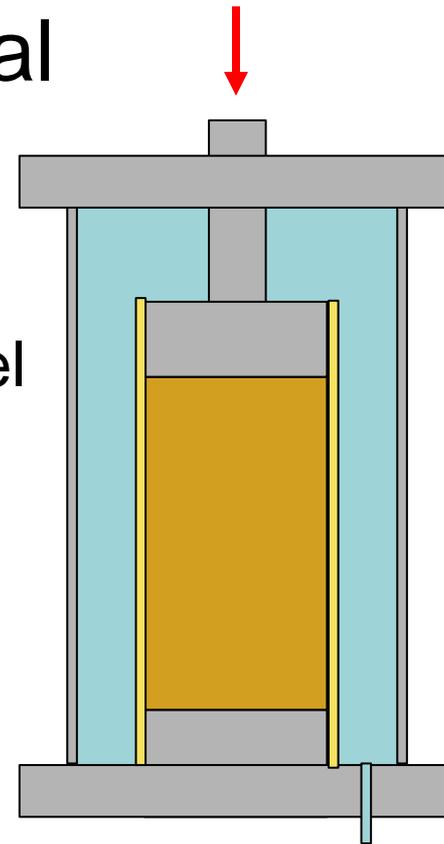
Introducción: el ensayo triaxial

Este ensayo sirve para reproducir en el laboratorio el cambio de estado tensional del terreno.

(y medir parámetros: c' , ϕ , s_u , E)

El estado tensional aplicado es en realidad un estado axial-simétrico.

CARGA EN EL PISTÓN (σ_d)



AGUA A PRESIÓN (σ_3)

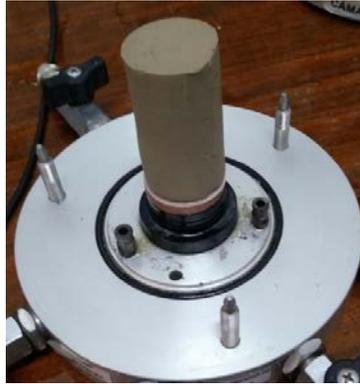
Estado tensional genérico

Estado tensional hidrostático

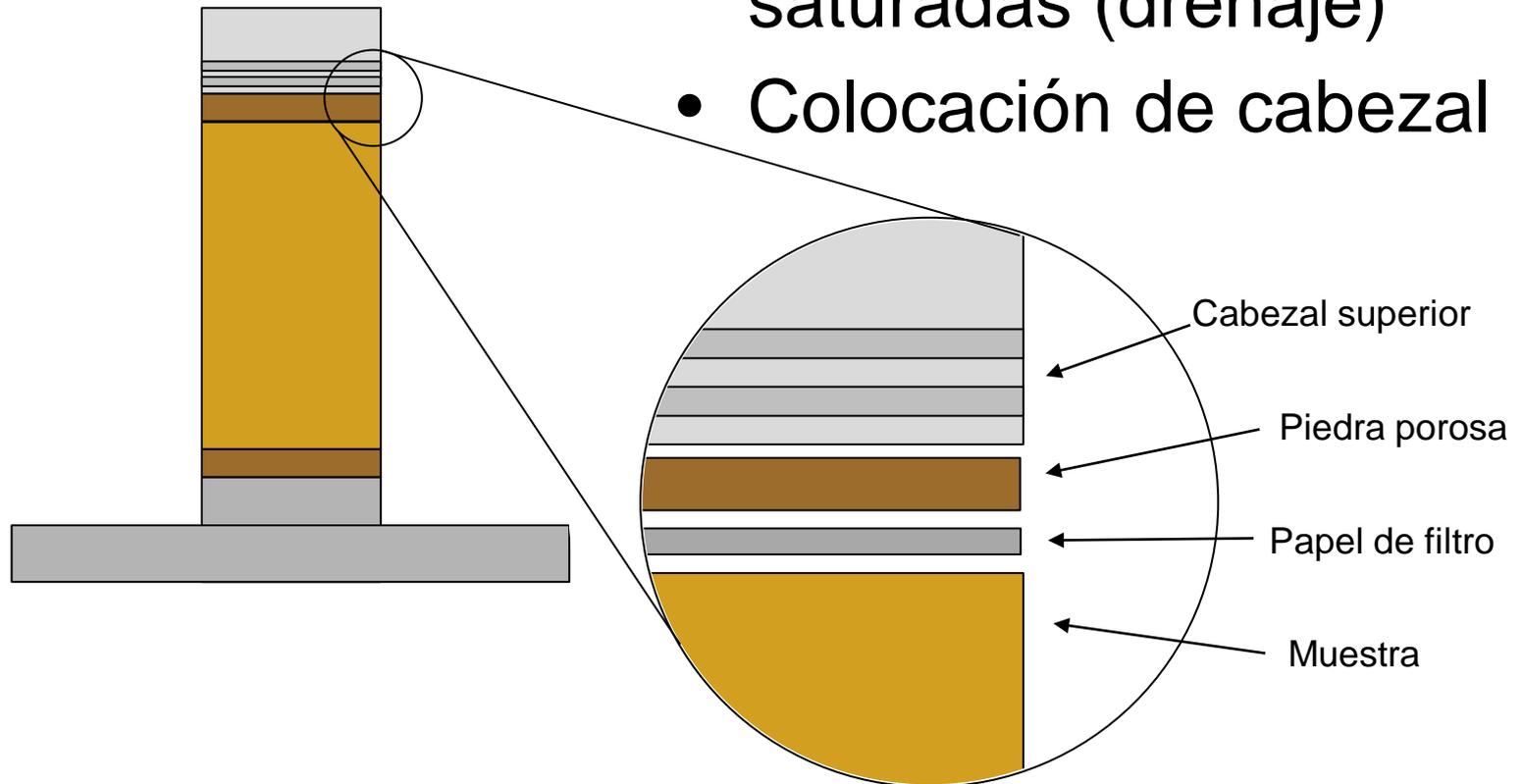
Estado tensional desviador

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_h & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_h & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_h & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_1 - \sigma_h = \sigma_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Montaje de una muestra autosostenida



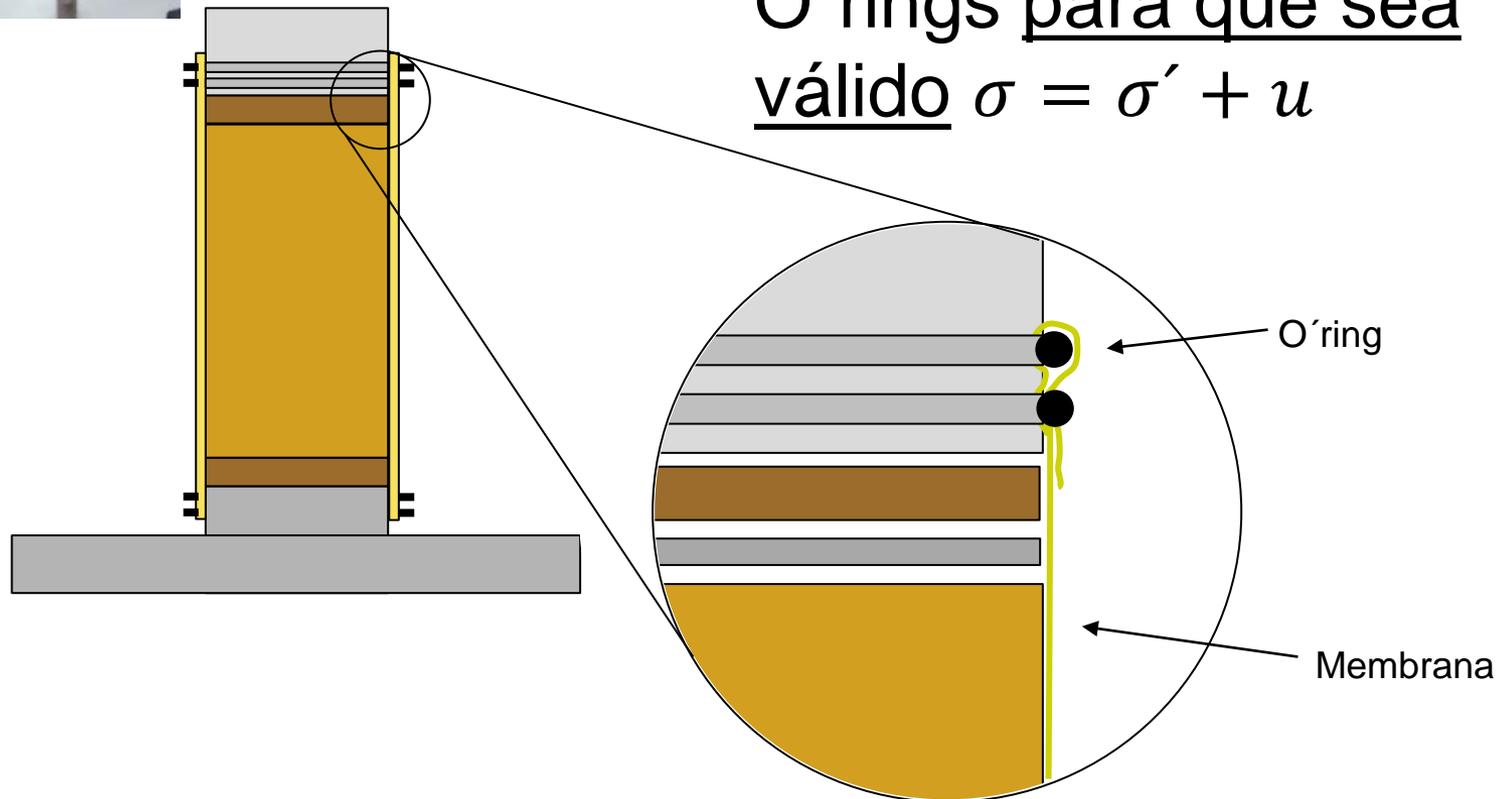
- Colocación de piedras porosas sup. e inf. saturadas (drenaje)
- Colocación de cabezal



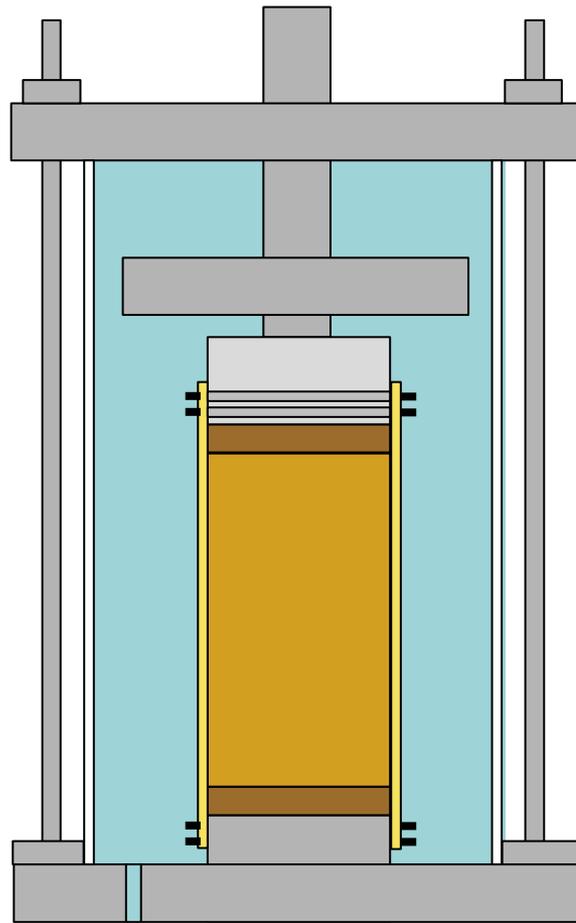
Montaje de una muestra autosostenida



- Colocación de la membrana de látex y O´rings para que sea válido $\sigma = \sigma' + u$



Montaje de una muestra autosostenida



- Colocación de la parte superior de la cámara.
- Alineamiento del pistón.
- Llenado de la cámara.

