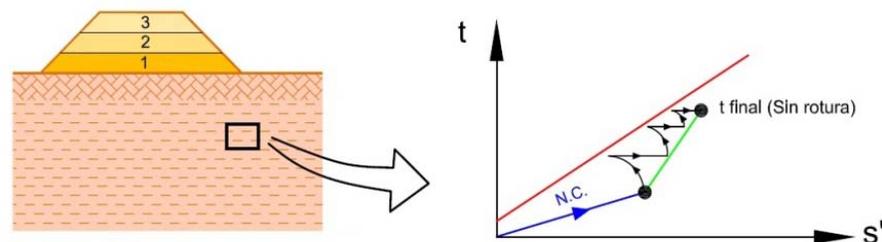




Laboratorio de la ETICCP. UPM



## RESISTENCIA AL CORTE (II)

Luis Ortuño

Uriel & Asociados, S.A.

lortuno@urielyasociados.es

E.T.S.I.C.C.P.

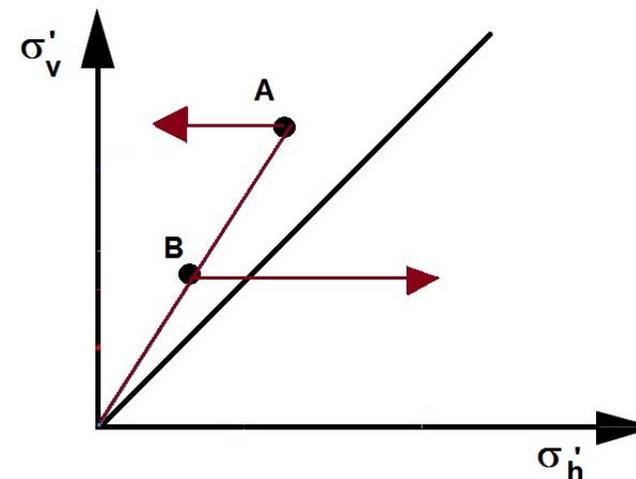
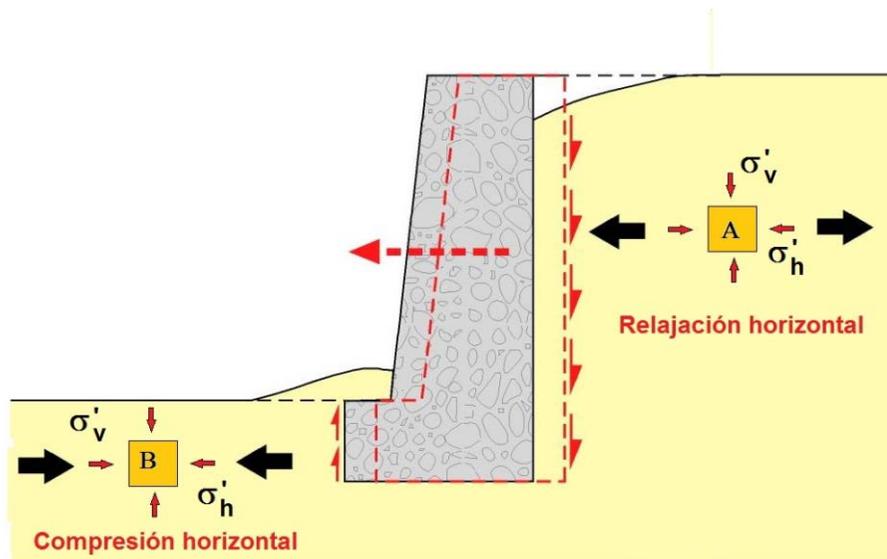
Universidad Politécnica de Madrid

luis.ortuno@upm.es

A menudo nos interesa representar cómo evoluciona el estado tensional del terreno a lo largo de un proceso de carga. El dibujar sucesivos círculos de Mohr puede ser muy engorroso (se solapan unos con otros, se cruzan, cambian de tamaño, etc), de manera que frecuentemente empleamos otro tipo de representación de algunas variables tensionales adecuadas para el problema en estudio. A continuación veremos algunos ejemplos.

Un primer ejemplo muy intuitivo es el de los empujes sobre los muros. En la primera figura se muestra que, a medida que el muro se desplaza hacia el exterior, los elementos de suelo situados en su trasdós (A) tienden a relajarse horizontalmente, o lo que es lo mismo, a sufrir una reducción progresiva de sus presiones efectivas horizontales ( $\sigma'_h$ ). Sin embargo las tensiones verticales ( $\sigma'_{v0}$ ) permanecen prácticamente invariables (se mantiene el peso de tierras por encima del elemento). Partiendo de un estado inicial con  $\sigma'_{v0} > \sigma'_{h0}$ , en la segunda figura se muestra el recorrido tensional del elemento A en el “espacio de tensiones” ( $\sigma'_v$ ,  $\sigma'_h$ ).

Siguiendo el mismo razonamiento, junto al pie del muro (elemento B), el terreno sufrirá una compresión horizontal, aumentando principalmente las tensiones efectivas horizontales pero manteniéndose las verticales.



# RECORRIDOS DE TENSIONES

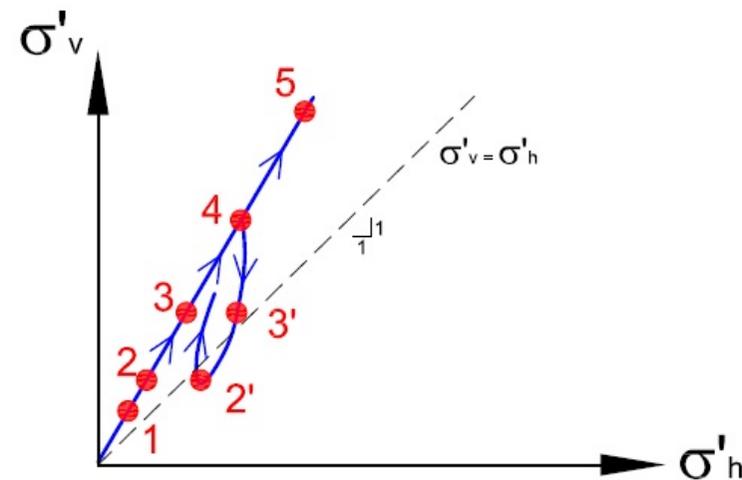
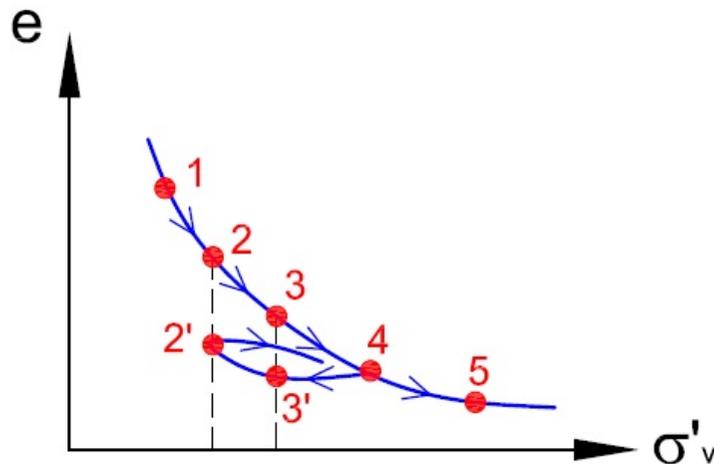
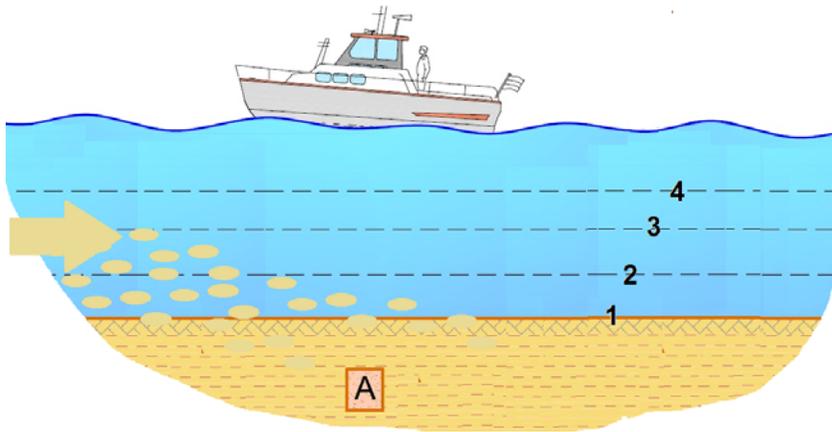
Un segundo ejemplo sencillo es la historia tensional de un suelo en condiciones unidimensionales o edométricas, que a medida que se sedimenta o se erosiona va pasando de estados normalmente consolidados a sobreconsolidados, y viceversa (una arcilla marina, por ejemplo).

