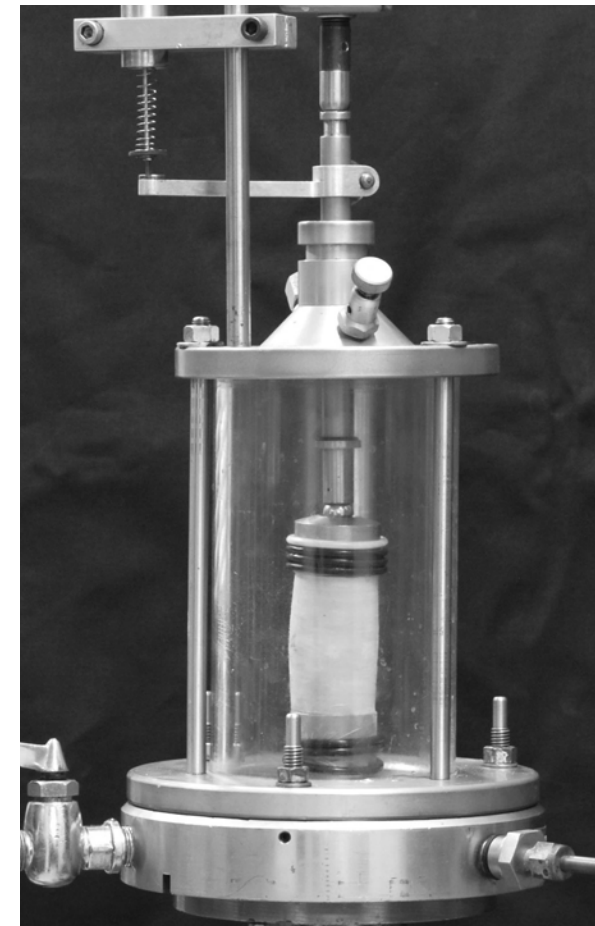


# Clase de laboratorio 05: Ensayos triaxiales



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:  $c'$ ,  $\phi$ ,  $s_u$ ,  $E$ )



Estado tensional genérico

Estado tensional hidrostático

Estado tensional desviador

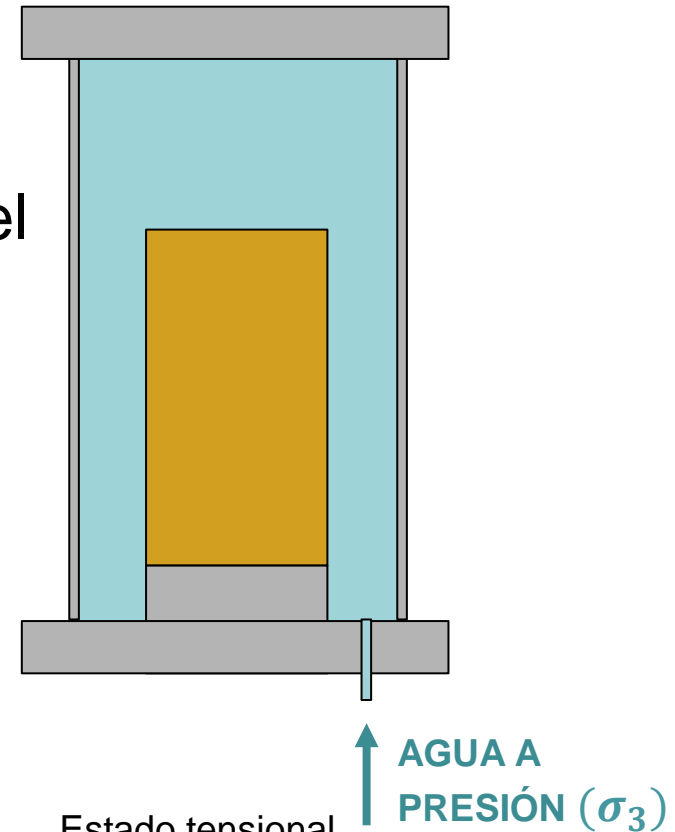
$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_h & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_h & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_1 - \sigma_h & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 - \sigma_h & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 - \sigma_h \end{bmatrix}$$



# Introducción: el ensayo triaxial

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

(y medir parámetros:  $c'$ ,  $\phi$ ,  $s_u$ ,  $E$ )



FÁCIL DE APLICAR CON AGUA A PRESIÓN

Estado tensional genérico

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix}$$

Estado tensional hidrostático

$$\begin{bmatrix} \sigma_h & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_h & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_h \end{bmatrix}$$

Estado tensional desviador

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

$$=$$

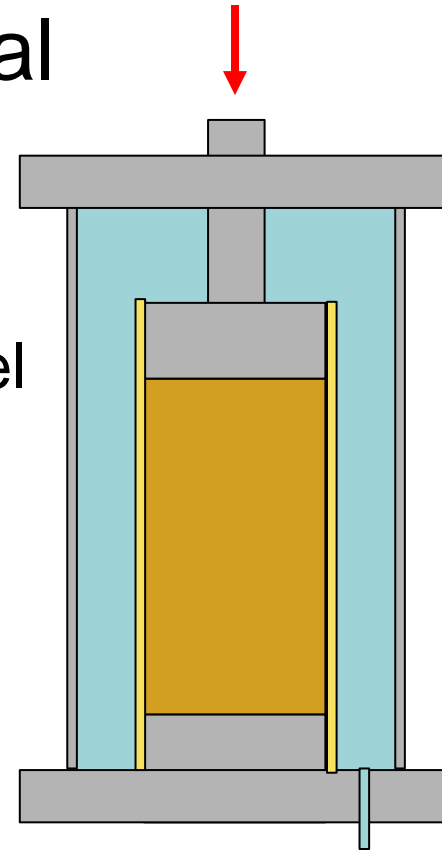


# Introducción: el ensayo triaxial

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

(y medir parámetros:  $c'$ ,  $\phi$ ,  $s_u$ ,  $E$ )

**CARGA EN EL PISTÓN ( $\sigma_d$ )**



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

**AGUA A PRESIÓN ( $\sigma_3$ )**

Estado tensional genérico

Estado tensional hidrostático

Estado tensional desviador

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



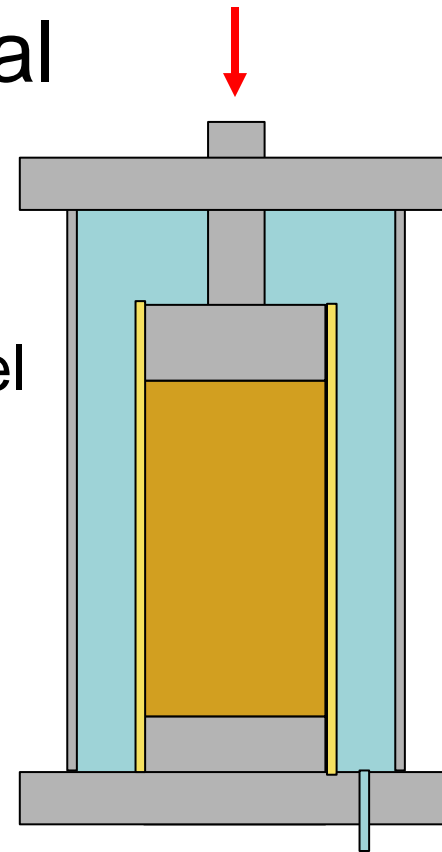
# Introducción: el ensayo triaxial

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

(y medir parámetros:  $c'$ ,  $\phi$ ,  $s_u$ ,  $E$ )

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

CARGA EN EL PISTÓN ( $\sigma_d$ )



AGUA A PRESIÓN ( $\sigma_3$ )