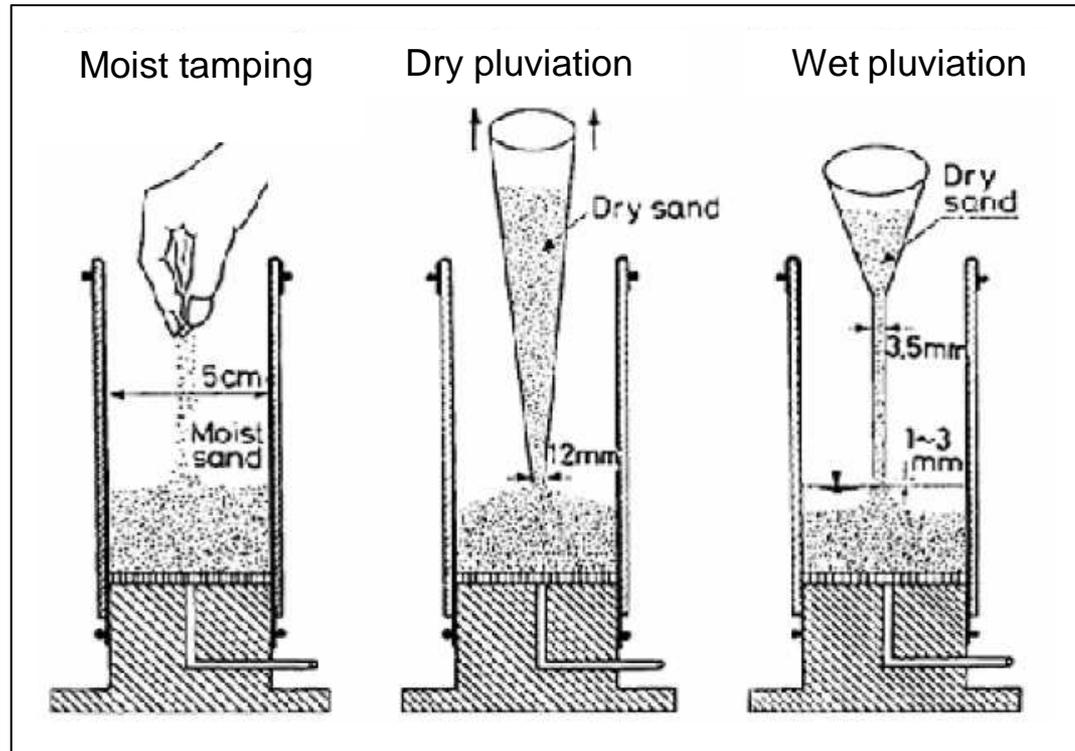
AGUA A ↑
PRESIÓN



Montaje muestras arcillosas (duración 6min)
<https://www.youtube.com/watch?v=7Hh45k1gqjU>



Fabricación de muestras no cohesivas (dependiendo del valor D_r inicial)



Ishihara K., 1993

- Dry pluviation: vertido controlado en seco, $30\% < D_r < 70\%$
- Wet pluviation: vertido controlado bajo agua, $D_r < 30\%$
- Moist tamping: compactación en capas, en húmedo, amplio rango de D_r

Montaje muestras "arenosas" (duración 11min)

<https://www.youtube.com/watch?v=e2SOAW5casw>

Videos



Montaje muestras “arcillosas” (duración 6min) – EN CLASE

<https://www.youtube.com/watch?v=7Hh45k1gqjU>

Montaje muestras “arenosas” (duración 11min) – EN CLASE

<https://www.youtube.com/watch?v=e2SOAW5casw>

Muestras muy difíciles de saturar: flushing CO2 (duración 8min)

<https://www.youtube.com/watch?v=pKPW7pGjP0o>

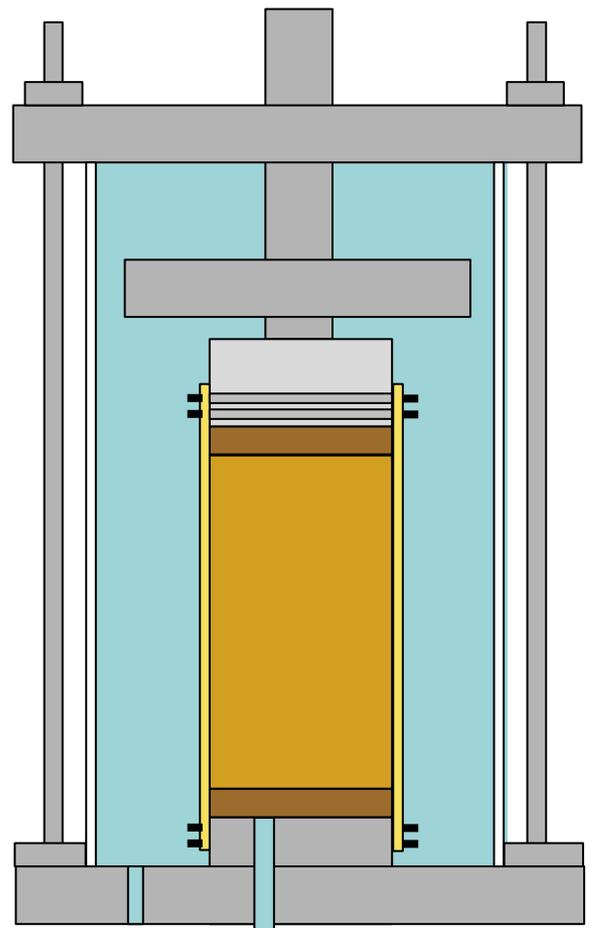
Deaireado de líneas de presión (duración 6min)

<https://www.youtube.com/watch?v=WU-g2KOXGXo>

ADVERTENCIA: Los videos que aquí se presentan son a fines ilustrativos y tienen por único objetivo que el alumno/a visualice las etapas de ensayo. Por consiguiente, no deben ser interpretados como material de aprendizaje previamente calificado.



Mediciones de presión



Medición de presión de poros y presión de cámara.

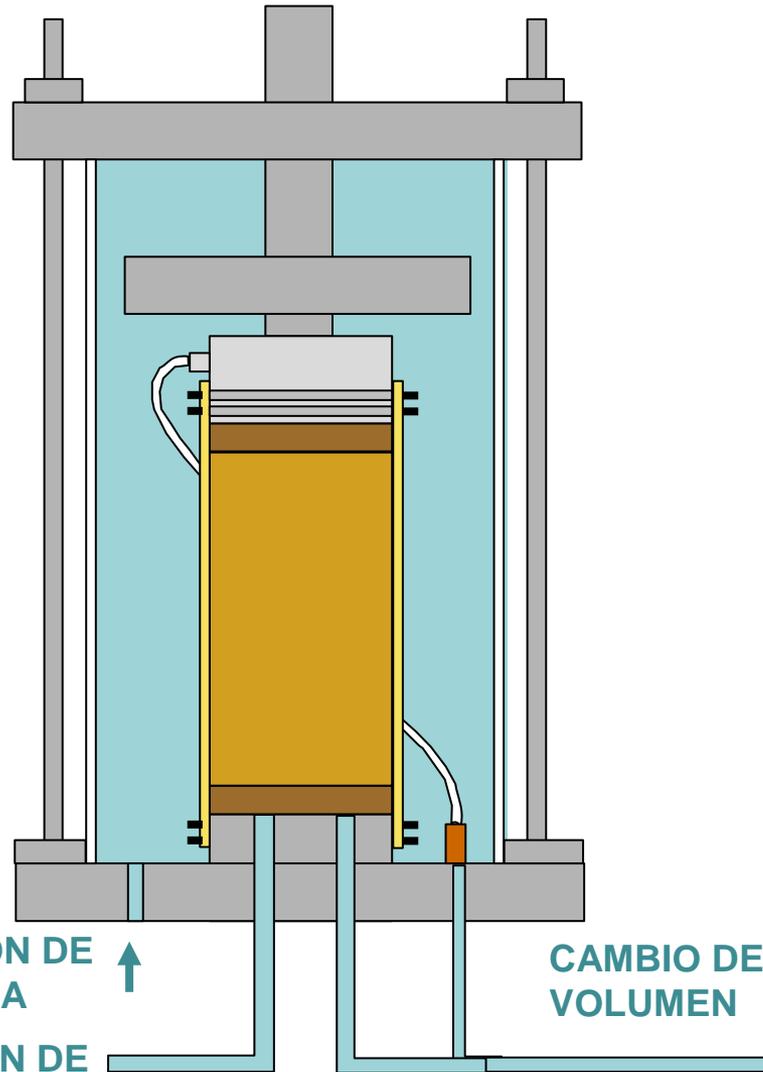
Manómetros digitales, mecánicos, bureta.