$$\sigma'_{h0} = K_0 \cdot \sigma'_{v0}$$

$$K_0^{NC} = 1 - \text{sen} \phi'$$

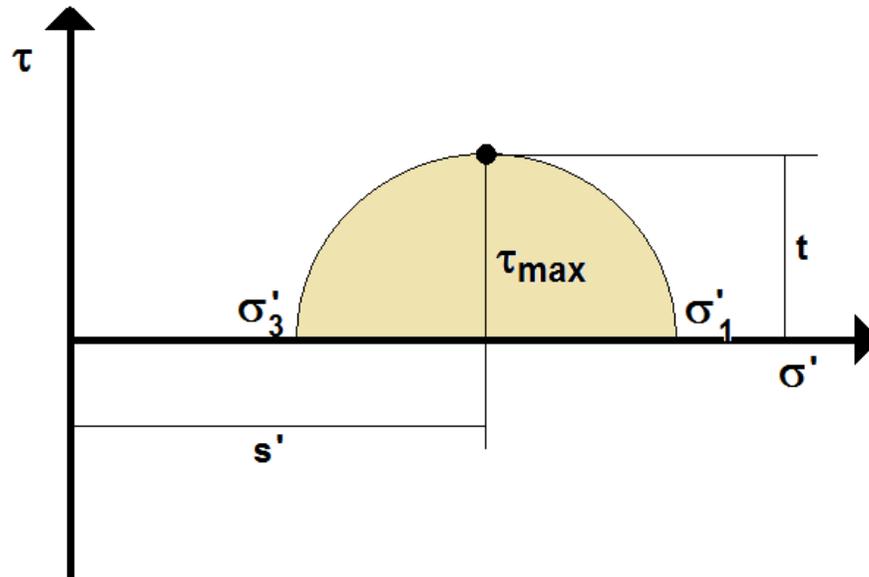
$$K_0^{oc} = K_0^{NC} \cdot \text{OCR}^{\text{sen} \phi'}$$

$$\text{OCR} = \frac{\sigma'_{v \text{ máxima}}}{\sigma'_{v0}}$$



## LAS VARIABLES TENSIONALES $s'$ y $t$

Como se ha indicado, en un proceso de carga los círculos de Mohr cambian continuamente, con lo que su representación puede ser confusa. Para dibujar estos procesos en un gráfico es más cómodo representar solamente las cúspides de los círculos de Mohr. Este tipo de representación se comenzó a emplear en el MIT (Prof. Lambe)



$$s' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}$$

$$t = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}$$

Como de costumbre;

$$s = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}; \quad s' = s - u; \quad t' = t$$

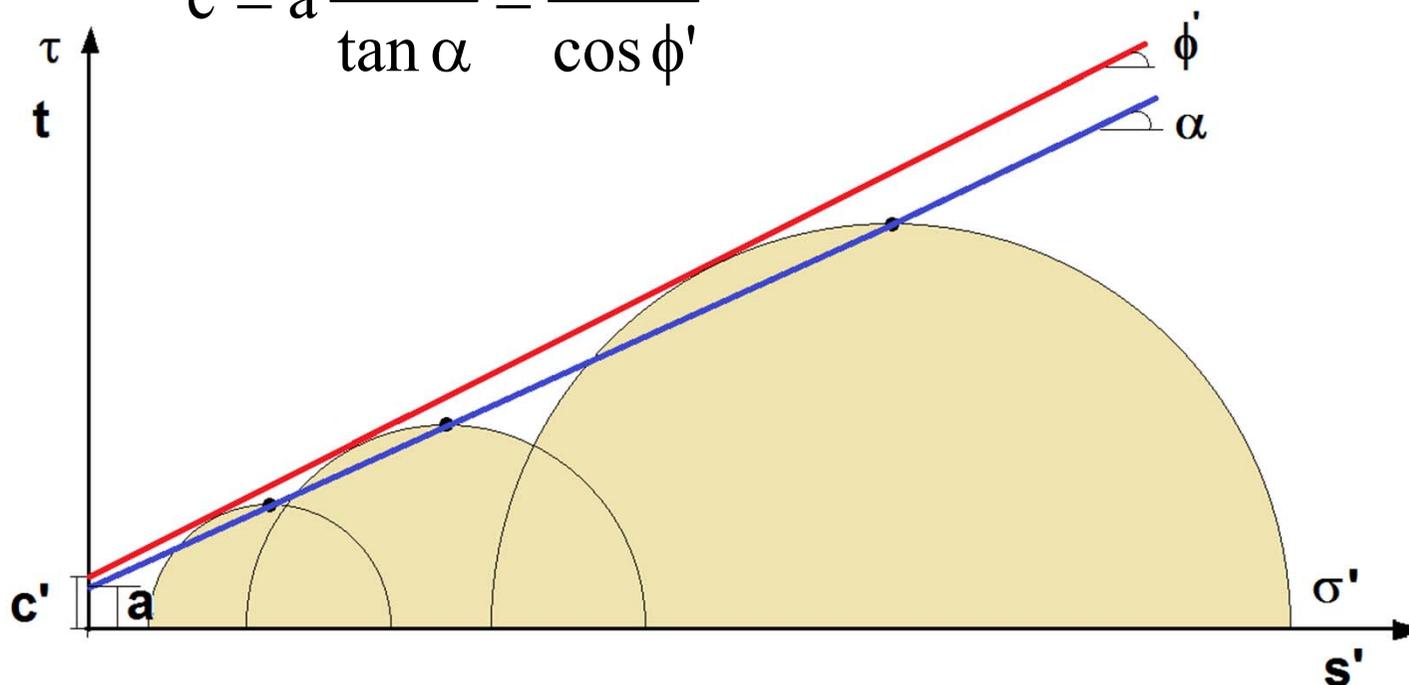
## LAS VARIABLES TENSIONALES ( $s'$ , $t$ ) Y LA ENVOLVENTE DE ROTURA DE COULOMB

Evidentemente la recta de tangencia a los círculos de Mohr no es la misma que la recta que une las cúspides de dichos círculos, pero están relacionadas.