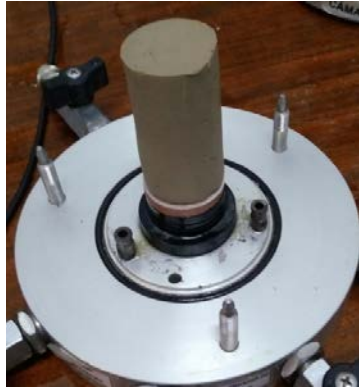
Estado tensional genérico

Estado tensional hidrostático

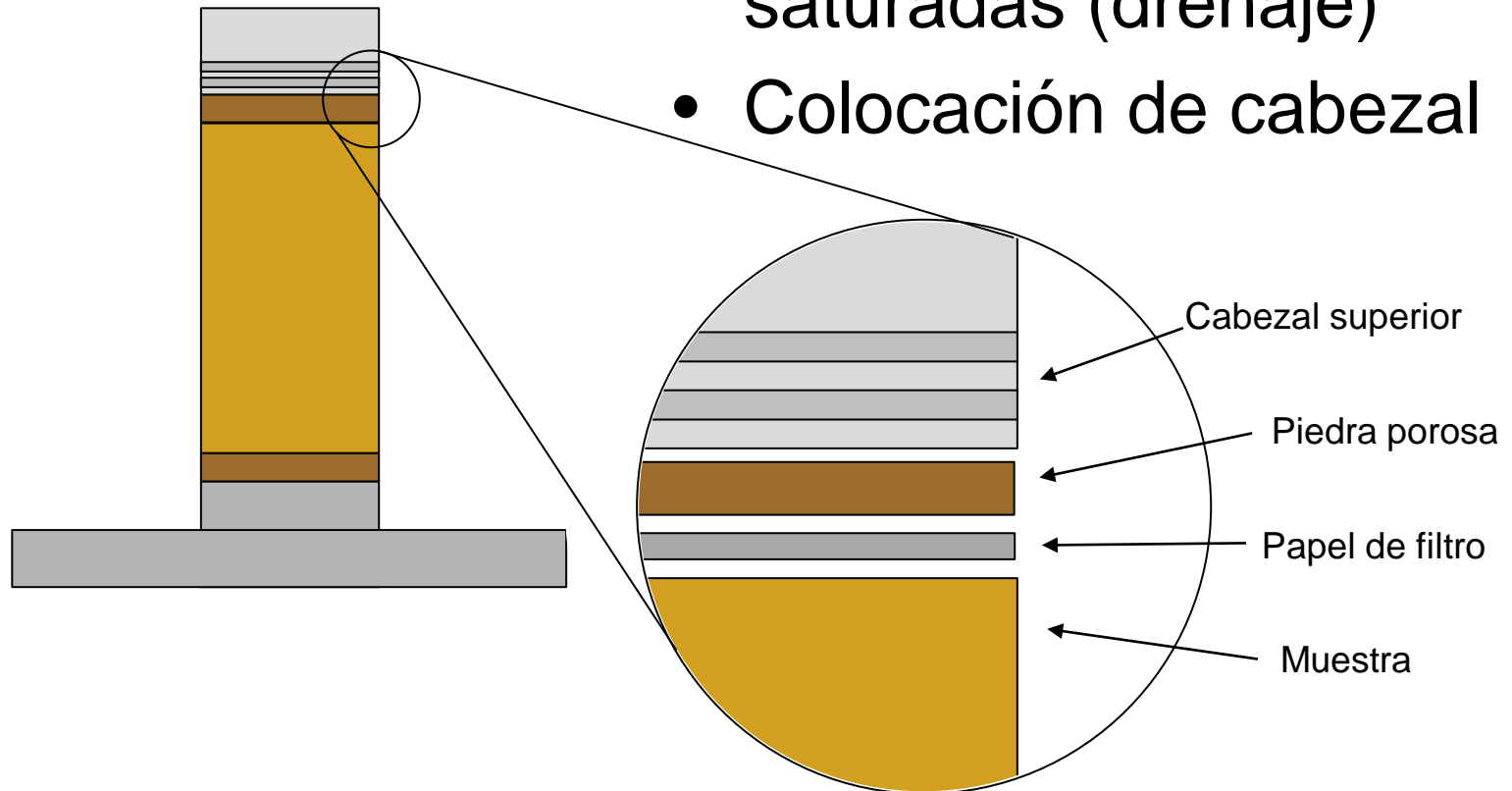
Estado tensional desviador

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

# Montaje de una muestra autosostenida



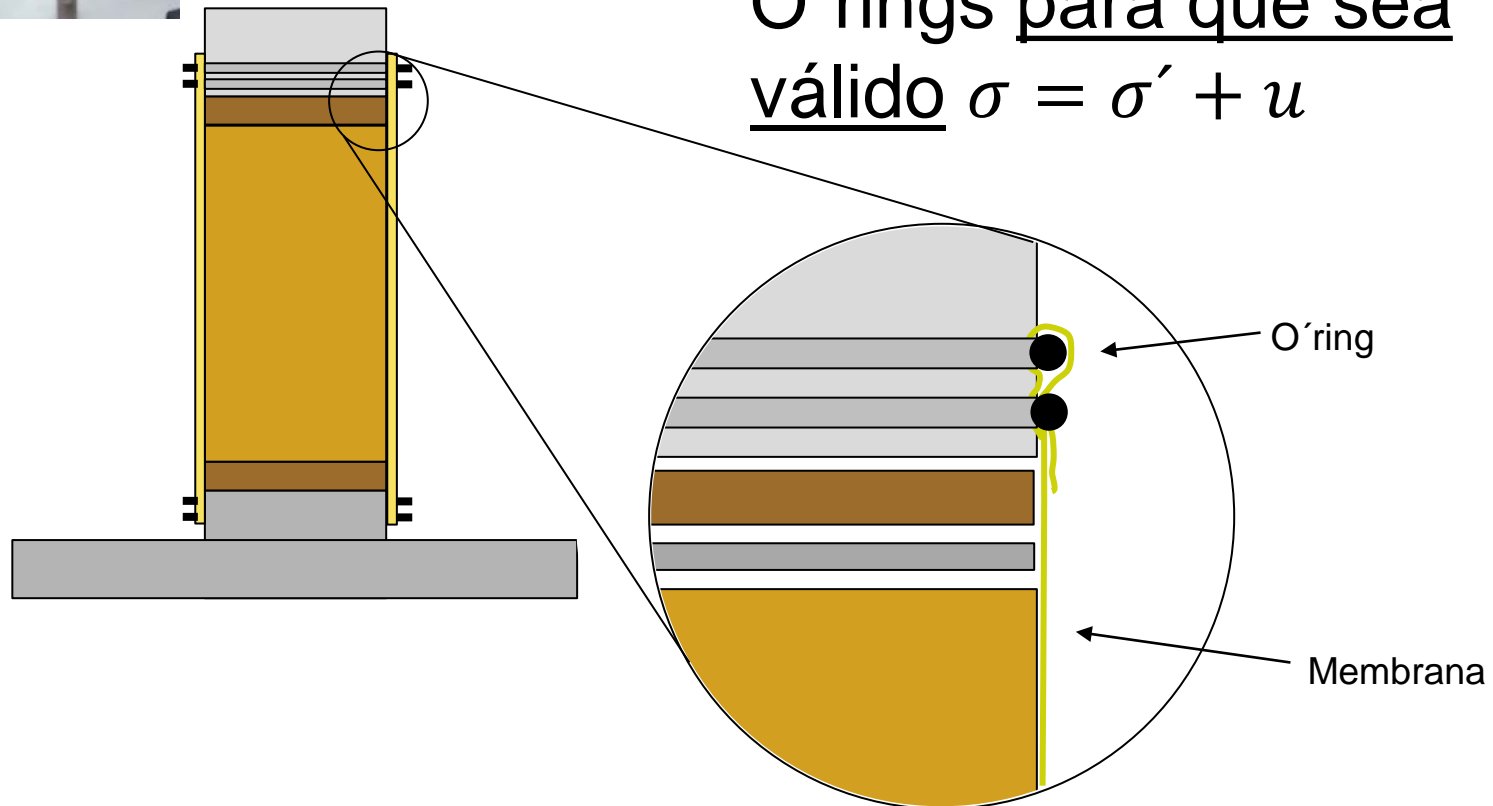
- Colocación de piedras porosas sup. e inf. saturadas (drenaje)
- Colocación de cabezal



# Montaje de una muestra autosostenida

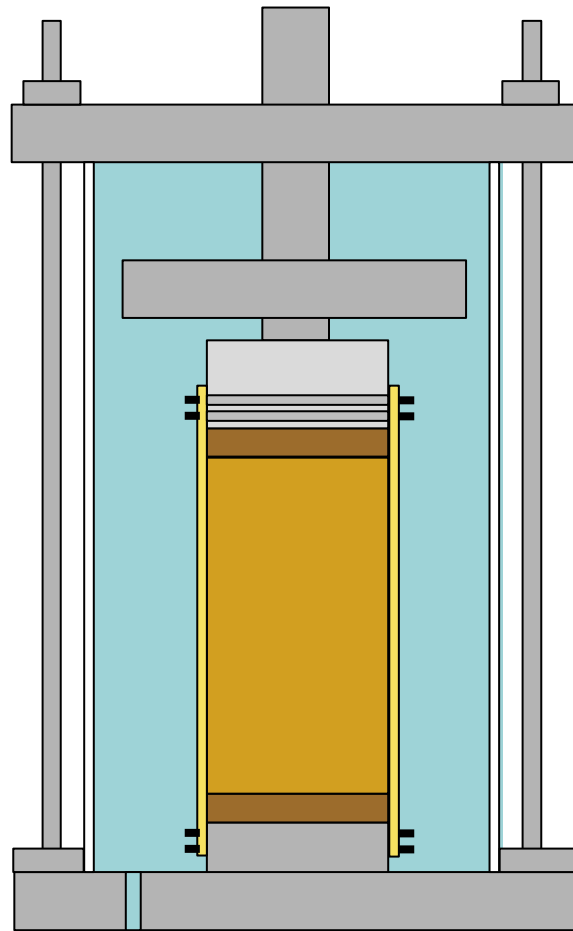


- Colocación de la membrana de látex y O´rings para que sea válido  $\sigma = \sigma' + u$



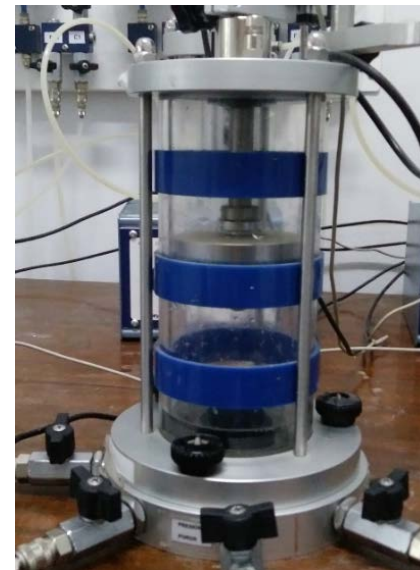


# Montaje de una muestra autosostenida



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

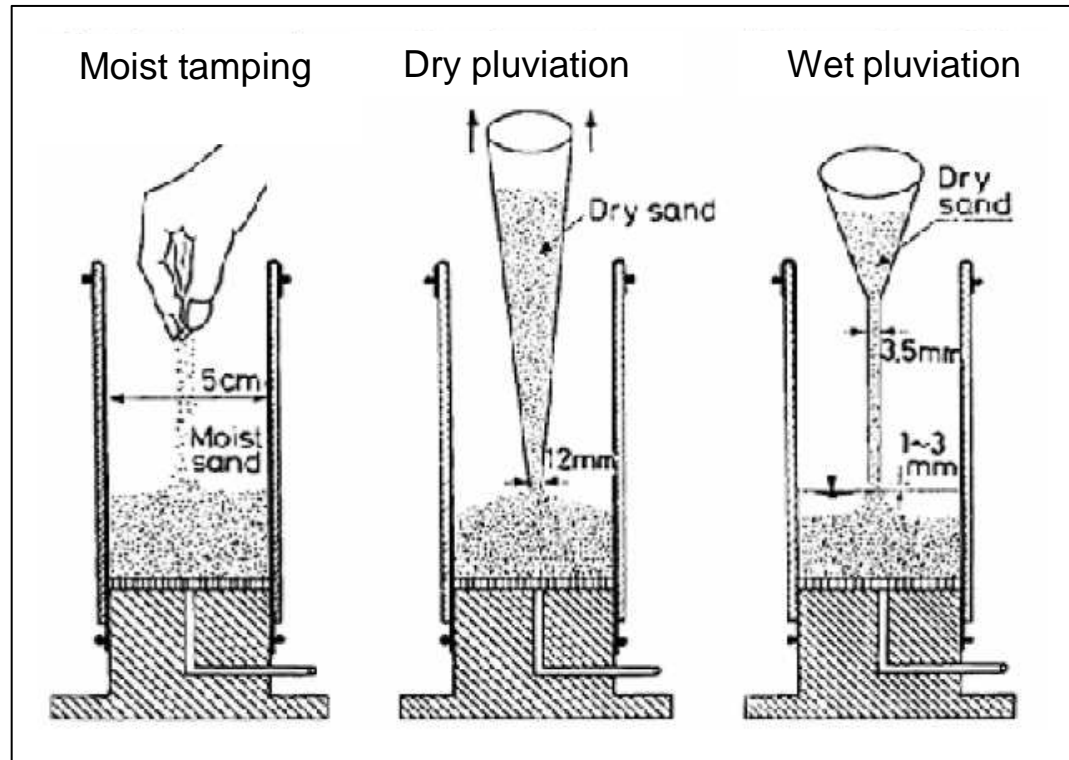
AGUA A ↑  
PRESIÓN



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>

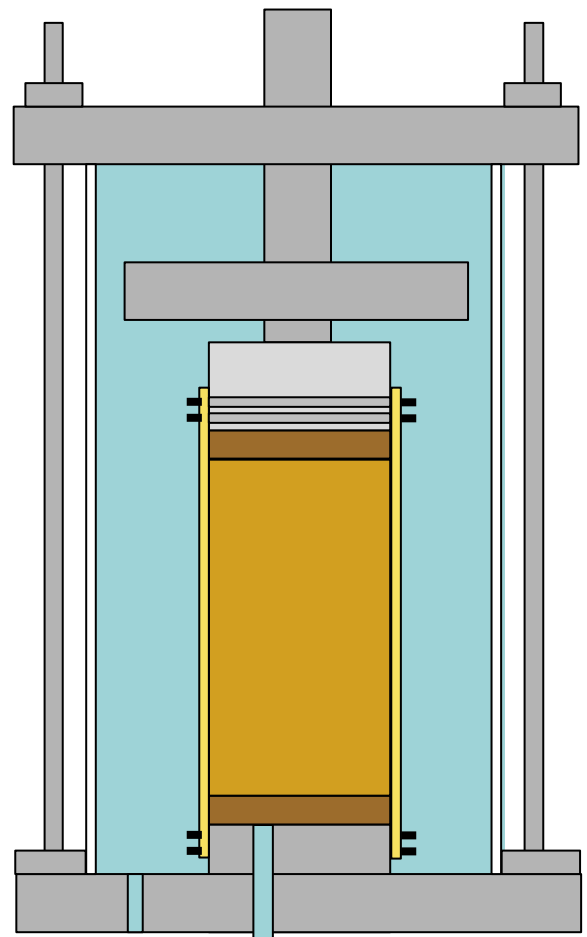
Deaireado de líneas de presión (duración 6min)