PRESIÓN DE CÁMARA ↑
PRESIÓN DE POROS

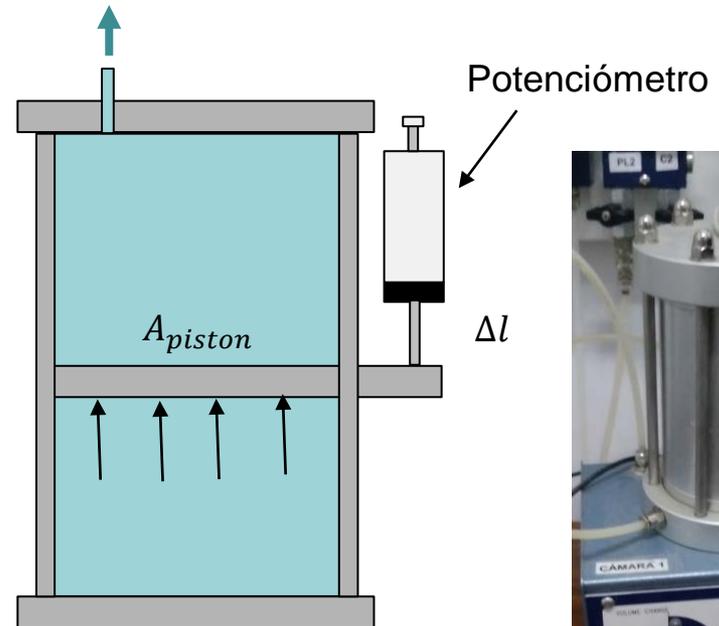


Mediciones de cambio de volumen



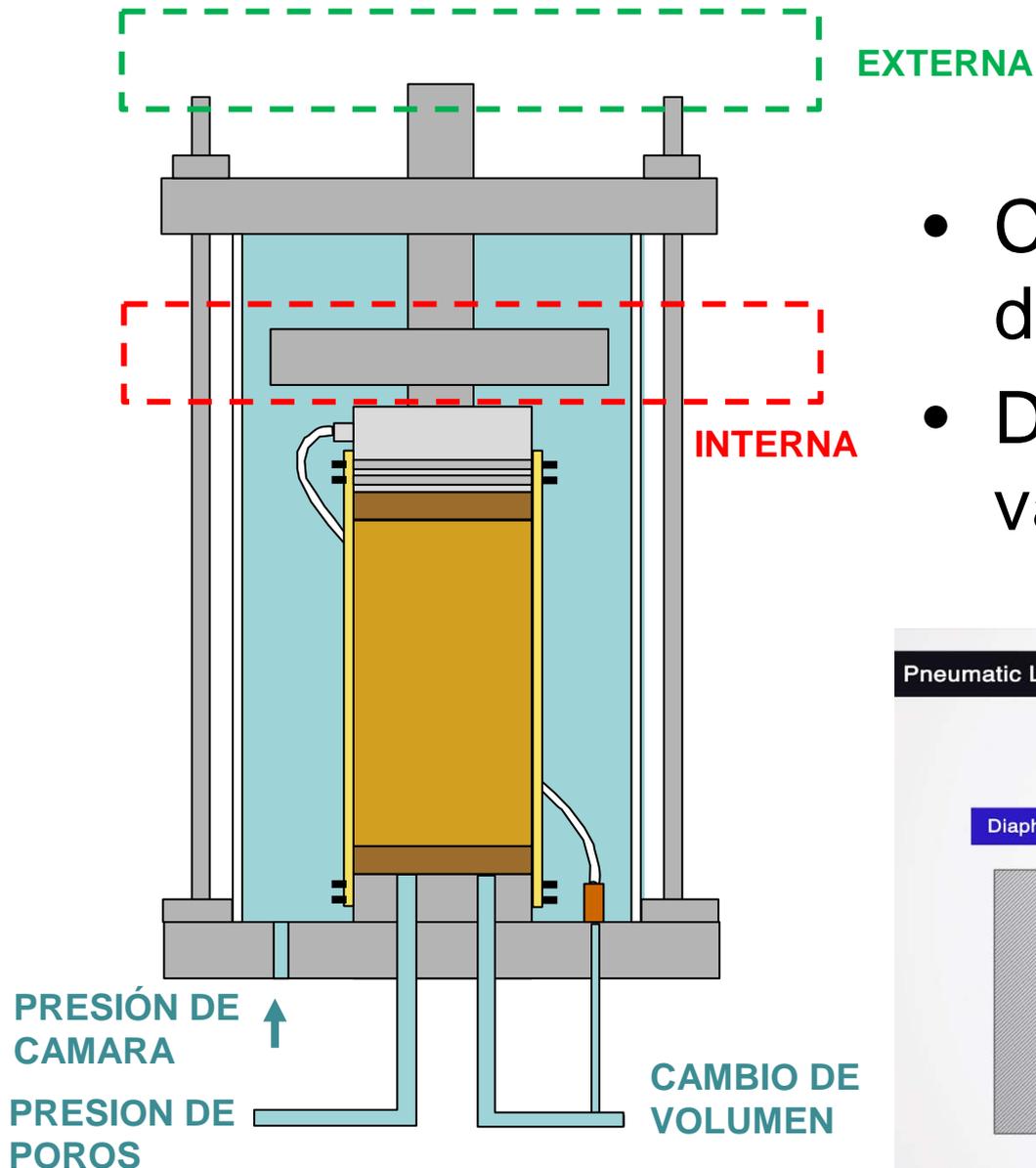
El cambio de volumen lo podemos calcular como:

$$\Delta V = A_{pistón} \cdot \Delta l$$

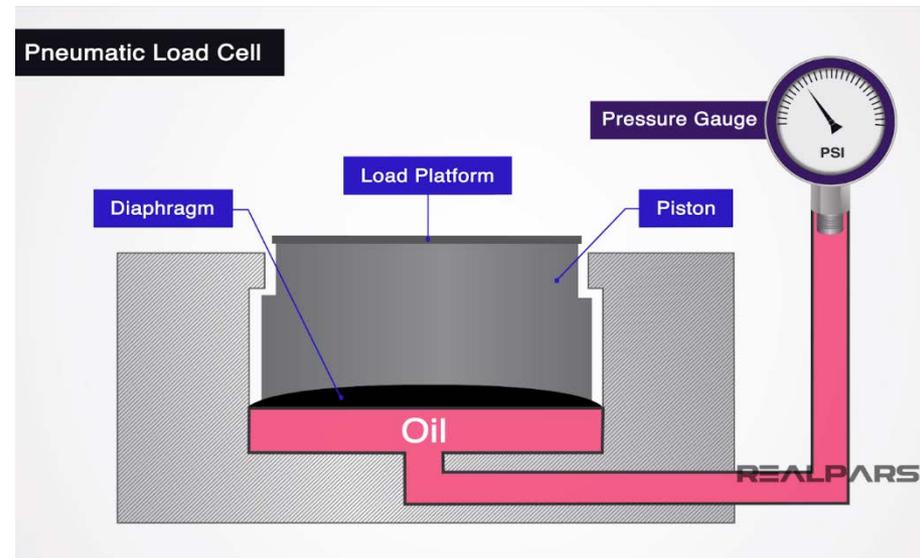




Mediciones de carga axial

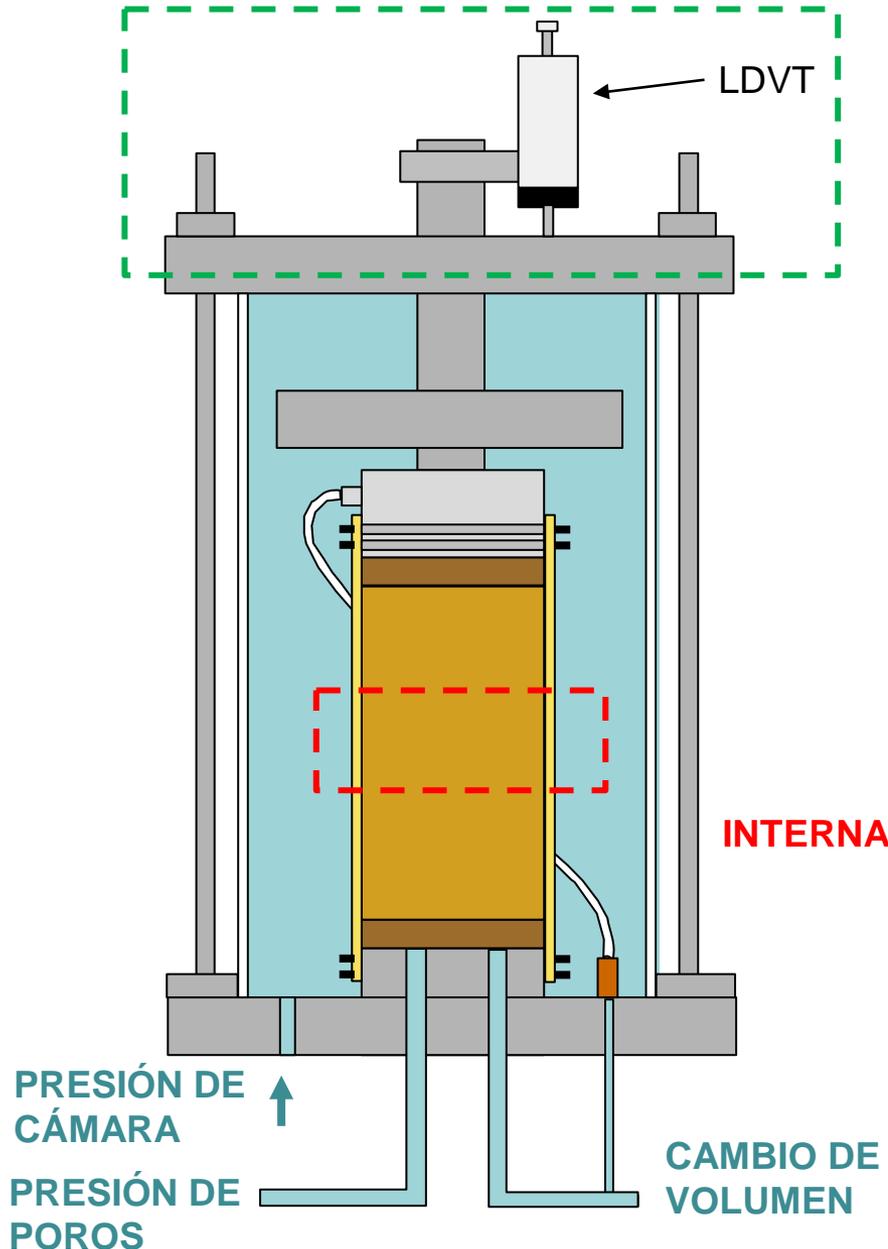


- Celda de carga, aro dinamométrico, etc
- Descontar fricción de vástago en **EXTERNA**