Es fácil deducir que los parámetros de rotura de Coulomb en el espacio tensional ( $s'$ ,  $t$ ) son:

$$\text{sen } \alpha = \tan \phi'$$

$$c' = a \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} = \frac{a}{\cos \phi'}$$



# EJERCICIO A RESOLVER POR LOS ALUMNOS

## LAS VARIABLES TENSIONALES $s'$ y $t$

EJEMPLO 1: Representar un proceso de carga en el que, partiendo de un estado isótropo  $\sigma'_1 = \sigma'_3 = a$ , se mantenga constante  $\sigma'_3$  y se aumente progresivamente  $\sigma'_1$ .

### 1.- Estado inicial:

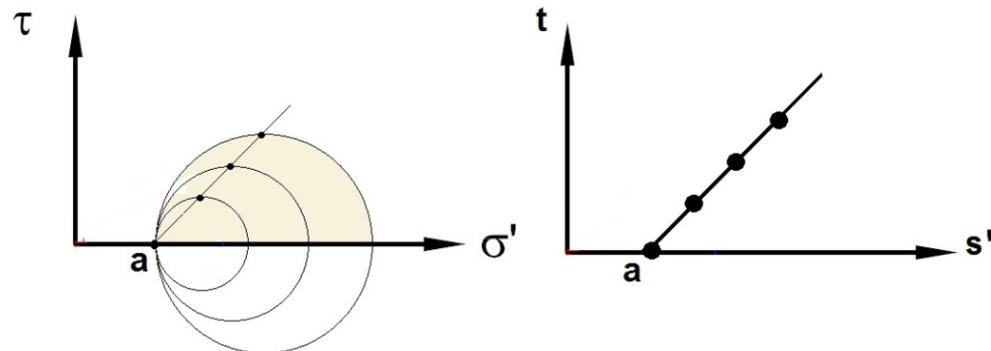
$$s'_0 = \frac{a + a}{2} = a; \quad t = \frac{a - a}{2} = 0$$

### 2.- Incrementos tensionales en el proceso de carga

$$\sigma'_3 = \text{cte} \Rightarrow \Delta\sigma'_3 = 0$$
$$\Delta s' = \frac{\Delta\sigma'_1 + \Delta\sigma'_3}{2} = \frac{\Delta\sigma'_1}{2}$$
$$\Delta t = \frac{\Delta\sigma'_1 - \Delta\sigma'_3}{2} = \frac{\Delta\sigma'_1}{2}$$

### 3.- Pendiente del recorrido de tensiones buscado

$$\frac{\Delta t}{\Delta s'} = \frac{\frac{\Delta\sigma'_1}{2}}{\frac{\Delta\sigma'_1}{2}} = 1$$



# EJERCICIO A RESOLVER POR LOS ALUMNOS

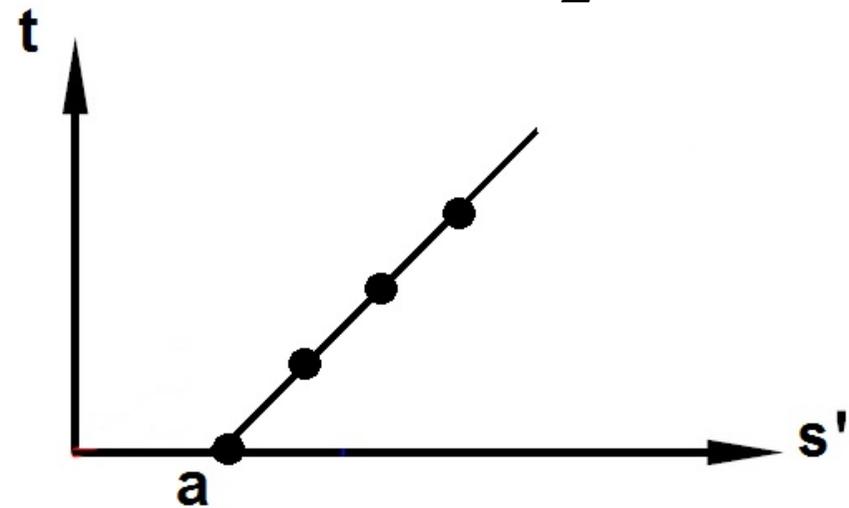
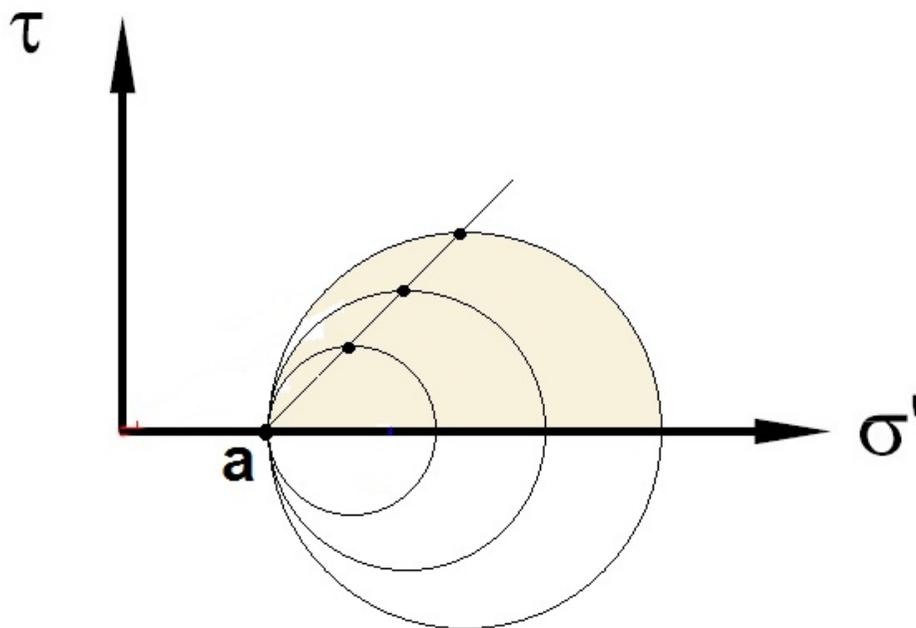
## LAS VARIABLES TENSIONALES $s'$ y $t$

EJEMPLO 1: Representar un proceso de carga en el que, partiendo de estado isótopo  $\sigma'_1 = \sigma'_3 = a$ , se mantenga constante  $\sigma'_3$  y se aumente progresivamente  $\sigma'_1$ .

$$\frac{\Delta t}{\Delta s'} = 1$$

$$s' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}$$

$$t = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}$$



## LAS VARIABLES TENSIONALES $s'$ y $t$

**EJEMPLO 2:** Partiendo de tensiones nulas y admitiendo que las tensiones efectivas verticales y horizontales son tensiones principales, determinar la pendiente del recorrido de tensiones en el espacio tensional ( $s'$ ,  $t$ ) para un proceso de consolidación normal  $K_0$ .