<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



PRESIÓN DE CÁMARA ↑

PRESIÓN DE POROS

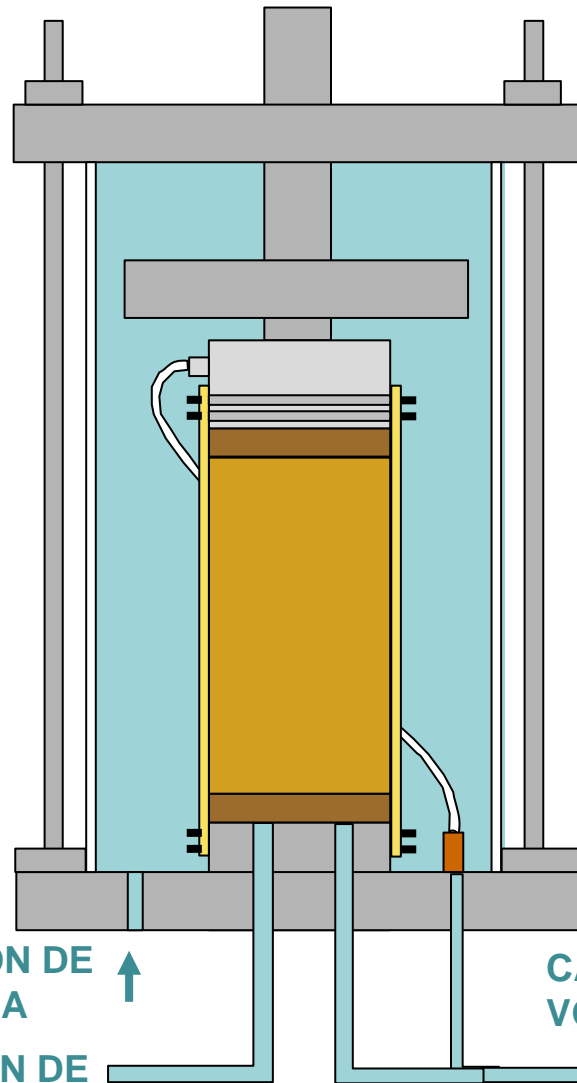
Medición de presión de poros y presión de cámara.

Manómetros digitales, mecánicos, bureta.





# Mediciones de cambio de volumen



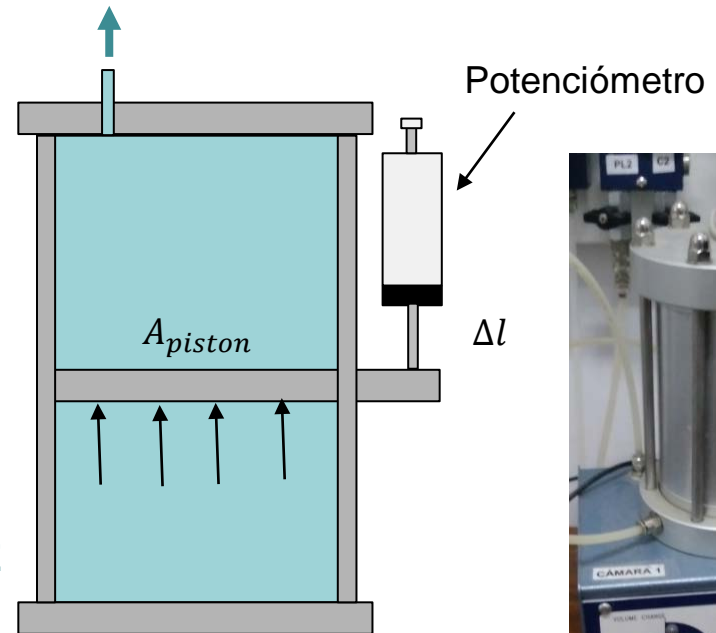
PRESIÓN DE CAMARA ↑

PRESION DE POROS

CAMBIO DE VOLUMEN

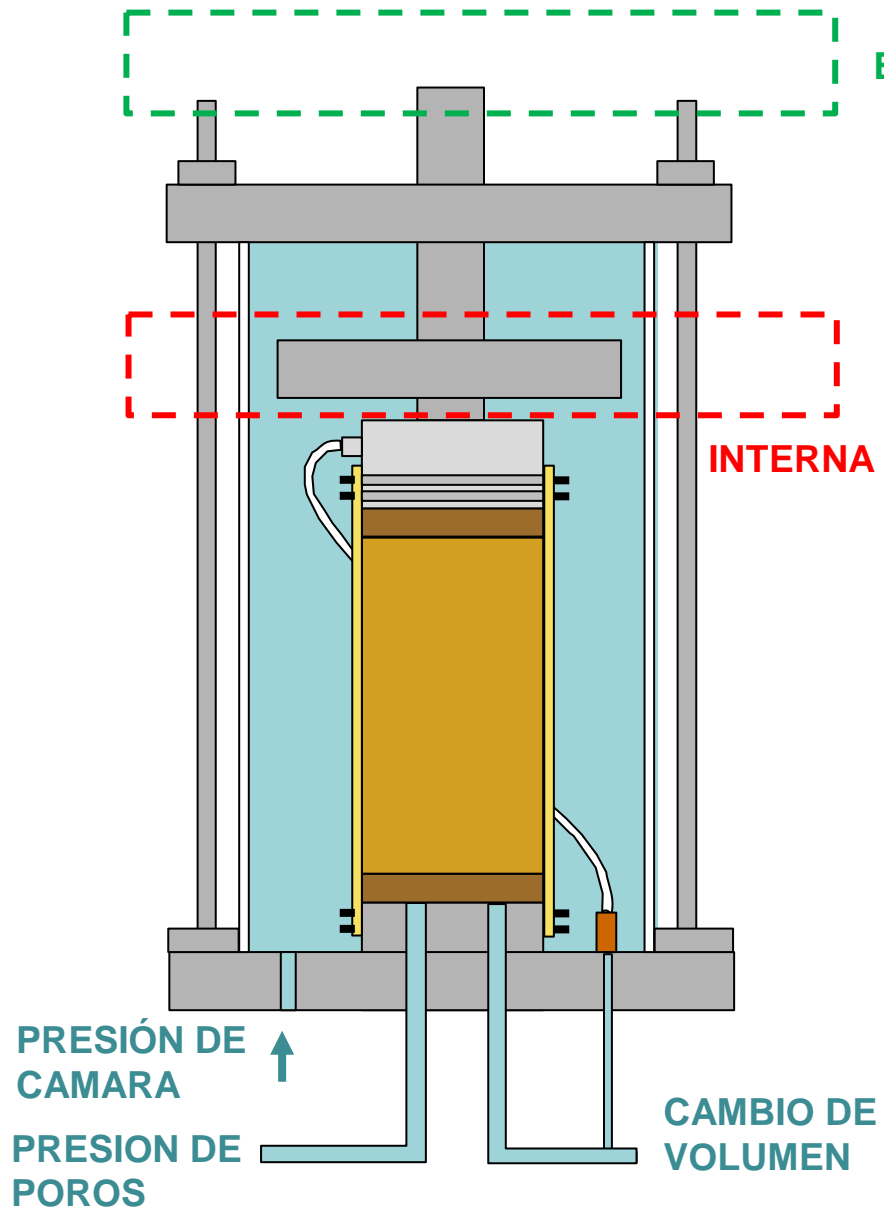
El cambio de volumen lo podemos calcular como:

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

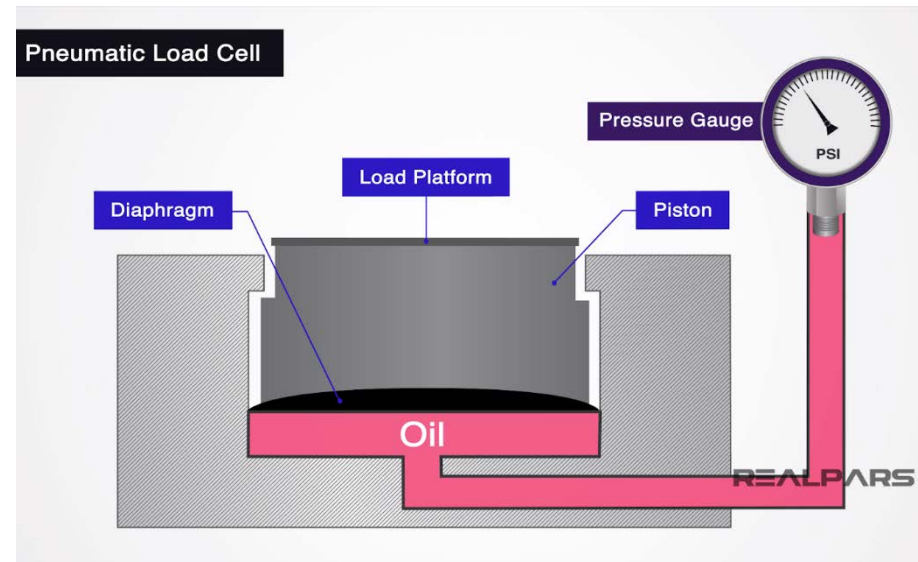




# Mediciones de carga axial

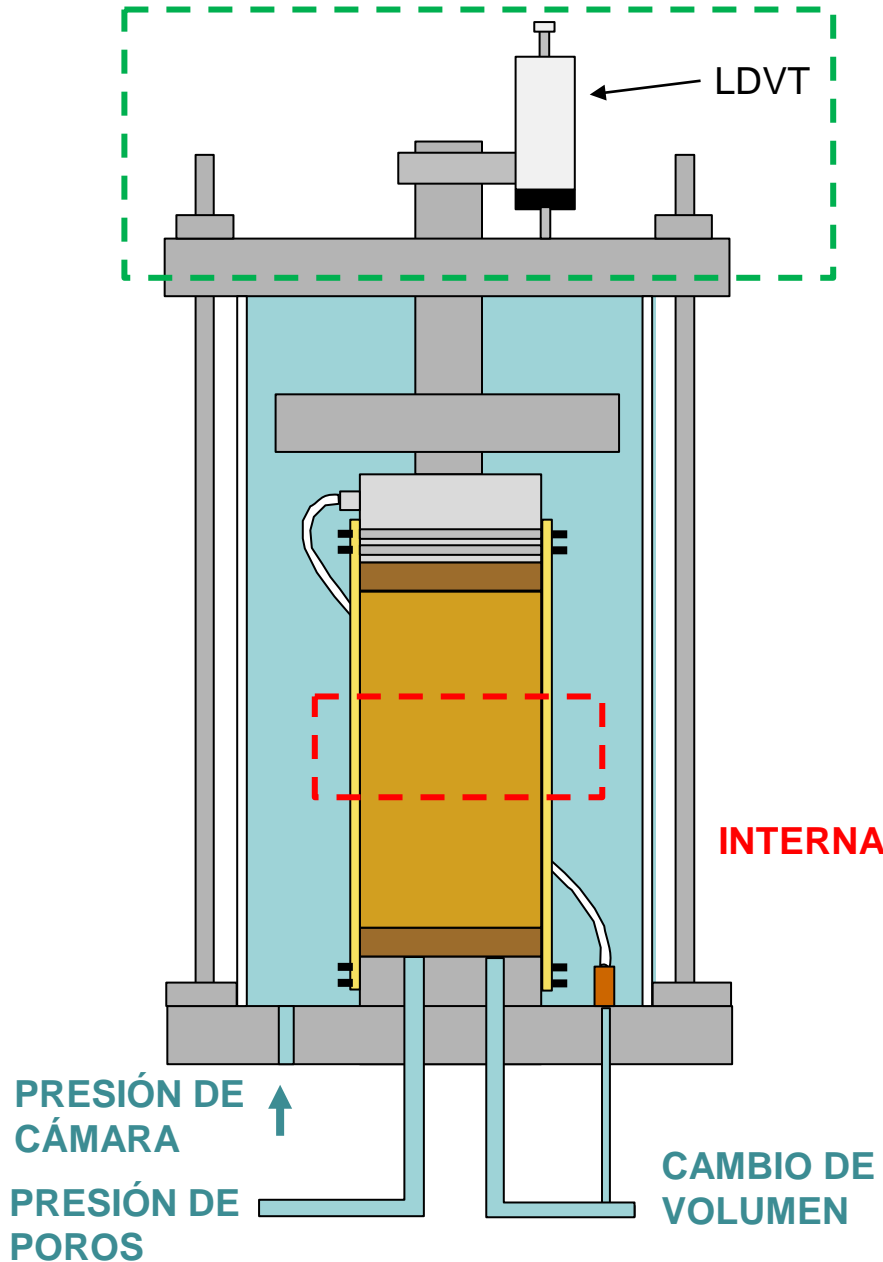


- Celda de carga, aro dinamométrico, etc
- Descontar fricción de vástago en **EXTERNA**



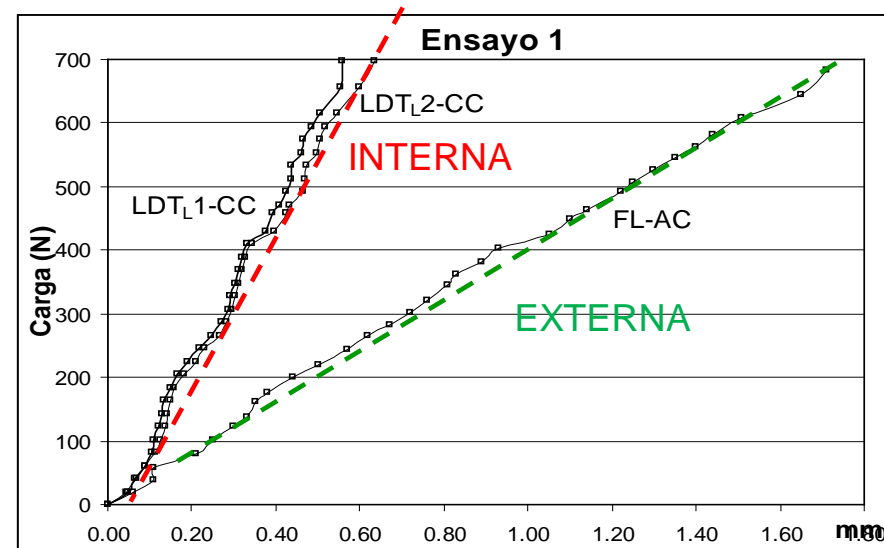


# Mediciones de deformación axial



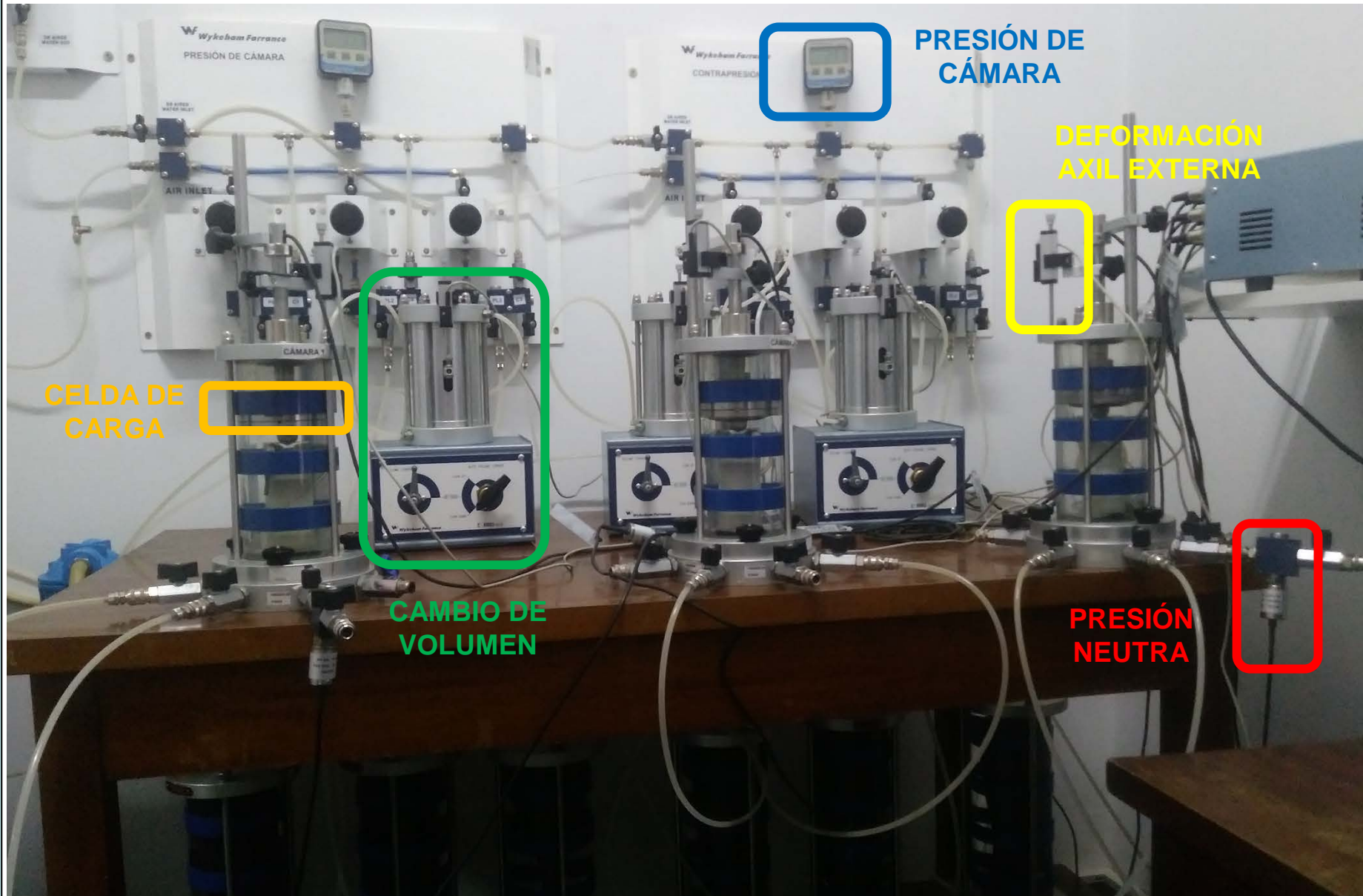
EXTERNA.

- Reloj comparador, LDVT, potenciómetros, relojes comparadores.