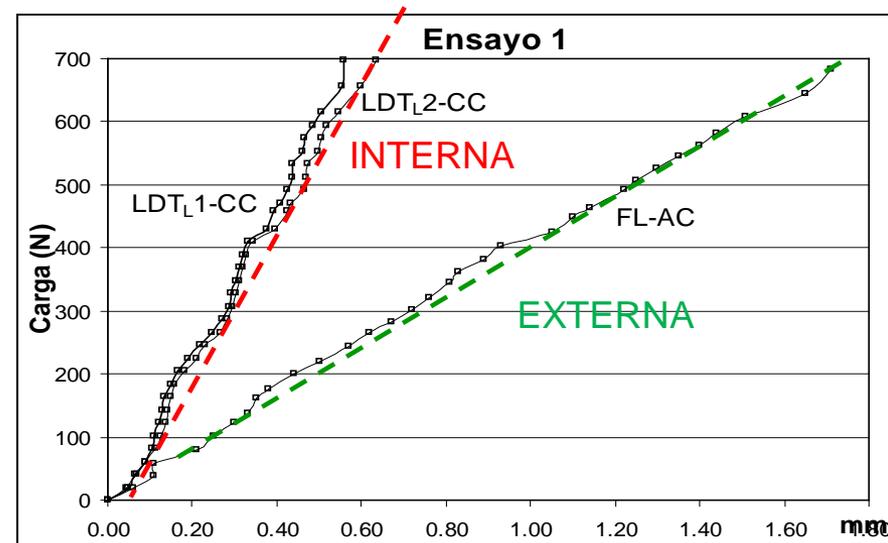


Mediciones de deformación axial

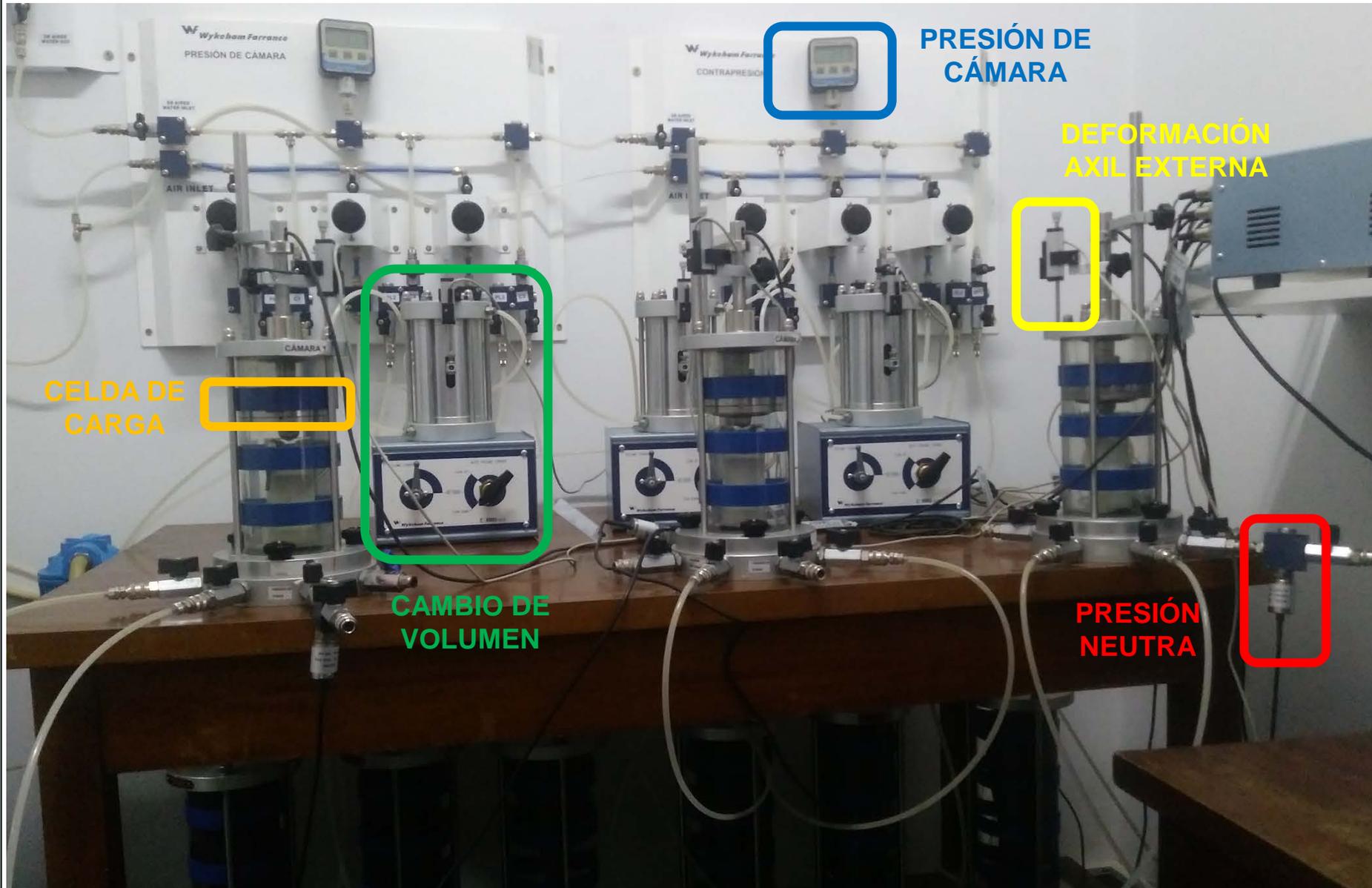


EXTERNA.

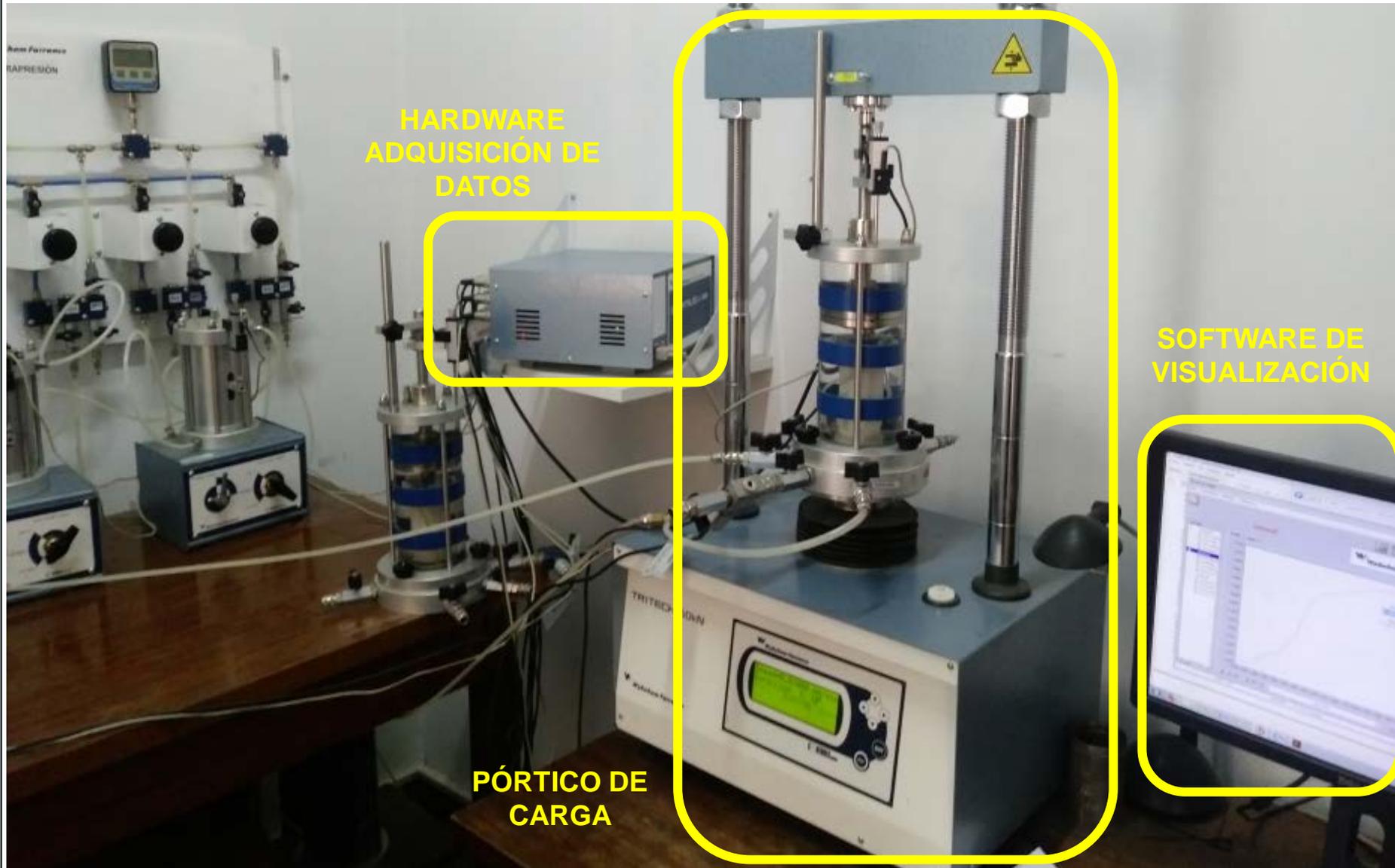
- Reloj comparador, LDVT, potenciómetros, relojes comparadores.