### 1.- Estado inicial:

$$\sigma'_v = \sigma'_h = 0 \Rightarrow s'_0 = \frac{0+0}{2} = 0; \quad t = \frac{0-0}{2} = 0$$

### 2.- Incrementos tensionales en el proceso de carga

$$\sigma'_h = K_0 \sigma'_v \rightarrow \Delta \sigma'_h = K_0 \Delta \sigma'_v$$
$$\Delta s' = \frac{\Delta \sigma'_v + \Delta \sigma'_h}{2} = \frac{\Delta \sigma'_v + K_0 \Delta \sigma'_v}{2} = \frac{1 + K_0}{2} \Delta \sigma'_v$$
$$\Delta t' = \frac{\Delta \sigma'_v - \Delta \sigma'_h}{2} = \frac{\Delta \sigma'_v - K_0 \Delta \sigma'_v}{2} = \frac{1 - K_0}{2} \Delta \sigma'_v$$

### 3.- Pendiente del recorrido de tensiones buscado

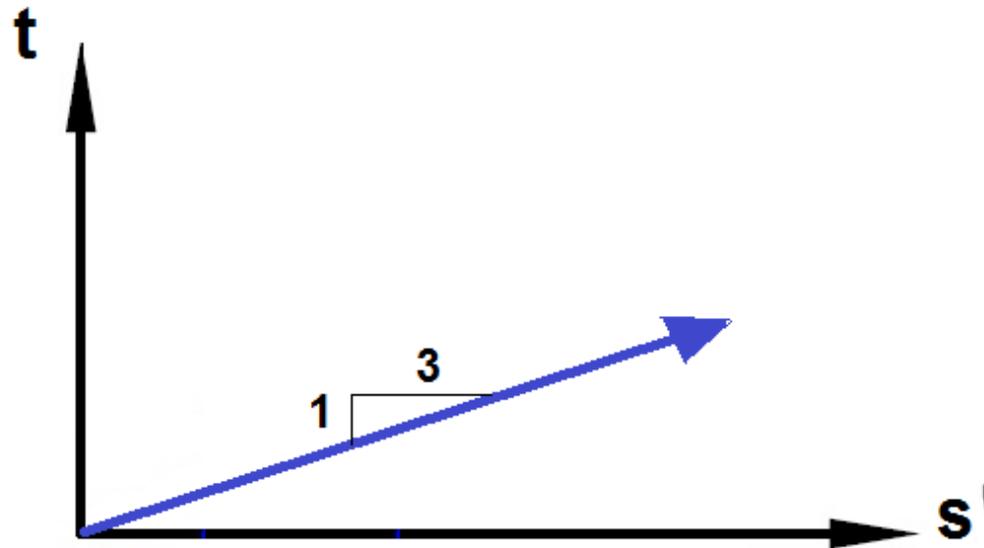
$$\frac{\Delta t}{\Delta s'} = \frac{\frac{1 - K_0}{2} \Delta \sigma'_v}{\frac{1 + K_0}{2} \Delta \sigma'_v} = \frac{1 - K_0}{1 + K_0}$$

# EJERCICIO A RESOLVER POR LOS ALUMNOS

## LAS VARIABLES TENSIONALES $s'$ y $t$

**EJEMPLO 3:** En el caso anterior, dibujar el recorrido de tensiones para  $K_0=0.5$

$$\frac{\Delta t}{\Delta s'} = \frac{1 - K_0}{1 + K_0} = \frac{1 - 0.5}{1 + 0.5} = \frac{0.5}{1.5} = \frac{1}{3}$$

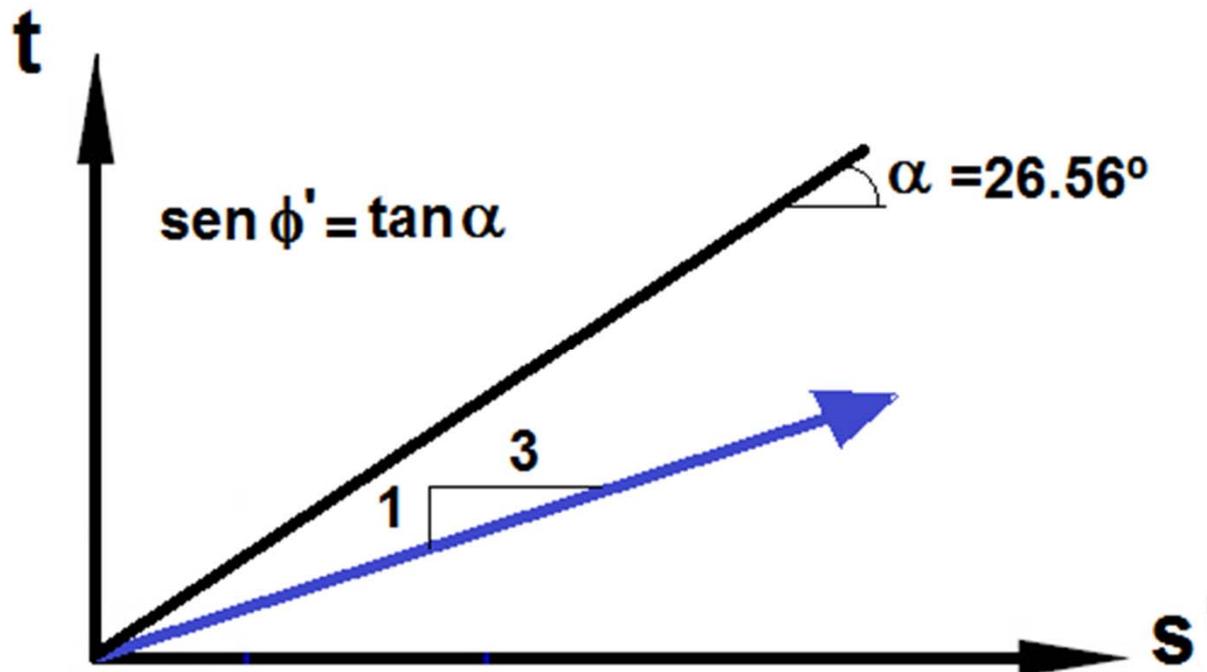


## LAS VARIABLES TENSIONALES $s'$ y $t$

**EJEMPLO 4:** Suponiendo que la cohesión efectiva es nula, dibujar también la envolvente de rotura en el espacio ( $s'$ ,  $t$ ):

$$K_0^{NC} = 1 - \text{sen}\phi' \rightarrow \phi' = \arcsen(1 - 0.5) \rightarrow \phi' = 30^\circ$$

$$\alpha = \arctan(\text{sen}30') = 26.56^\circ$$



## LAS VARIABLES TENSIONALES ( $p'$ , $q$ )

Otra forma de representar recorridos de tensiones, más potente que la anterior ya que incluye también a la tensión principal intermedia, es la denominada notación de Cambridge.