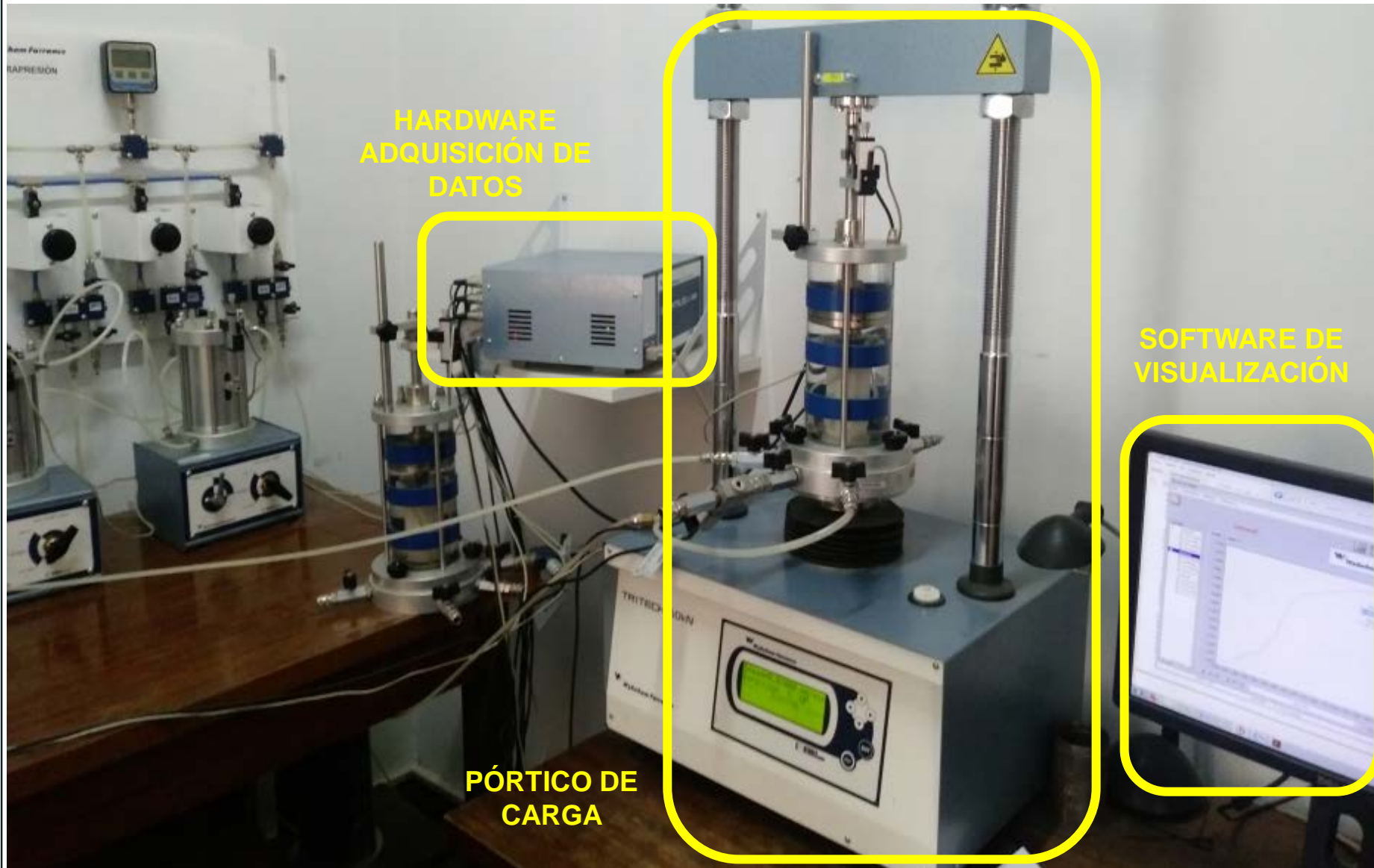


# Equipo triaxial semiautomático del LMS





# Equipo triaxial semiautomático del LMS



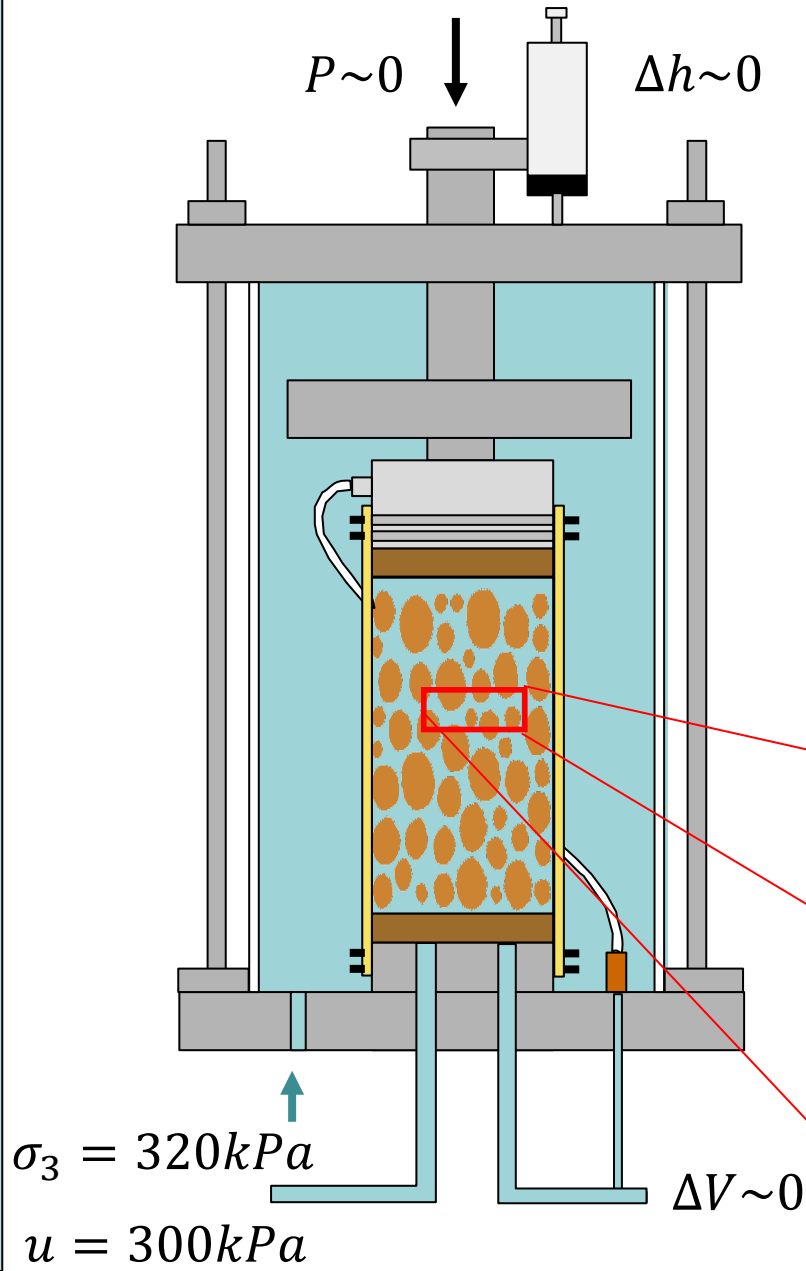
HARDWARE  
ADQUISICIÓN DE  
DATOS

SOFTWARE DE  
VISUALIZACIÓN

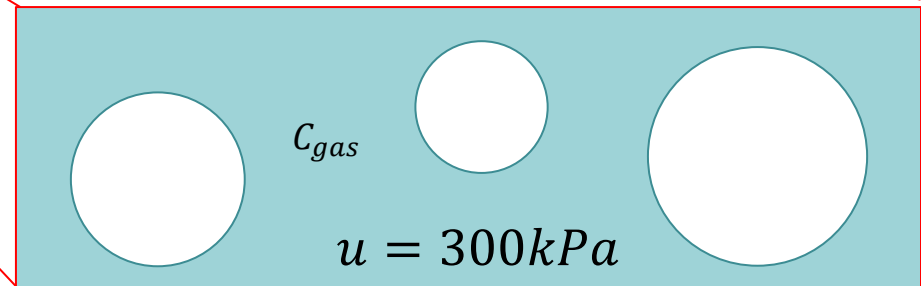
PÓRTICO DE  
CARGA



# Etapas del ensayo: 1<sup>o</sup> - saturación

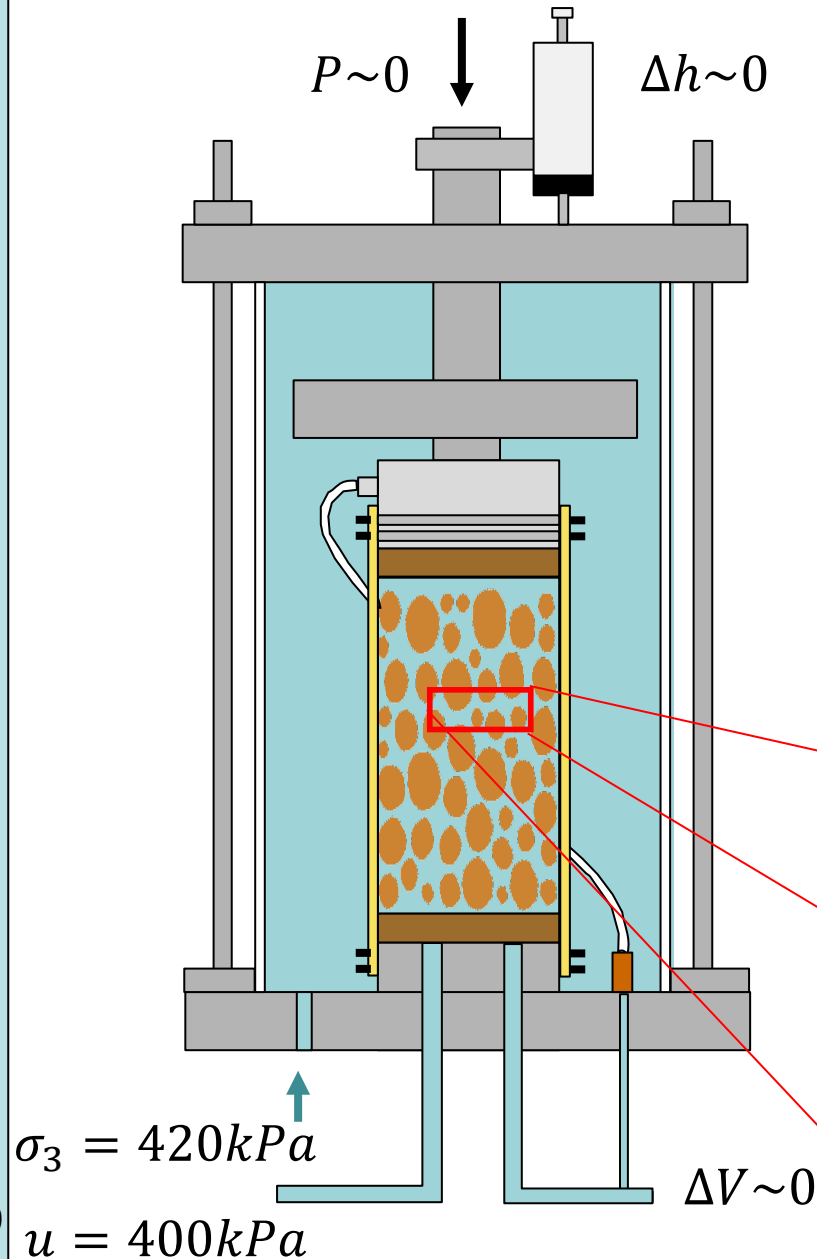


- El aire atrapado genera errores de medición.
- Necesitamos eliminar las burbujas de aire presentes en la muestra o disolverlas en el agua.
- Ley de Henry:  $p = C_{gas} \cdot k_H$





# Etapas del ensayo: 1<sup>o</sup> - saturación

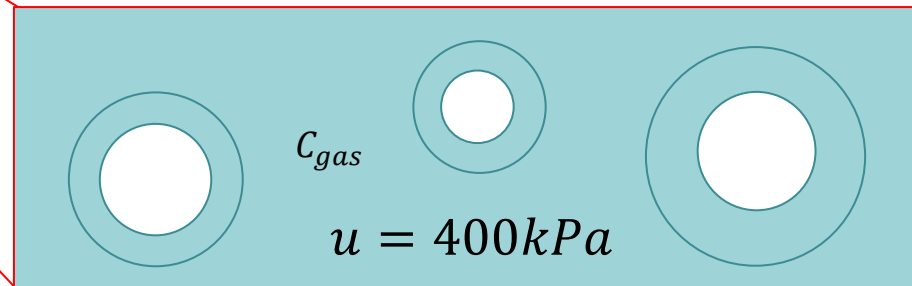


¿Cómo lo verificamos?