Equipo triaxial semiautomático del LMS



Equipo triaxial semiautomático del LMS



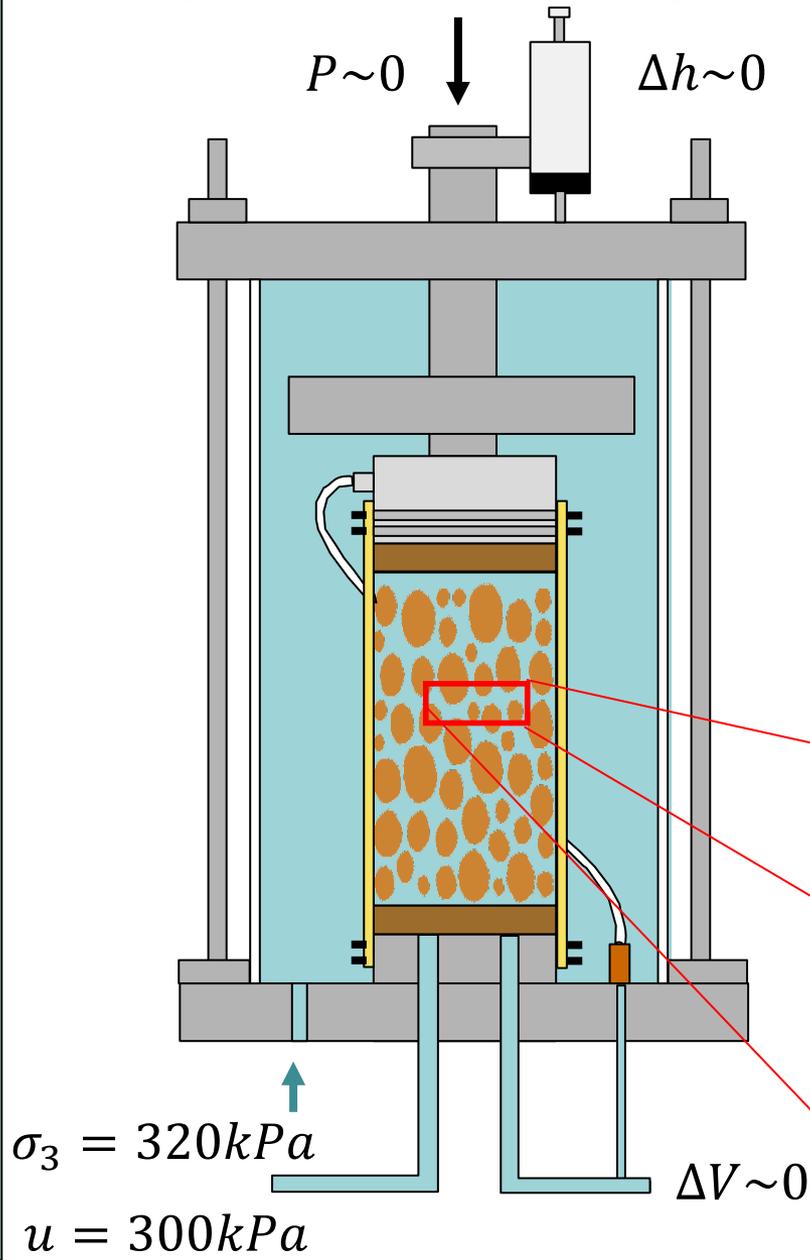
HARDWARE
ADQUISICIÓN DE
DATOS

SOFTWARE DE
VISUALIZACIÓN

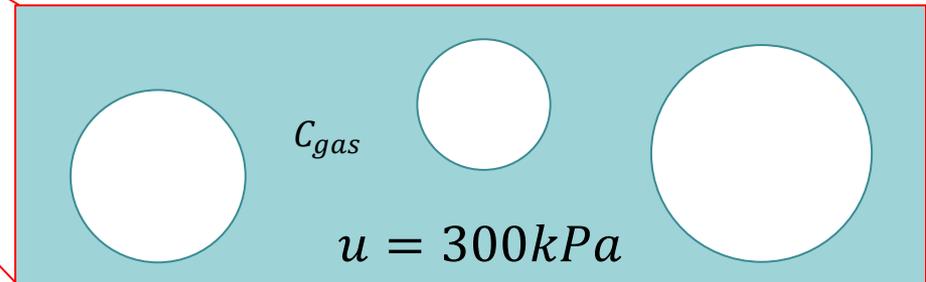
PÓRTICO DE
CARGA



Etapas del ensayo: 1^o - saturación

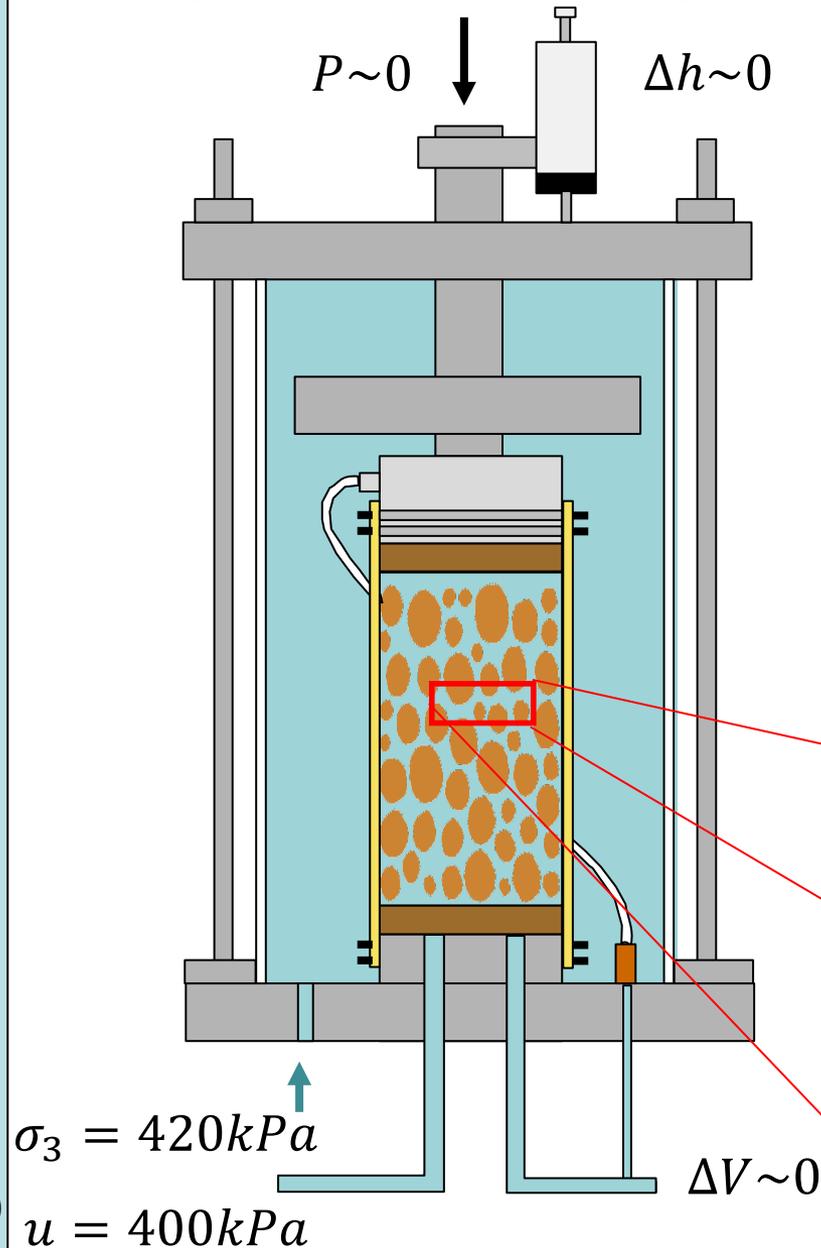


- El aire atrapado genera errores de medición.
- Necesitamos eliminar las burbujas de aire presentes en la muestra o disolverlas en el agua.
- Ley de Henry: $p = C_{gas} \cdot k_H$





Etapas del ensayo: 1^o - saturación

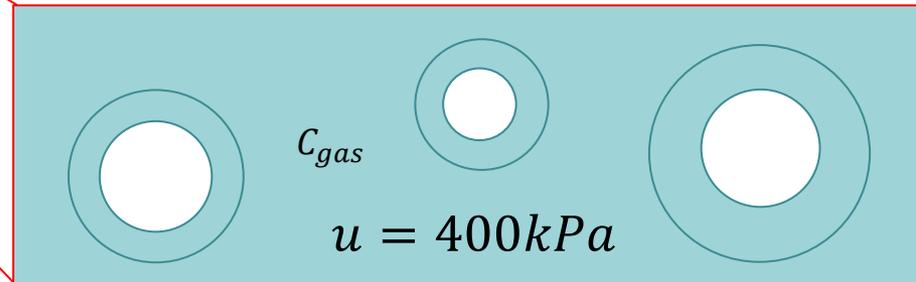


¿Cómo lo verificamos?