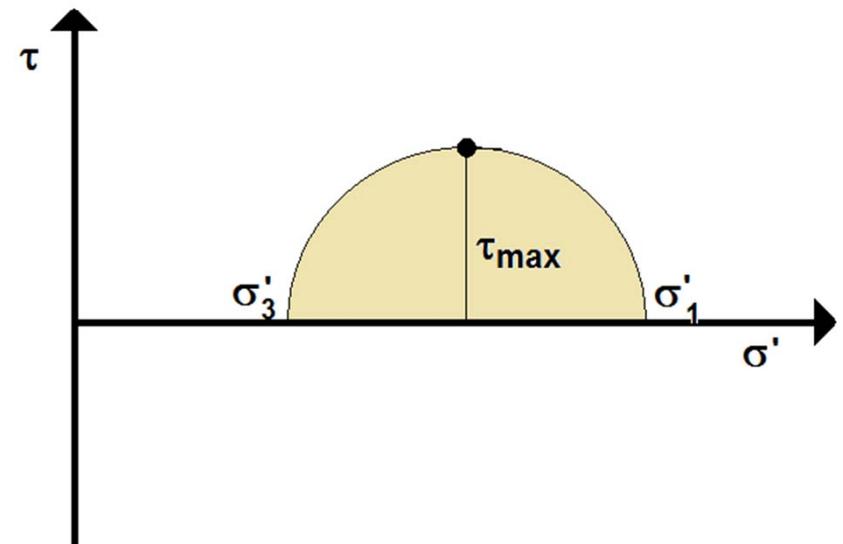
- La primera variable,  $p'$  o  $p$ , es simplemente la presión media (total o efectiva), esto es, la media aritmética de las tensiones principales (totales o efectivas)

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}; \quad p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3}$$

$$p' = p - u$$

- La segunda variable,  $q$  es el diámetro del círculo de Mohr, es decir, el doble de la tensión tangencial máxima. Comúnmente en el ensayo triaxial se le llama “desviador”:
- Como siempre, dado que el agua no soporta tensiones de corte, el desviador es el mismo en tensiones totales que en efectivas

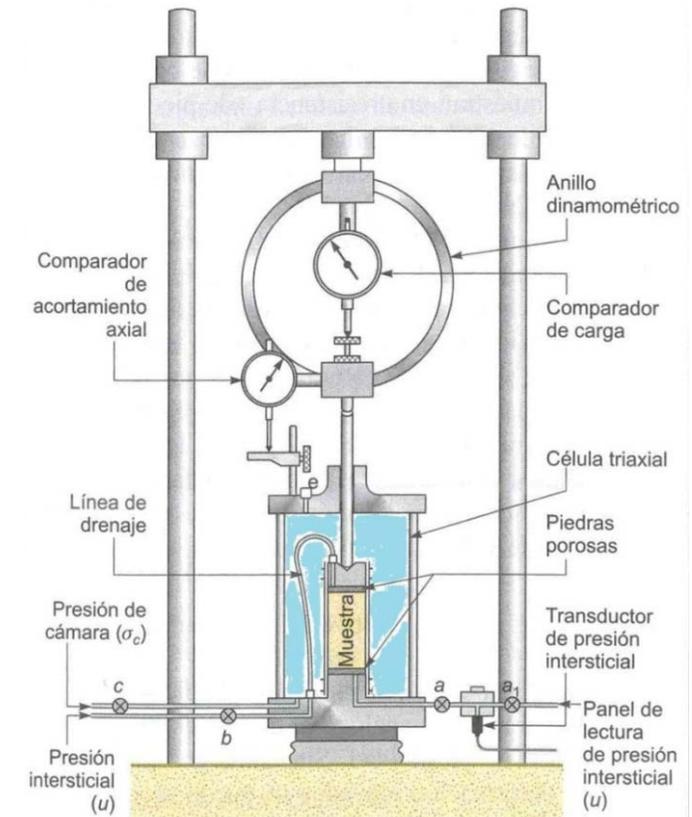
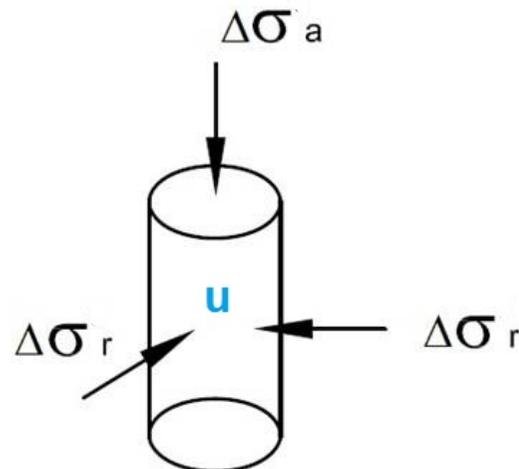
$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3 = \sigma_1 - \sigma_3$$



# EL ENSAYO TRIAXIAL

Es un ensayo de corte versátil que permite obtener información sobre la resistencia de los suelos en muy diversas condiciones controlables a voluntad. Sus características básicas son:

- Se ensayan muestras cilíndricas de suelo, con altura doble del diámetro. Lo más normal es ensayar muestras saturadas (una de las fases del ensayo es comprobar la saturación).
- Se pueden aplicar a la muestra tres tensiones normales con simetría axial.
  - Una en dirección vertical (o axial):  $\sigma_v$  ó  $\sigma_a$
  - Dos iguales en dirección horizontal (o radial):  $\sigma_h$  ó  $\sigma_r$
- Se pueden aplicar y medir presiones intersticiales en el interior de la probeta:  $u$



Tomada de González Vallejo, L. et al (2000)

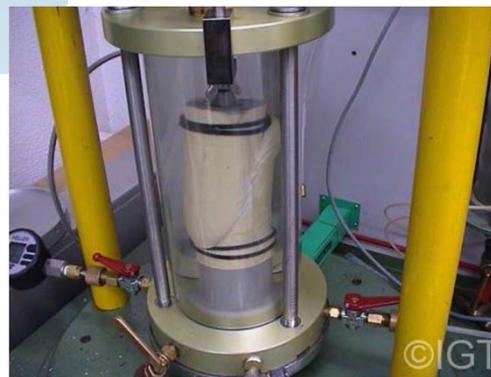
# EL ENSAYO TRIAXIAL

Cada probeta se rodea con una fina membrana impermeable y, si se desea permitir el drenaje, se le colocan sendas piedras porosas en su base y en su coronación.