- Medimos el parámetro

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

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

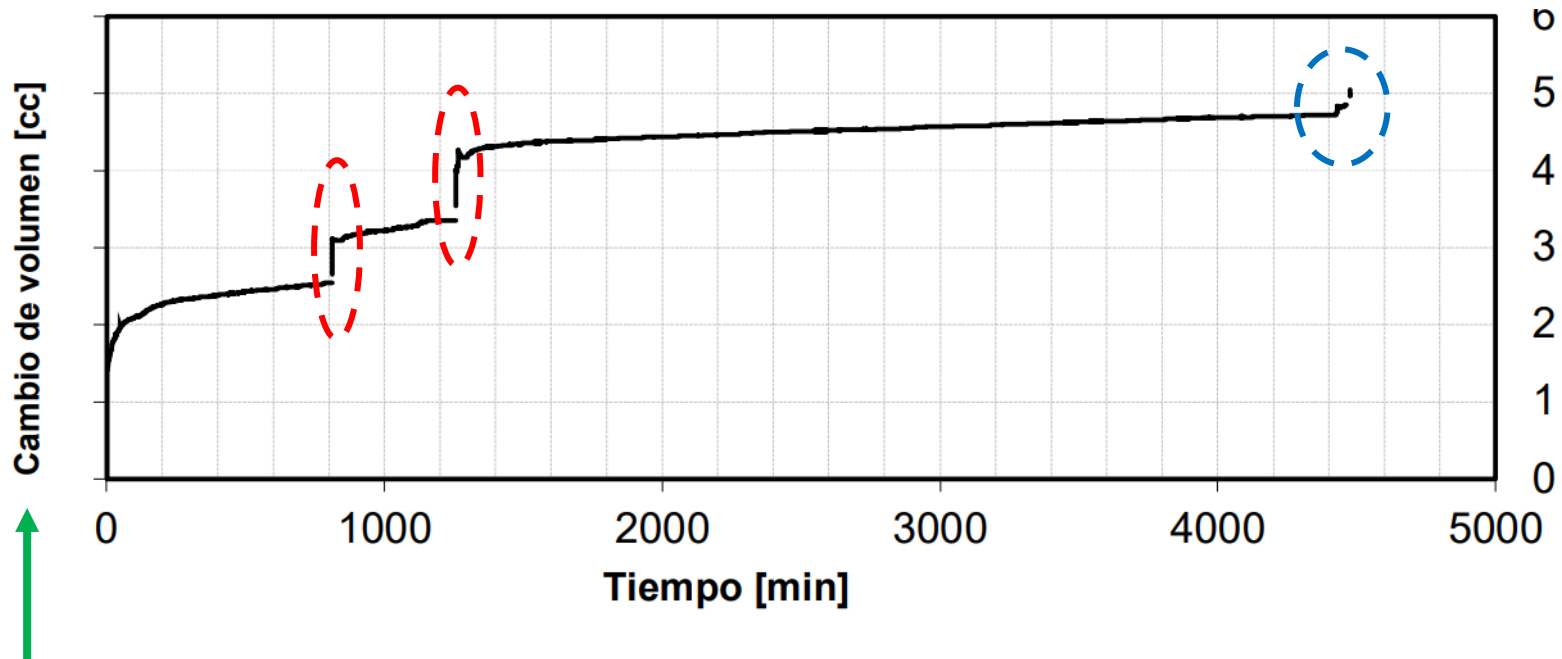




# Etapas en un ensayo triaxial: Saturación

**INCREMENTOS DE  
PRESIÓN**

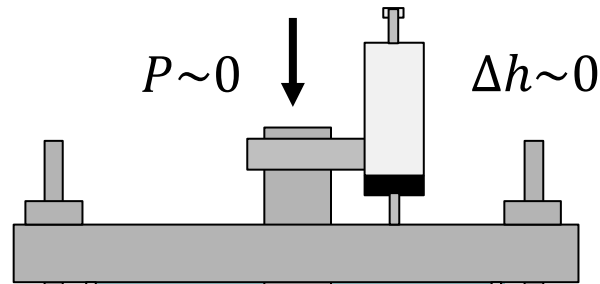
**ESCALONES PEQUEÑOS, LA  
MUESTRA ESTÁ  
PRACTICAMENTE SATURADA**



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



# Etapas del ensayo: 2º - consolidación



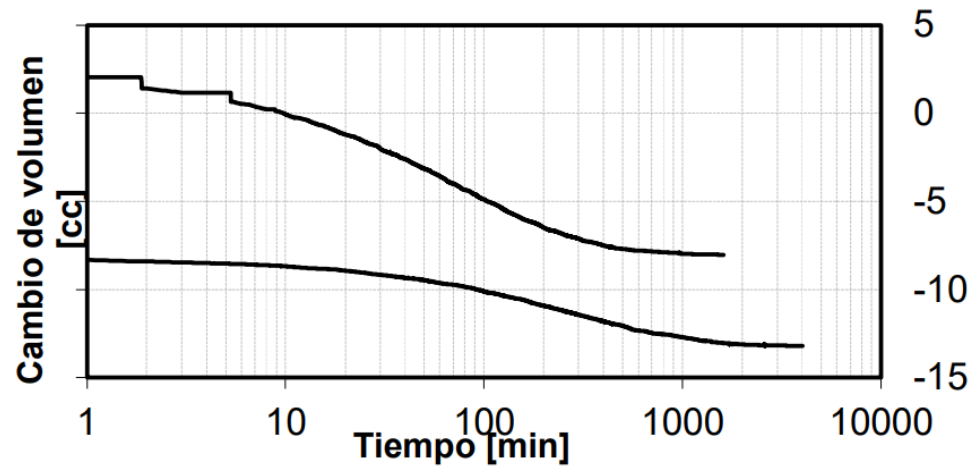
Incrementamos la presión de cámara  $\sigma_3$  para permitir que la muestra consolide isotrópicamente

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

$$\sigma_3 = 700kPa$$

$$u = 500kPa$$

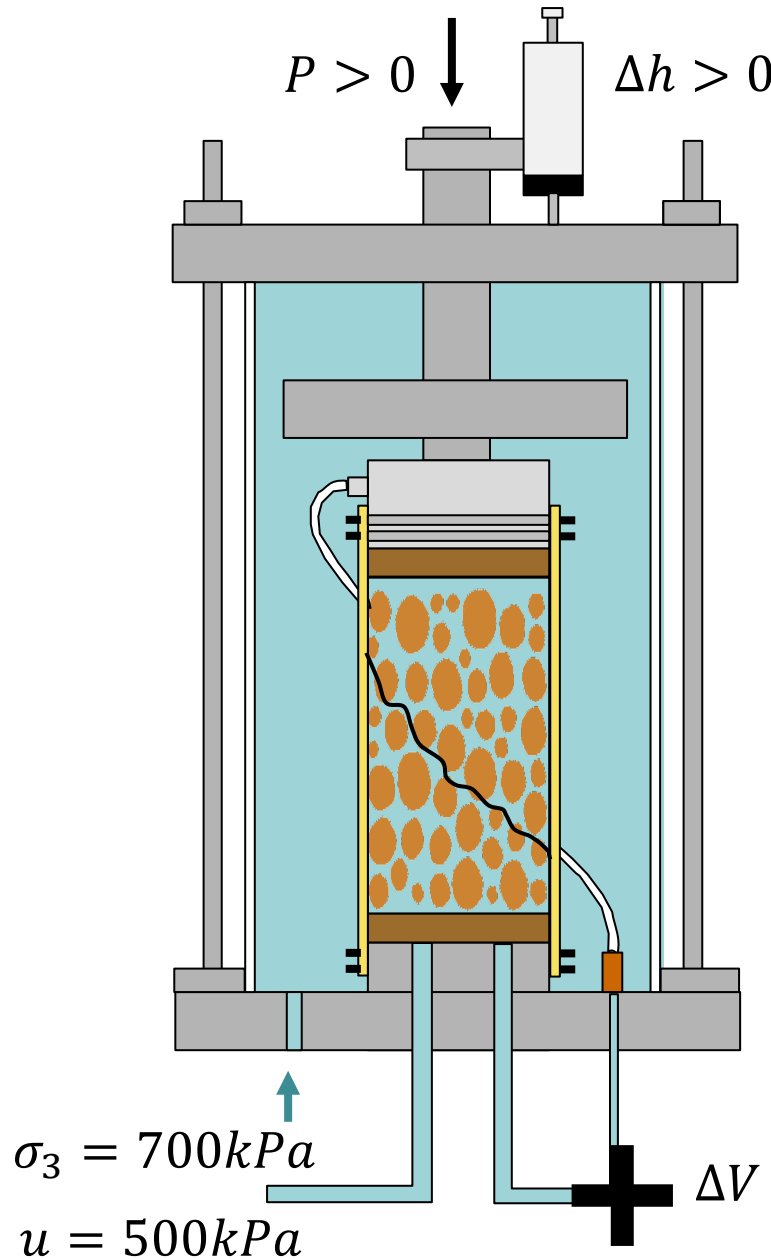
$$\Delta V > 0$$



Sin esta etapa, haríamos un ensayo Q



# Etapas del ensayo: 3<sup>o</sup> - 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:

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

$\epsilon_v$ : deformación volumétrica



# Recordemos

¿Qué medimos?

Carga  $P$ , Desplazamiento  $\Delta h$ , Presión de poros  $u$ , Presión de cámara  $\sigma_3$

¿Qué podemos calcular?

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

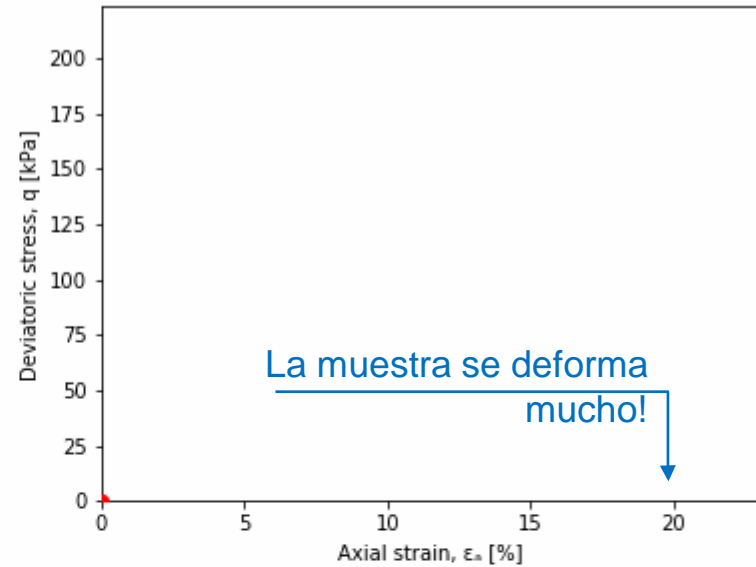
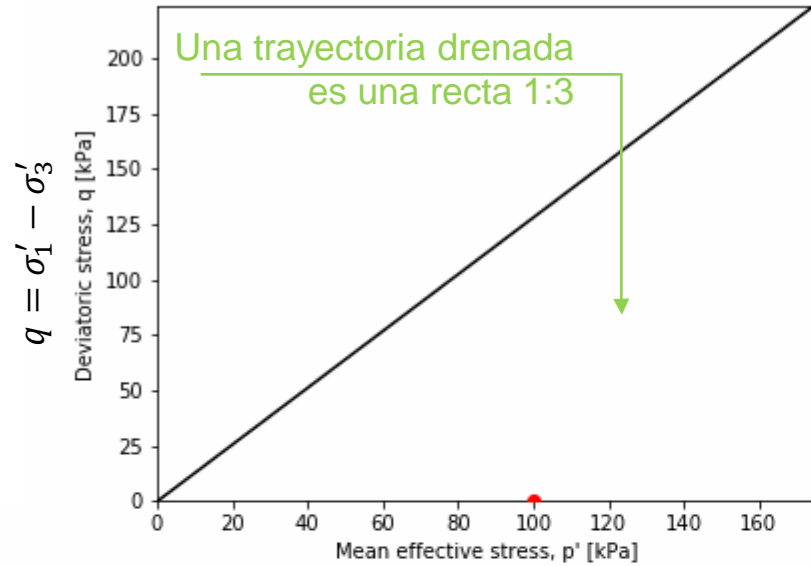
¿Qué parámetros podemos obtener?