- Medimos el parámetro

$$B_{Skempton} = \frac{\Delta u^{t=2min}}{\Delta \sigma_3}$$

- Si $B_{Skempton} > 95\%$, se asume que la muestra está saturada

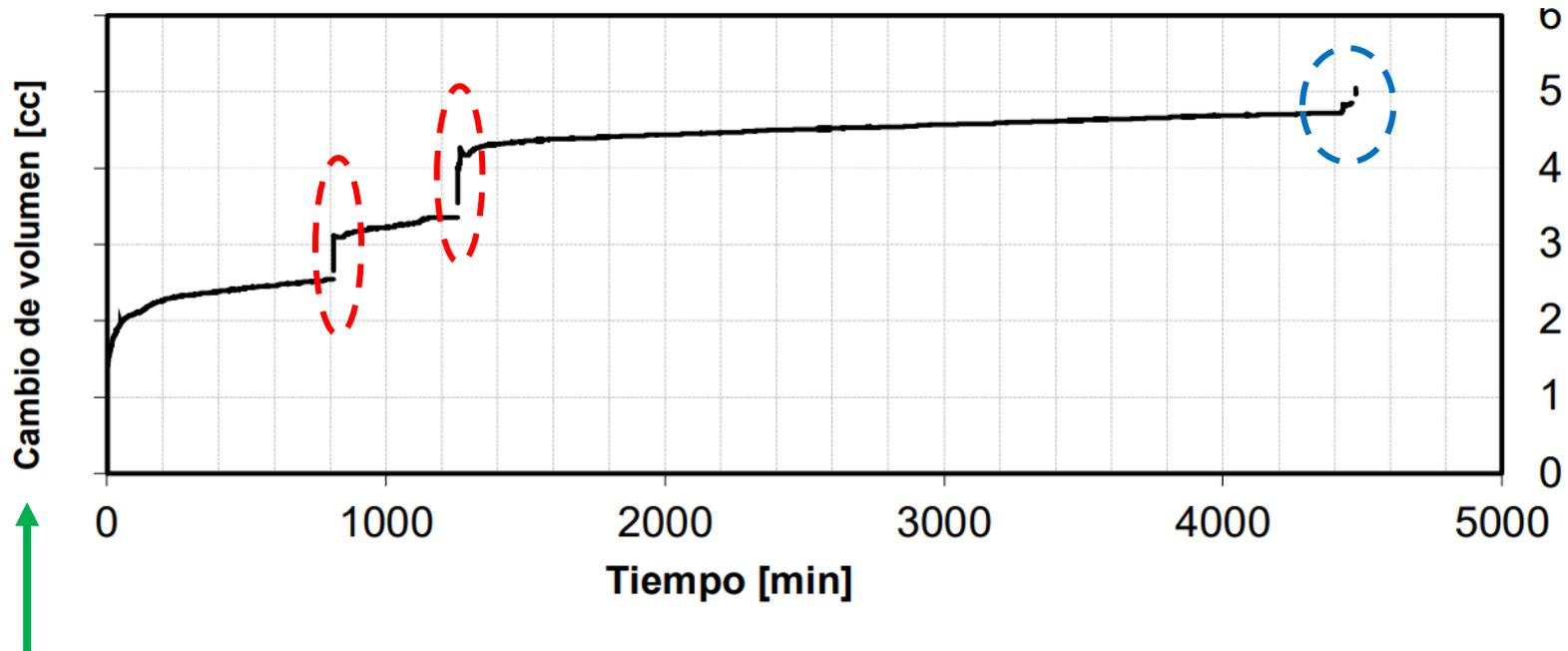




Etapas en un ensayo triaxial: Saturación

**INCREMENTOS DE
PRESIÓN**

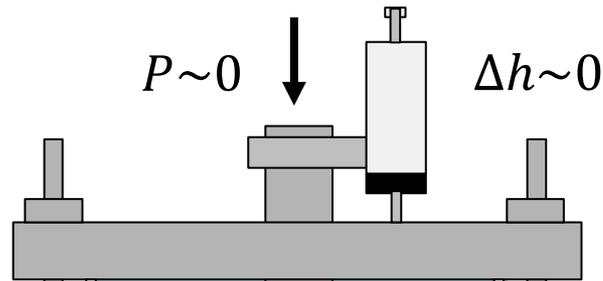
**ESCALONES PEQUEÑOS, LA
MUESTRA ESTÁ
PRACTICAMENTE SATURADA**



**VOLUMEN DE AGUA QUE
ENTRA A LA MUESTRA**

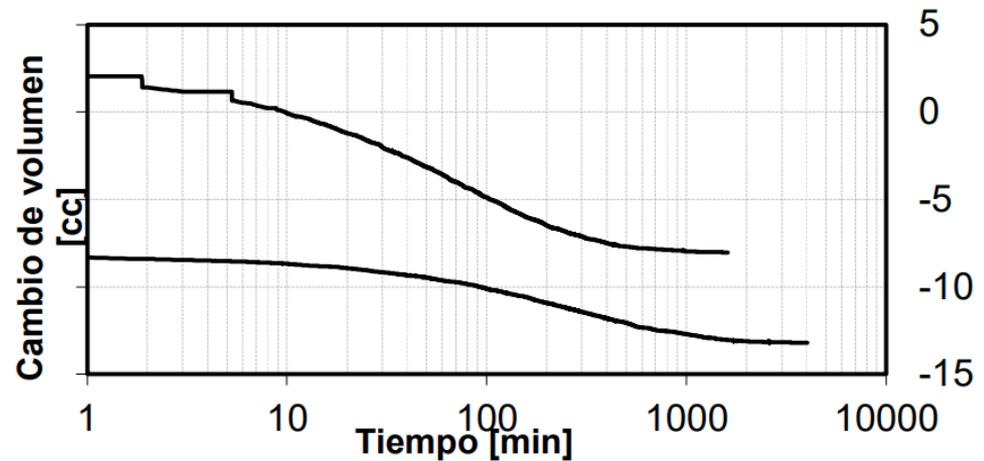


Etapas del ensayo: 2º - consolidación



Incrementamos la presión de cámara σ_3 para permitir que la muestra consolide isotrópicamente

$$\sigma'_3 = 700kPa - 500kPa = 200kPa$$



$$\sigma_3 = 700kPa$$

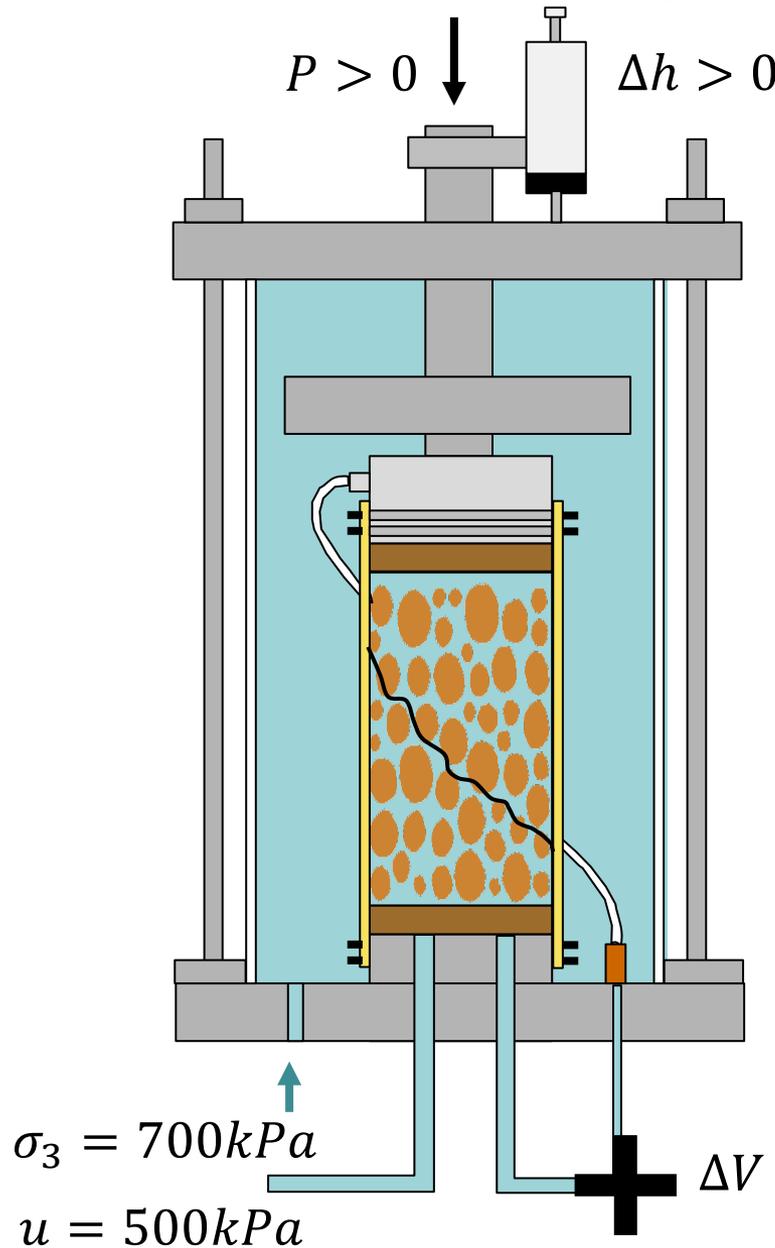
$$u = 500kPa$$

$$\Delta V > 0$$

Sin esta etapa, haríamos un ensayo Q



Etapas del ensayo: 3º - ruptura o corte



Aumentamos la carga en el pistón a velocidad constante

$$\epsilon_{1f} = \frac{\Delta h}{H_0} \quad \sigma_{df} = \frac{P_f}{A(\epsilon_a)} - \Delta\sigma_{corr}$$

Este valor se debe corregir por la rigidez de membrana y el papel de filtro

válvulas abiertas: Ensayo S

válvulas cerradas: Ensayo R'



Modo de falla: Plano de deslizamiento definido



Muestra granular densa



Muestra cohesiva preconsolidada

- En muestras densas o compactas, la zona de falla se localiza en una región de la muestra (banda de corte)



Modo de falla: abultamiento



inicio



fin

Muestra granular suelta



inicio



fin

Muestra cohesiva normalmente consolidada

- Las muestras sueltas o normalmente consolidadas continúan deformándose y adquieren una forma de barril. No hay una zona de falla localizada. Las deformaciones pueden llegar a ser excesivas ($\epsilon_1 = 25\%$).

Corrección de área en la falla (A_f)



El área inicial de la muestra es diferente al área al momento de la falla o ruptura

- Ensayo Q:

- $V_0 = cte = A_0 h_0 = A_f h_0 (1 - \epsilon_{1f}) \rightarrow A_f = \frac{A_0}{1 - \epsilon_{1f}}$

- Ensayo R:

- $A_f = \frac{V_f^{cons} / h_f^{cons}}{1 - \epsilon_{1f}}$

V_f^{cons} : volumen a fin de consolidación

h_f^{cons} : altura a fin de consolidación

- Ensayo S:

- $A_f = \frac{V_f^{cons} / h_f^{cons}}{1 - \epsilon_{1f}} (1 - \epsilon_{vf})$

ϵ_v : deformación volumétrica



Recordemos

¿Qué medimos?

Carga P , Desplazamiento Δh , Presión de poros u , Presión de cámara σ_3

¿Qué podemos calcular?

Tensión desviadora σ_d , Deformación axial ε_a , Tensor de tensiones $\sigma'_1, \sigma'_2 = \sigma'_3$.

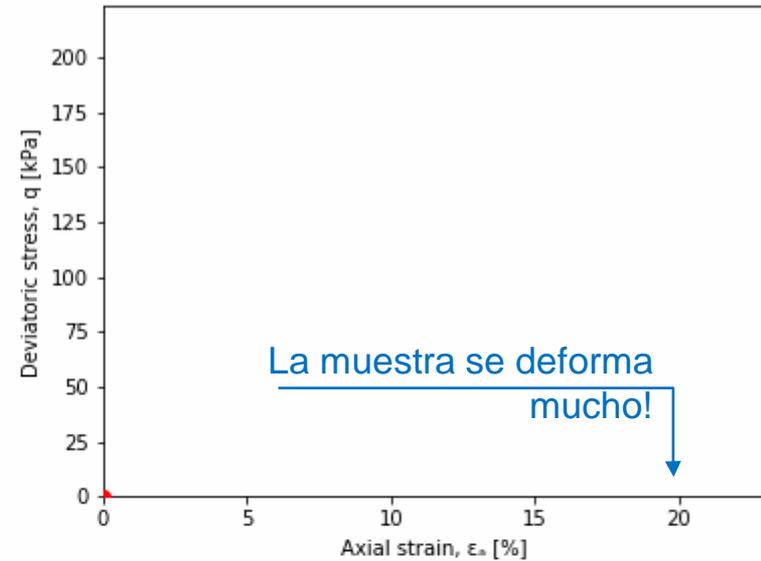
¿Qué parámetros podemos obtener?

Ángulo de fricción interna efectivo ϕ , Rigidez del suelo E_{50} , cohesión c' (si hay cementación), otros ($\beta = \frac{\delta s_u}{\delta \sigma_3}$, ~~ϕ_{cu}, c_{cu}~~)

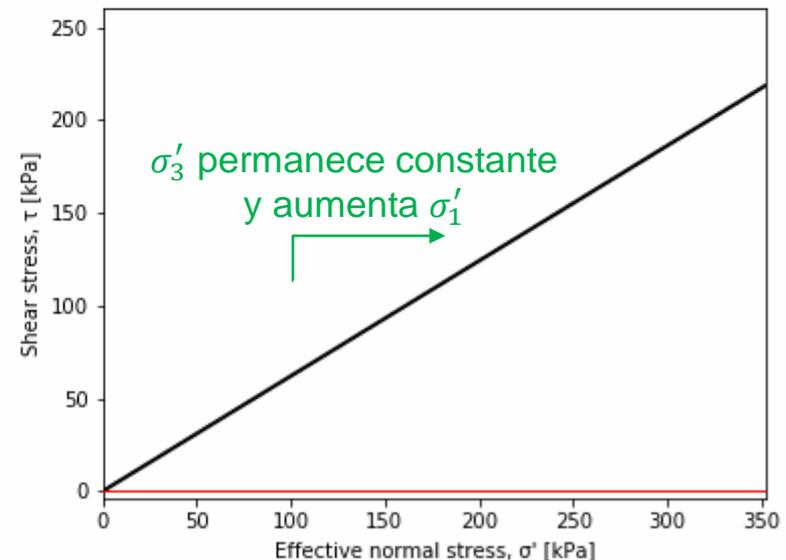
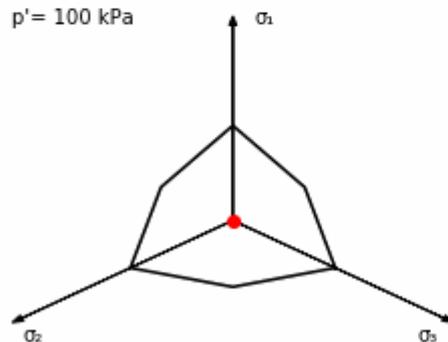