Se coloca la probeta en un pedestal dentro una cámara cilíndrica (célula),

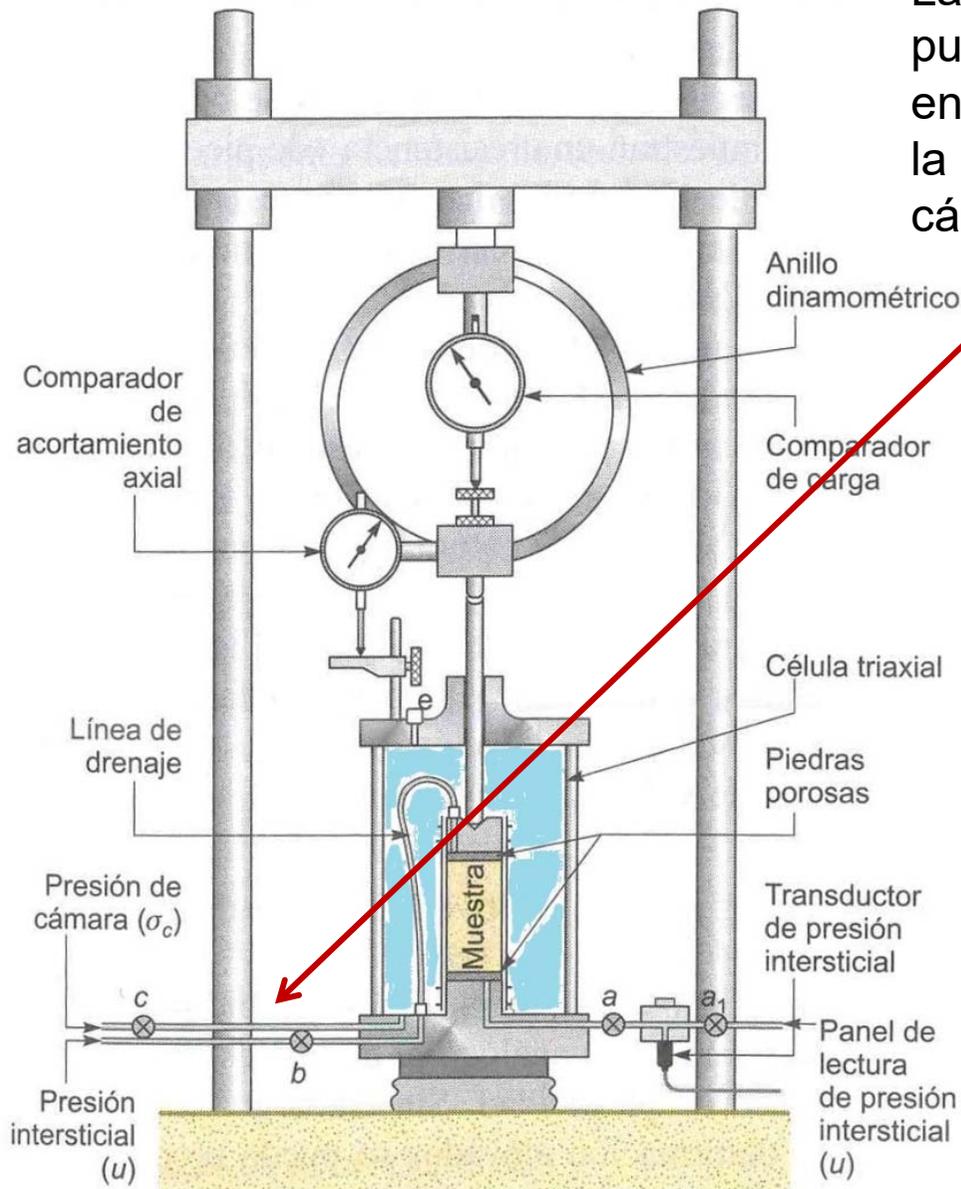


Tomada de Internet. <http://www.controls-group.com>

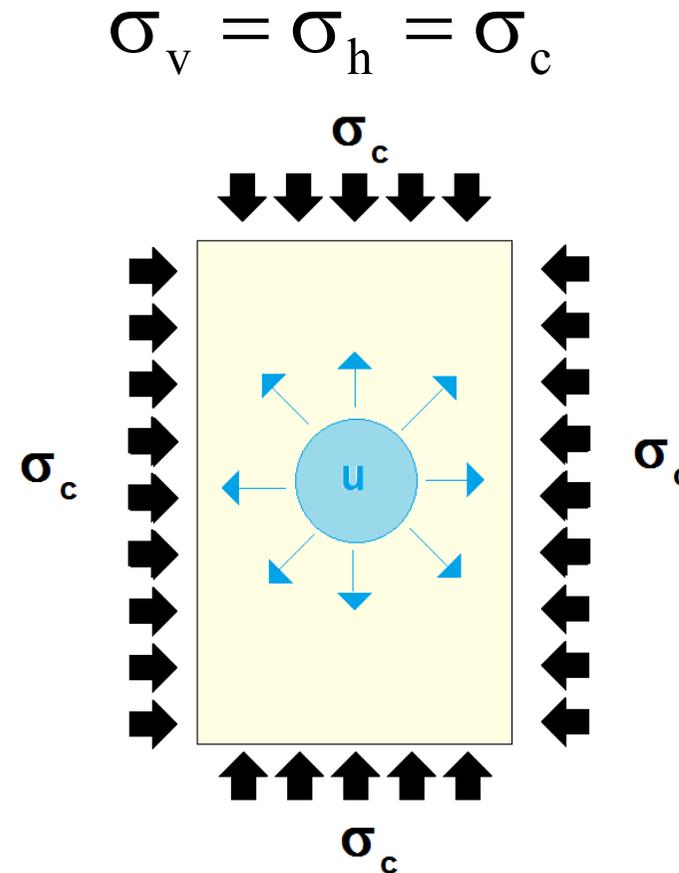


Tomada de Internet. <http://geotip.igt.ethz.ch>

# EL ENSAYO TRIAXIAL



La cámara (célula) se llena con agua, a la que se le puede dar presión a través de un conducto (c). El agua en la cámara transmite una presión total isotrópica sobre la muestra, frecuentemente llamada “presión de cámara”:

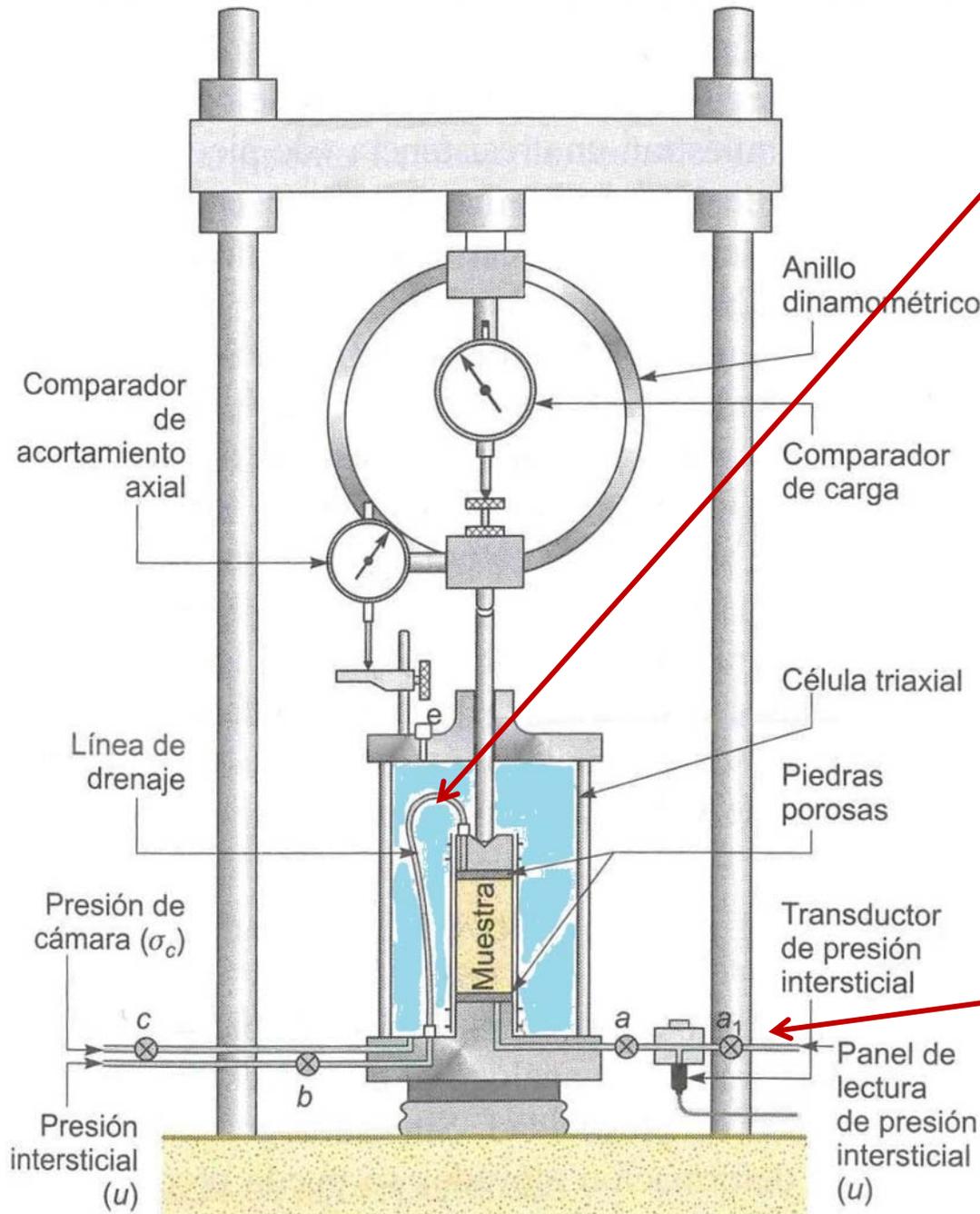


$$\sigma_v = \sigma_h = \sigma_c$$

$$\sigma'_c = \sigma_c - u$$

Tomada de González Vallejo, L. et al (2000)

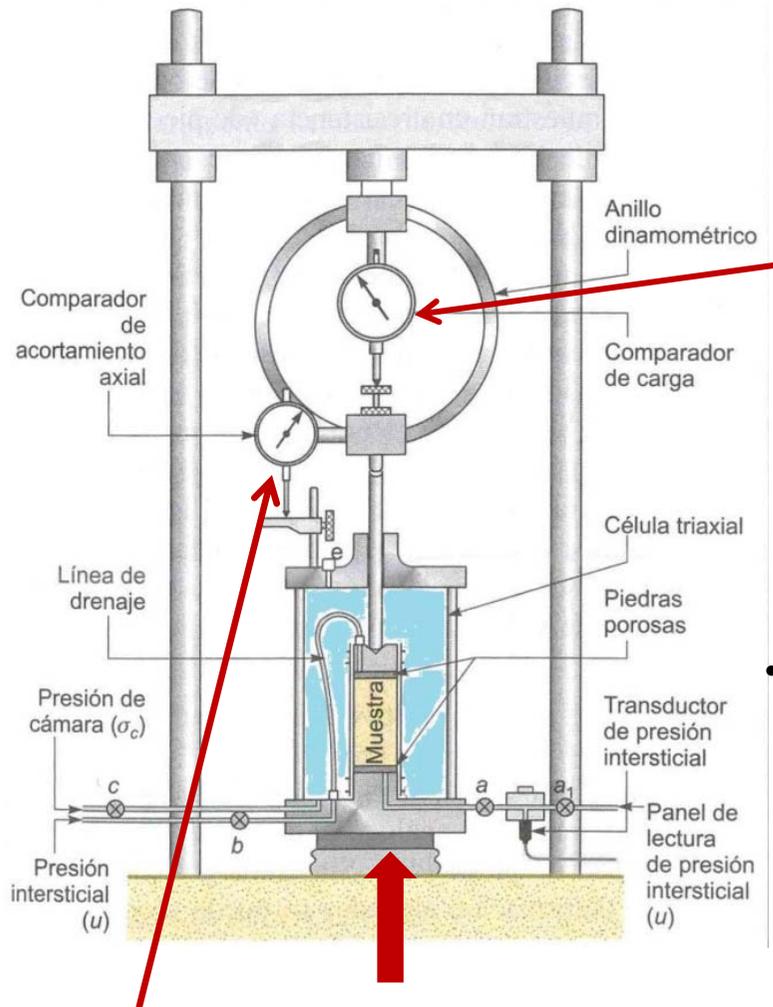
# EL ENSAYO TRIAXIAL



En la parte superior de la probeta se dispone un tubo llamado “línea de drenaje”. Permite aplicar al agua de los poros la presión intersticial ( $u$ ) que se desee (conducto y válvula (b)).

También permite controlar la salida o entrada de agua en la probeta (la reducción o aumento de volumen del suelo saturado irá necesariamente asociado a la expulsión o ganancia del mismo volumen de agua, de manera que el sistema conectado a la válvula (b) permite medir en todo momento los cambios de volumen del suelo durante ensayos con drenaje). (a)).

En el pedestal, bajo la probeta se dispone de un tercer conducto conectado con la muestra a través de la piedra porosa inferior. A dicho conducto se acopla un transductor de presión intersticial, que permite medir en todo momento la presión intersticial en la muestra (conducto y válvula (a)).



Las tensiones tangenciales se aplican en el caso de la figura imprimiendo un movimiento ascendente controlado (a velocidad constante) a toda la célula, al mismo tiempo que se impide el desplazamiento de la parte superior de la misma. Para ello se coloca un pistón muy rígido que sobresale de la célula y se encuentra unido a un anillo dinamométrico que permite medir la reacción necesaria para mantener inmóvil la parte superior de la muestra.

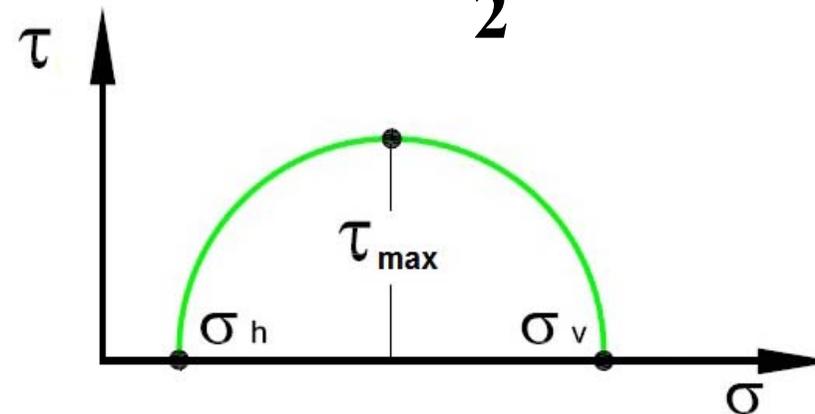
A tenor de la descripción anterior se comprueba que:

- El sistema de carga aplicado es de simetría axial:

$$\sigma_1 = \sigma_v; \quad \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_h$$