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

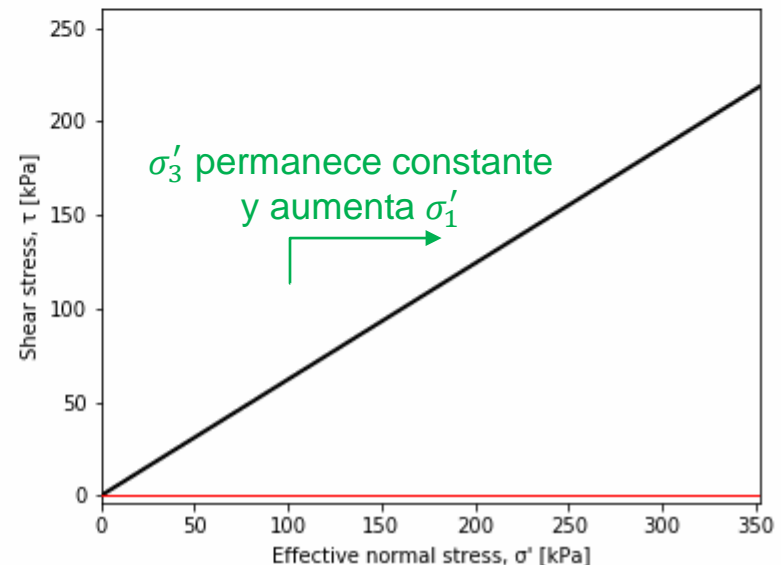
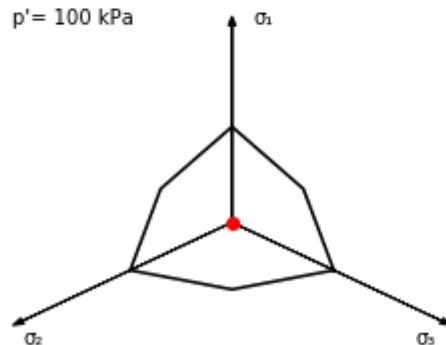


# Algunos resultados

## Arena suelta – consolidado drenado



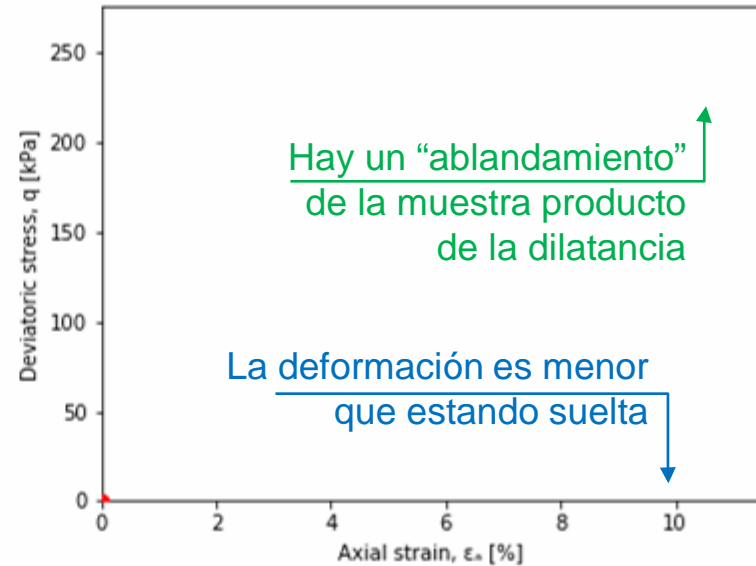
$$p' = \frac{1}{3} \cdot (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)$$



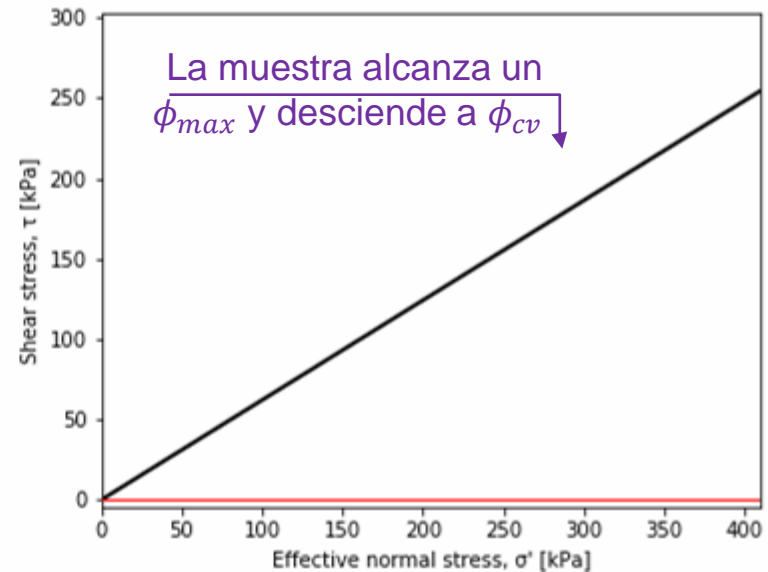
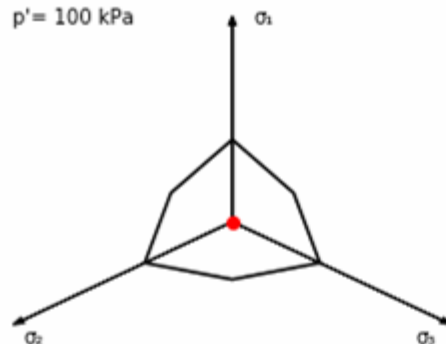


# Algunos resultados

## Arena densa – consolidado drenado



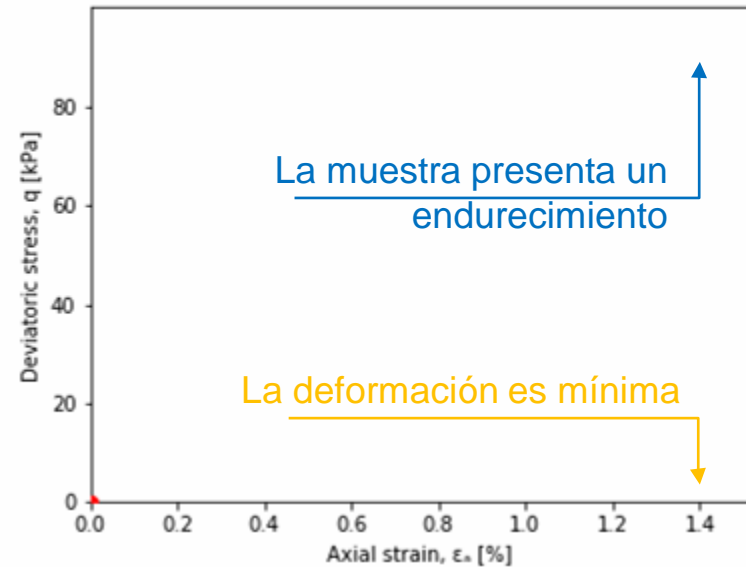
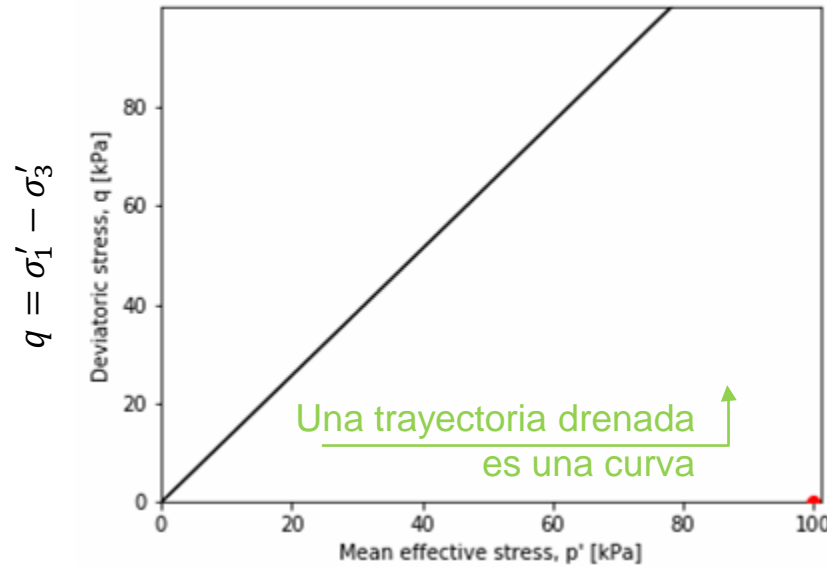
$$p' = \frac{1}{3} \cdot (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)$$