Algunos resultados

Arena suelta – consolidado drenado



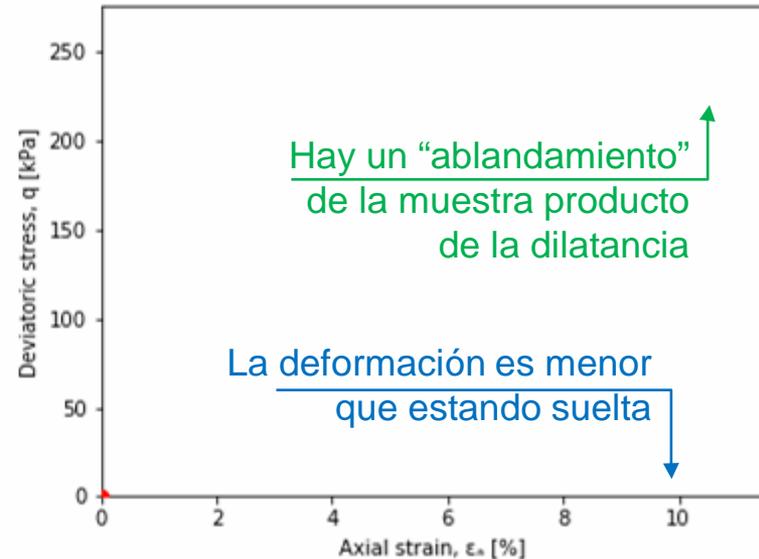
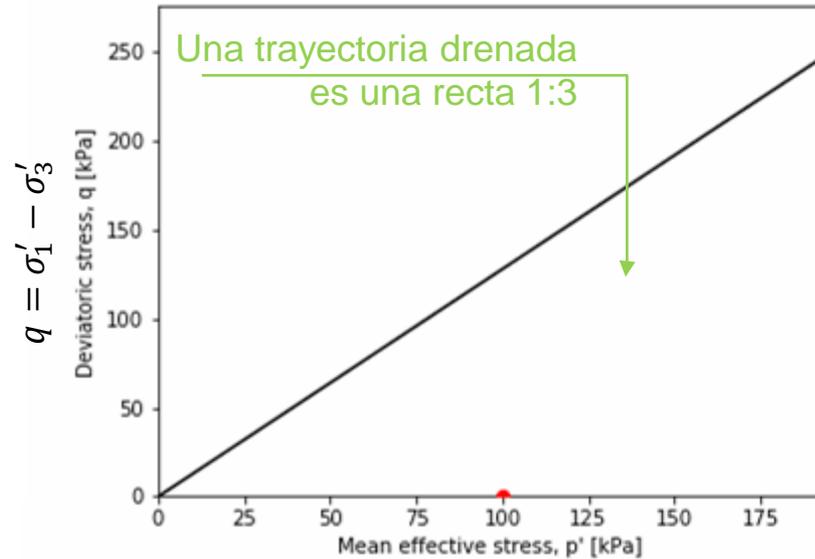
$$p' = \frac{1}{3} \cdot (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)$$



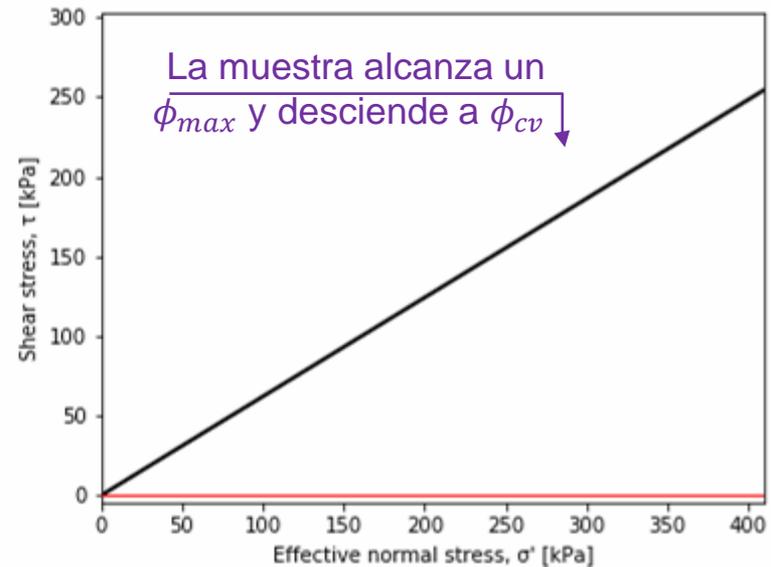
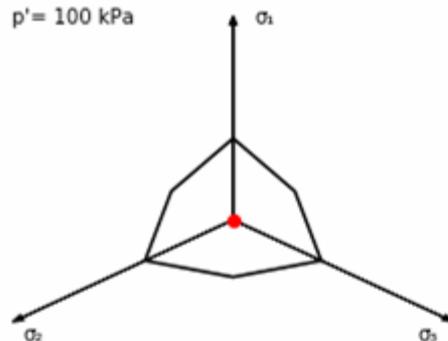


Algunos resultados

Arena densa – consolidado drenado



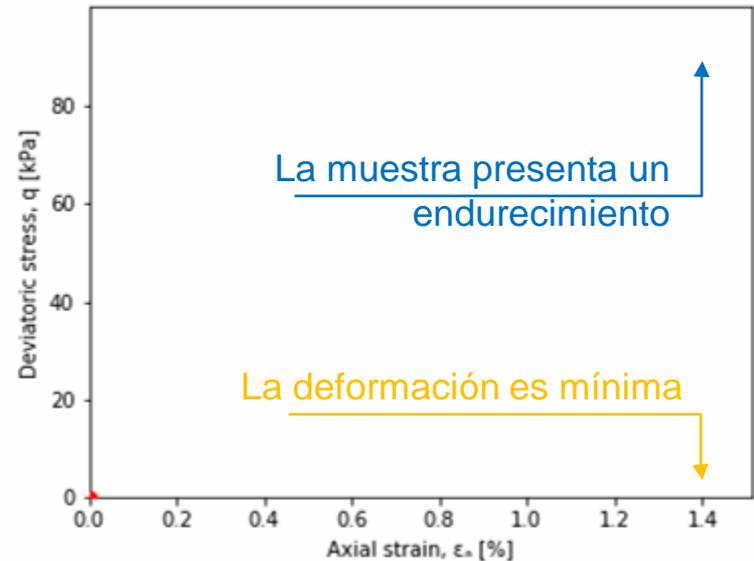
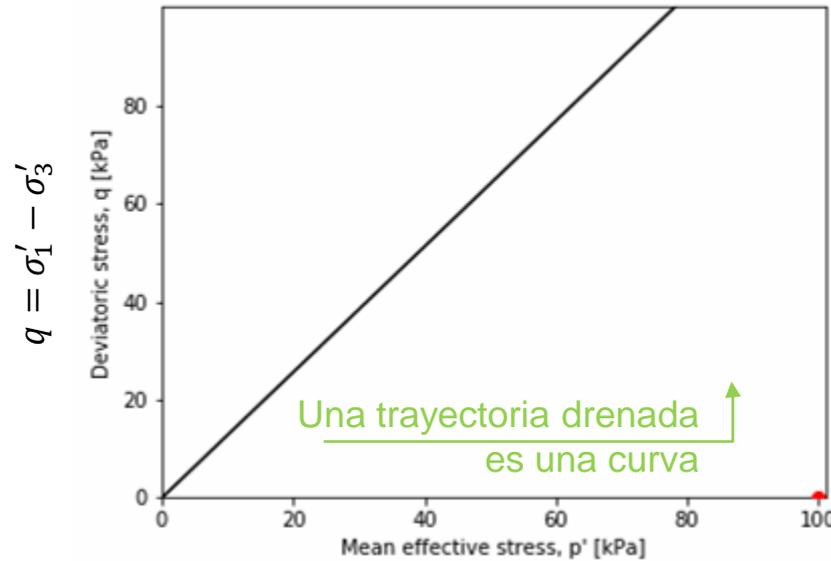
$$p' = \frac{1}{3} \cdot (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)$$



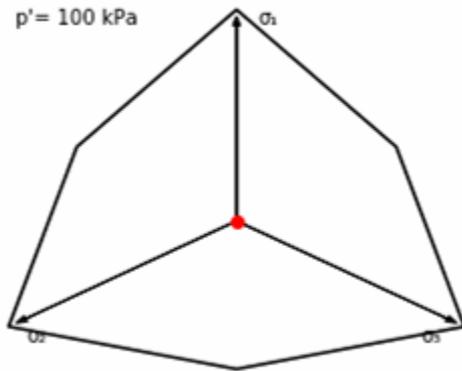


Algunos resultados

Arena densa – consolidado no drenado



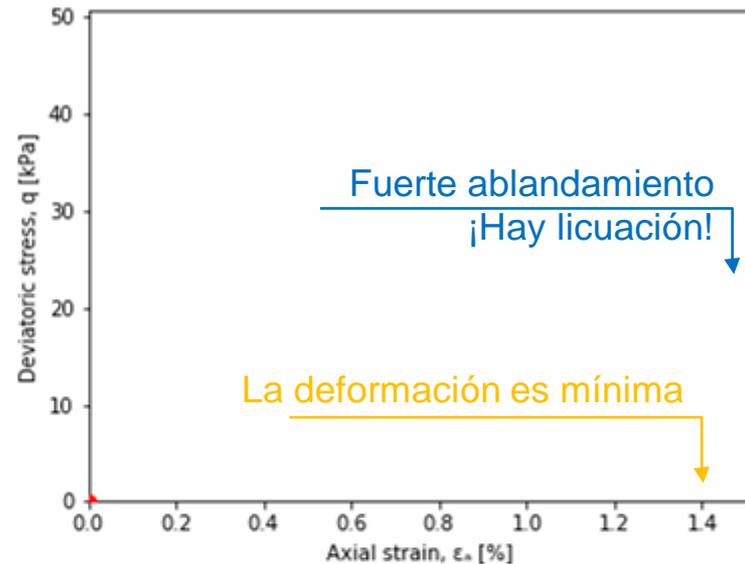
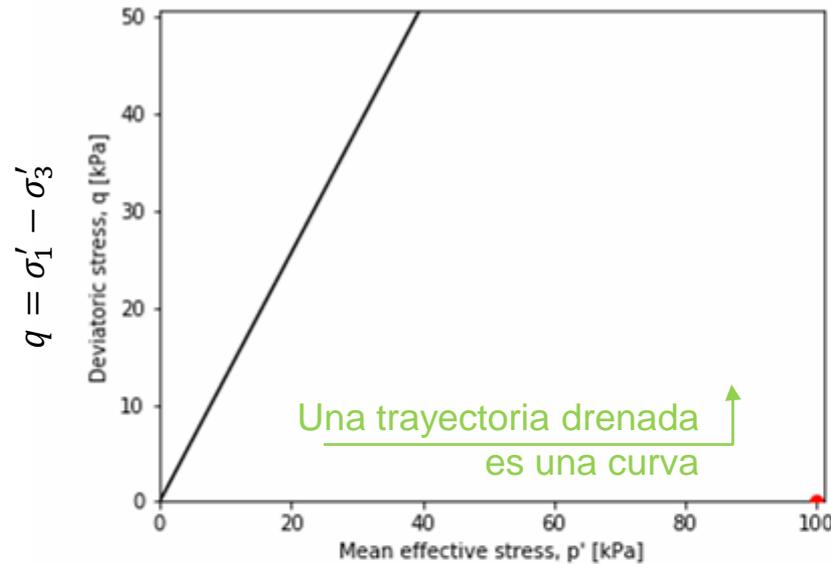
$$p' = \frac{1}{3} \cdot (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)$$



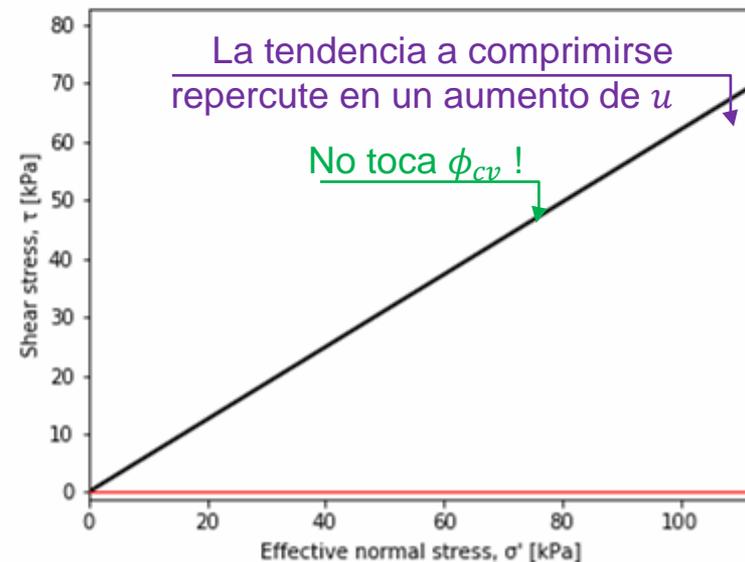
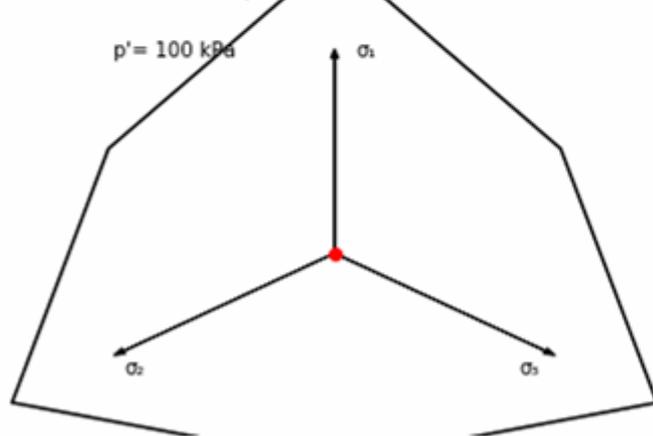


Algunos resultados

Arena suelta – consolidado no drenado

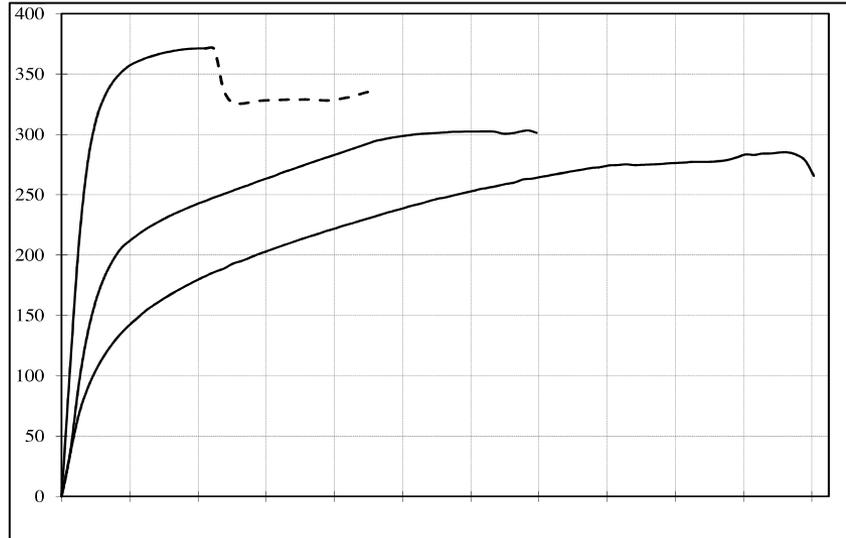


$$p' = \frac{1}{3} \cdot (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)$$





Resultados de ensayos triaxiales S (arena monogranular, reconstituída)

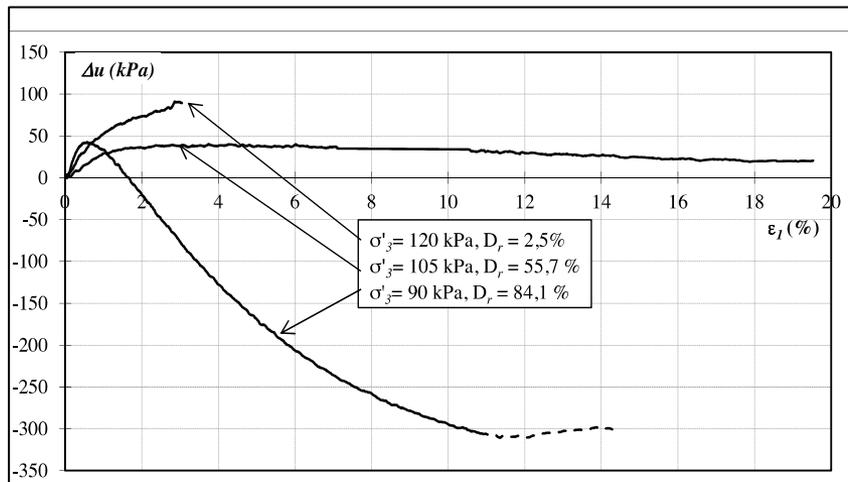
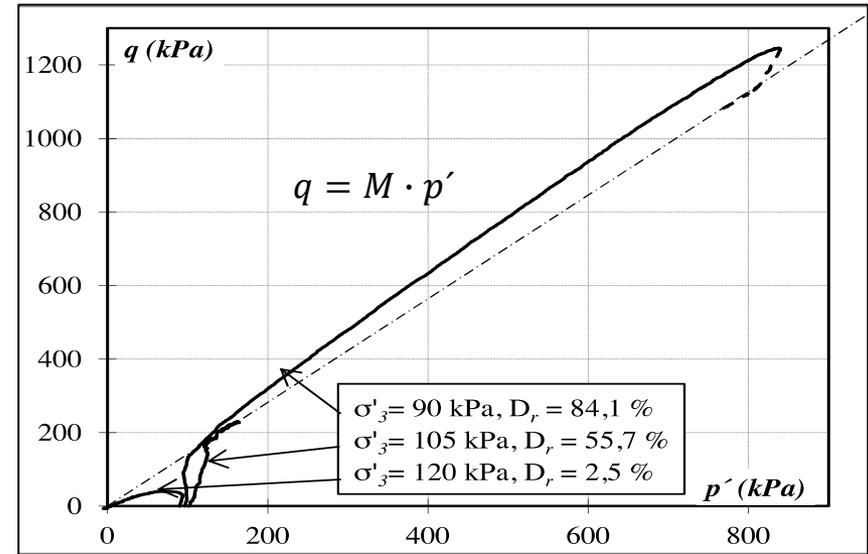
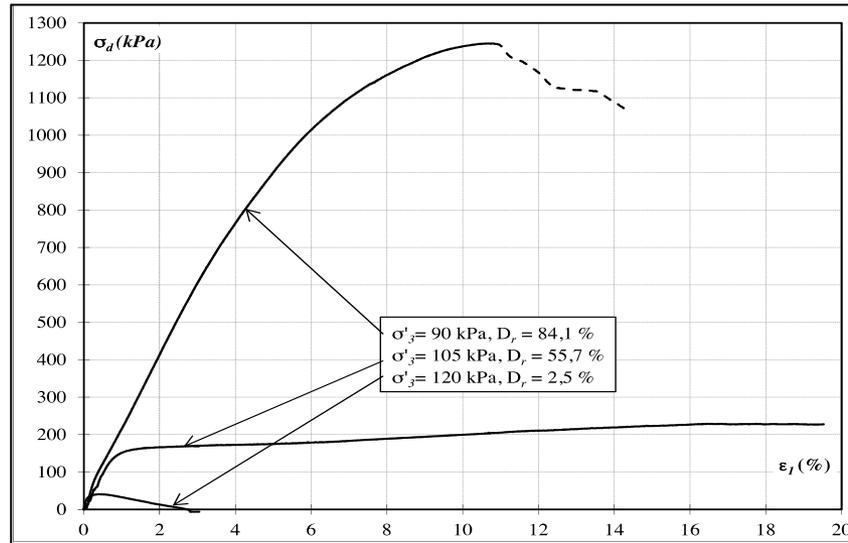


$$q = M \cdot p'$$

- $D_r \sim 85\% \rightarrow$ dilatante ($\uparrow \Delta V$)
- $D_r \sim 45$ y $13\% \rightarrow$ contractivas ($\downarrow \Delta V$)
- $u_0 \neq 0 \text{ kPa}$ (el agua está a presión)
- $\Delta u = 0$ (ensayos S)
- $\Delta q = 3\Delta p'$



Resultados de ensayos triaxiales R' (arena monogranular, reconstituída)



- $D_r \sim 84\% \rightarrow \downarrow \Delta u$
- $D_r \sim 55$ y $3\% \rightarrow \uparrow \Delta u$
- $u_0 \neq 0$ kPa (el agua está a presión)
- $\Delta V = 0$ (ensayos R')
- $D_r \sim 3\% \rightarrow \Delta q \sim 0 \rightarrow$ licuación muestra

Fenómeno de licuación en TRX:

<https://www.youtube.com/watch?v=9q8cyF3hQpo>

Bibliografía



- Normas ASTM – American Society of Testing Materials
 - D 2850: Ensayo triaxial no consolidado-no drenado
 - D 4767: Ensayo triaxial consolidado-no drenado
 - D 7181: Ensayo triaxial consolidado-drenado
- Jean-Pierre Bardet – Experimental Soil Mechanics.
- Germaine – Geotechnical Laboratory Measurements for Engineers.
- Bishop & Henkel - The measurement of soil properties in the triaxial test.