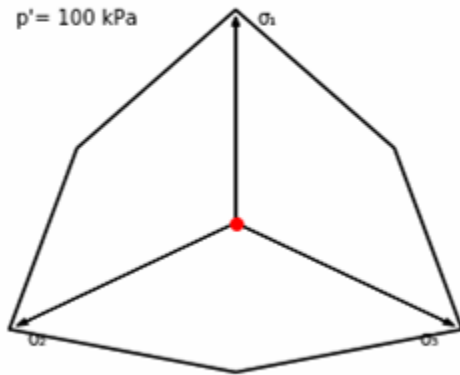


# Algunos resultados

## Arena densa – consolidado no drenado



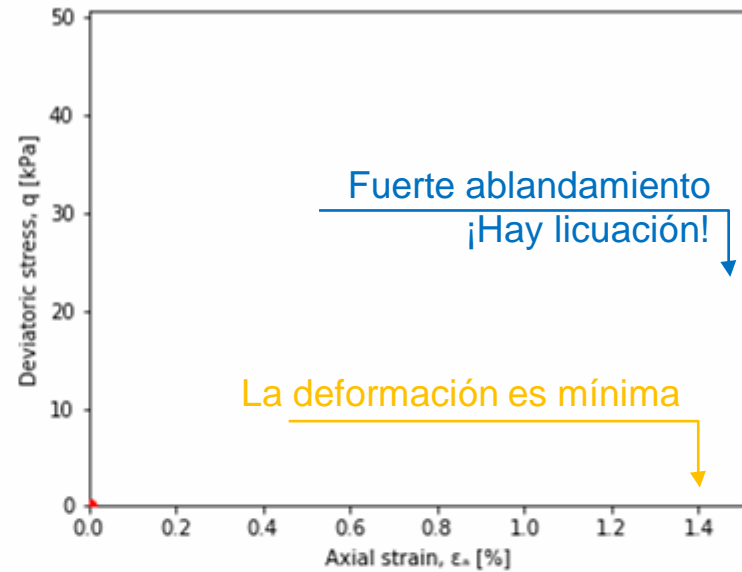
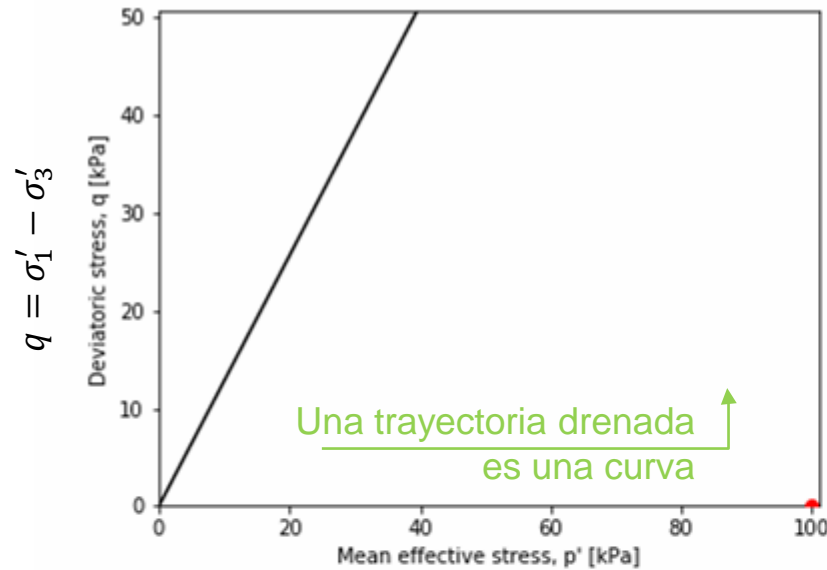
$$p' = \frac{1}{3} \cdot (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)$$



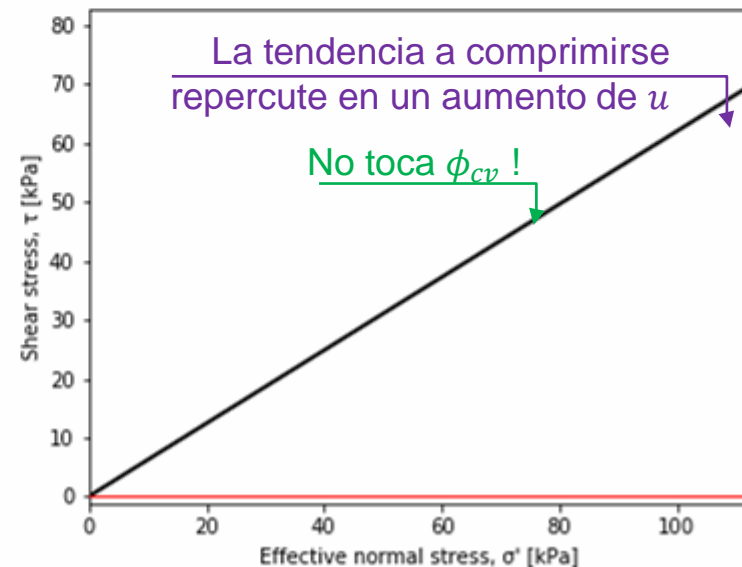
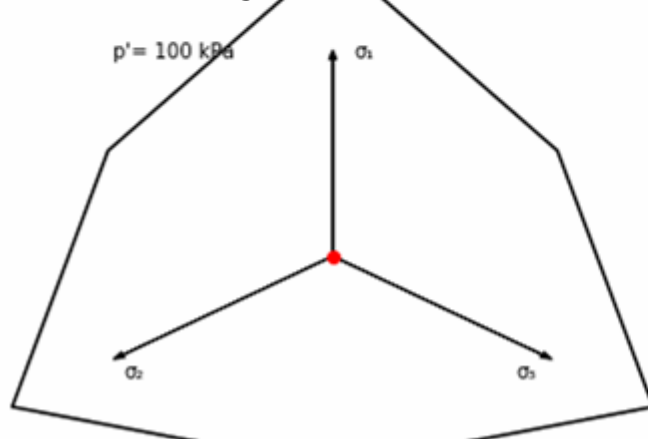


# Algunos resultados

## Arena suelta – consolidado no drenado

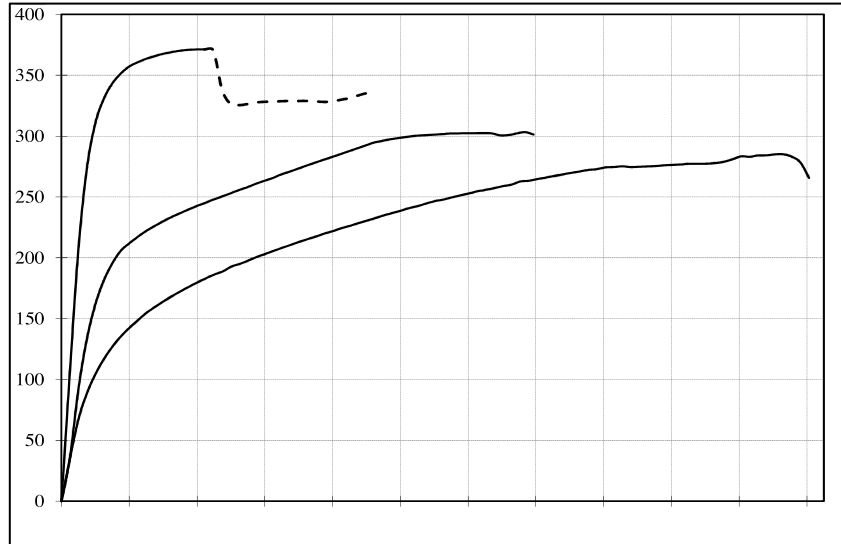


$$p' = \frac{1}{3} \cdot (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)$$





# Resultados de ensayos triaxiales S (arena monogranular, reconstituída)

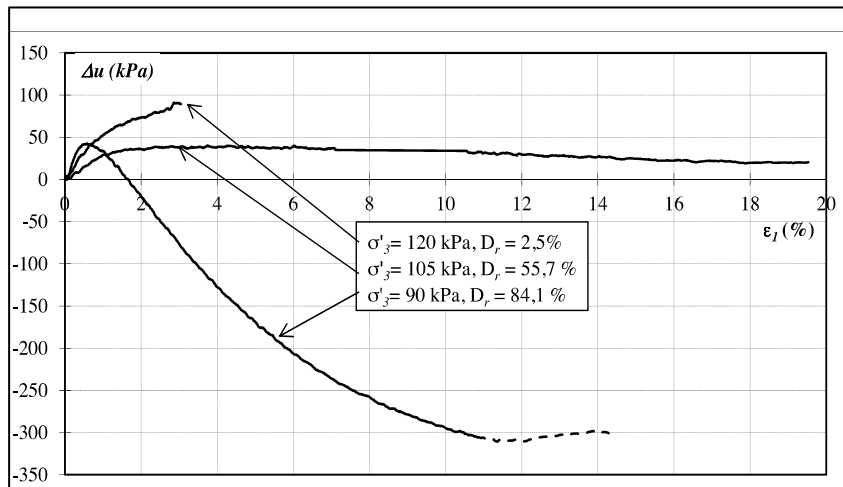
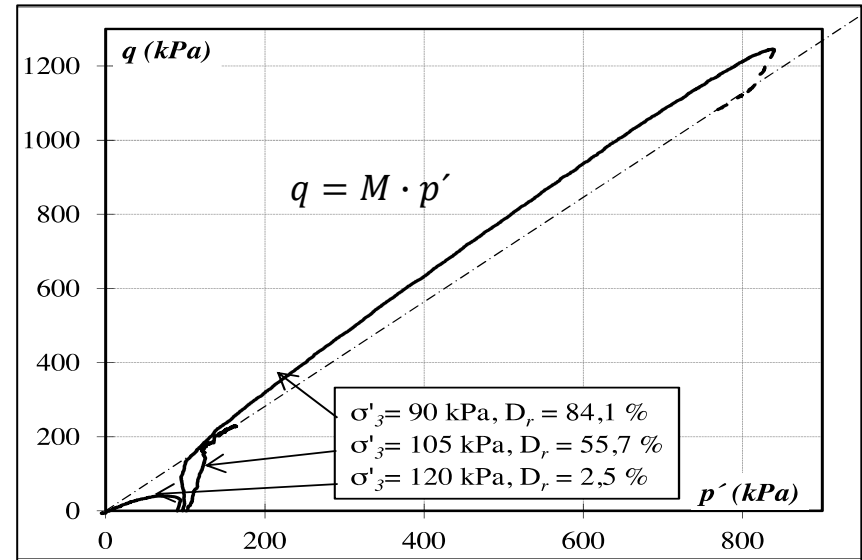
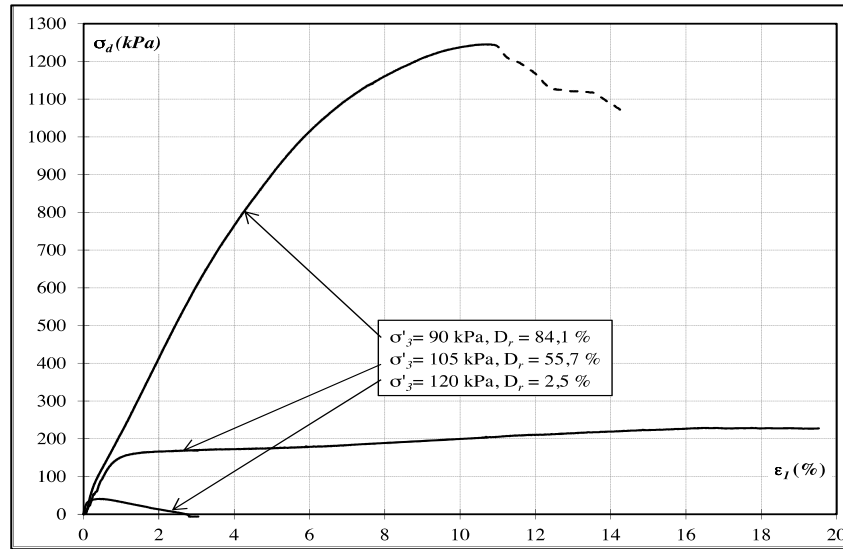


$$q = M \cdot p'$$

- $D_r \sim 85\% \rightarrow$  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)



- $D_r \sim 84\% \rightarrow \downarrow \Delta u$
- $D_r \sim 55 \text{ y } 3\% \rightarrow \uparrow \Delta u$
- $u_0 \neq 0 \text{ kPa}$  (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.