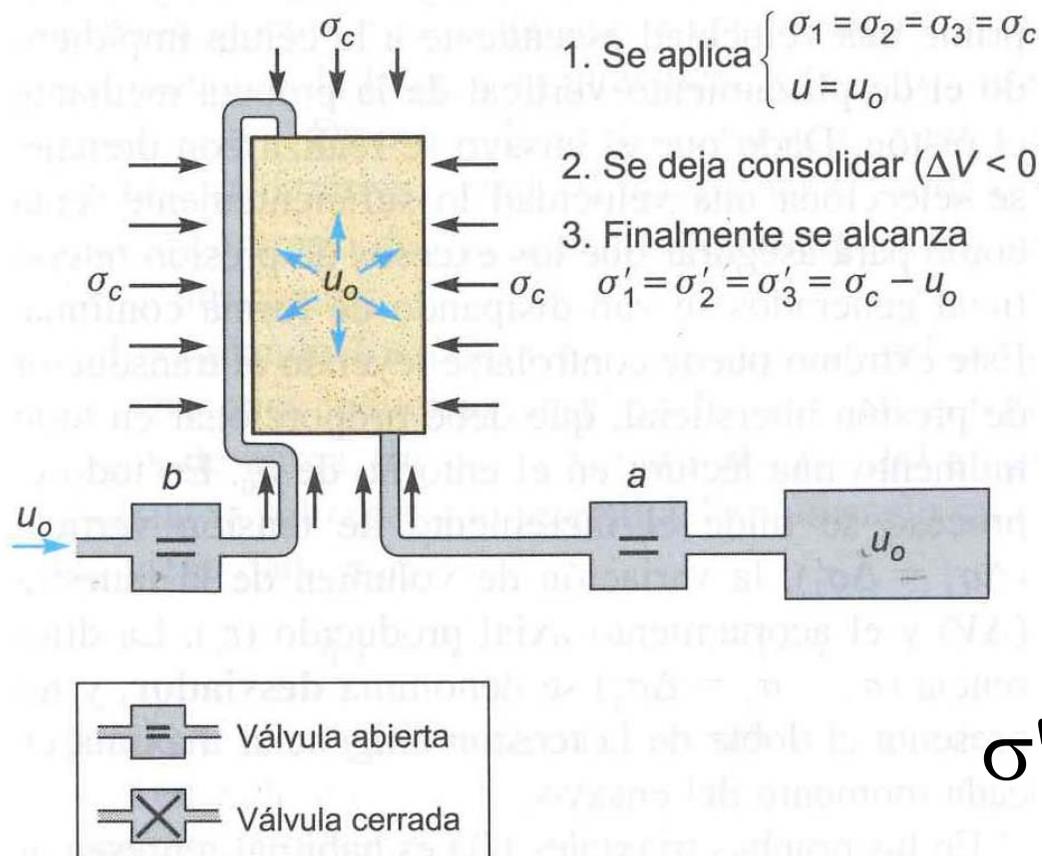
- La tensión tangencial máxima en cada instante del ensayo viene dada por:

$$\tau = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2}$$



Aparte de la presión vertical, del cambio de volumen o la presión intersticial (dependiendo del tipo de ensayo), se mide siempre el acortamiento axial (para lo cual se dispone de un comparador en la coronación de la célula).

a) Aplicación de la presión de cámara (consolidación).



## FASE DE CONSOLIDACIÓN

Con las válvulas abiertas, se aplica una presión de cámara ( $\sigma_c$ ) y una presión intersticial ( $u_0$ , habitualmente de 0,6 MPa \*\*).

Se permite el drenaje y se deja consolidar la muestra hasta llegar al equilibrio, momento en el que la presión intersticial vuelve a ser  $u_0$  y la probeta ha dejado de expulsar agua, esto es, de reducir su volumen (ha consolidado).

Las presiones efectivas actuantes son entonces:

$$\sigma'_v = \sigma'_h = \sigma'_c = \sigma_c - u_0$$

Tomada de González Vallejo, L. et al (2000)

NOTA: El círculo de Mohr en estas condiciones es un punto en el eje ( $\sigma$ ).

NOTA: Se puede medir el volumen de agua que sale de la probeta a lo largo del proceso. Con varios escalones de carga se puede obtener la curva de consolidación isótropa (similar a la del edómetro), se pueden dibujar curvas de consolidación de cada escalón (y obtener el coeficiente correspondiente), etc.

b) Aplicación de tensiones de corte.

1. Se mantienen  $\sigma_c, u_0$  sin variar
2. Se aumenta  $\sigma_1$ , sin permitir acumulación de excesos de presión intersticial ( $\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma'_1$ )
3. Se mide  $\Delta\sigma_1, \varepsilon_v, \Delta V$

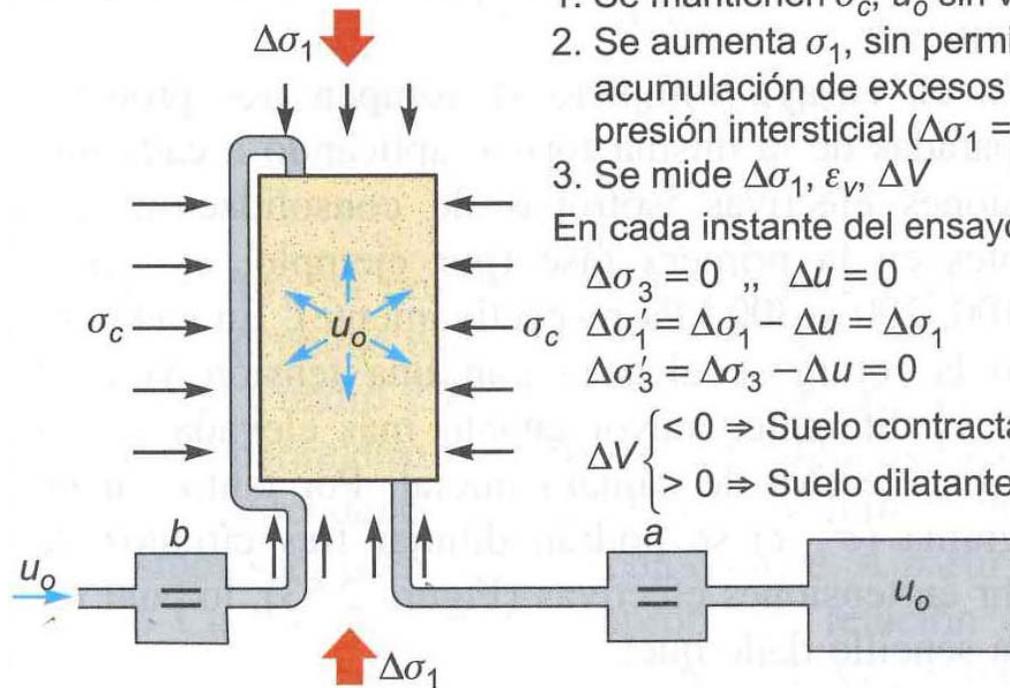
En cada instante del ensayo:

$$\Delta\sigma_3 = 0 \quad ,, \quad \Delta u = 0$$

$$\Delta\sigma'_1 = \Delta\sigma_1 - \Delta u = \Delta\sigma_1$$

$$\Delta\sigma'_3 = \Delta\sigma_3 - \Delta u = 0$$

$$\Delta V \begin{cases} < 0 \Rightarrow \text{Suelo contractante} \\ > 0 \Rightarrow \text{Suelo dilatante} \end{cases}$$



## FASE DE CORTE

Manteniendo la presión total de cámara ( $\sigma_c$ ) y la presión intersticial ( $u_0$ ) de la fase anterior (válvulas b y c abiertas), se imprime una velocidad ascendente a la célula impidiendo al mismo tiempo el desplazamiento vertical de la probeta.

Para que el ensayo sea drenado debe seleccionarse una velocidad lo suficientemente lenta como para asegurar que los excesos de presión intersticial generados se van disipando de forma continua. Dicha velocidad se puede deducir de la fase de consolidación.

Puede controlarse que el ensayo discurre en condiciones drenadas leyendo el transductor de presión intersticial (a), que debe proporcionar en todo momento una lectura en el entorno de  $u_0$ .

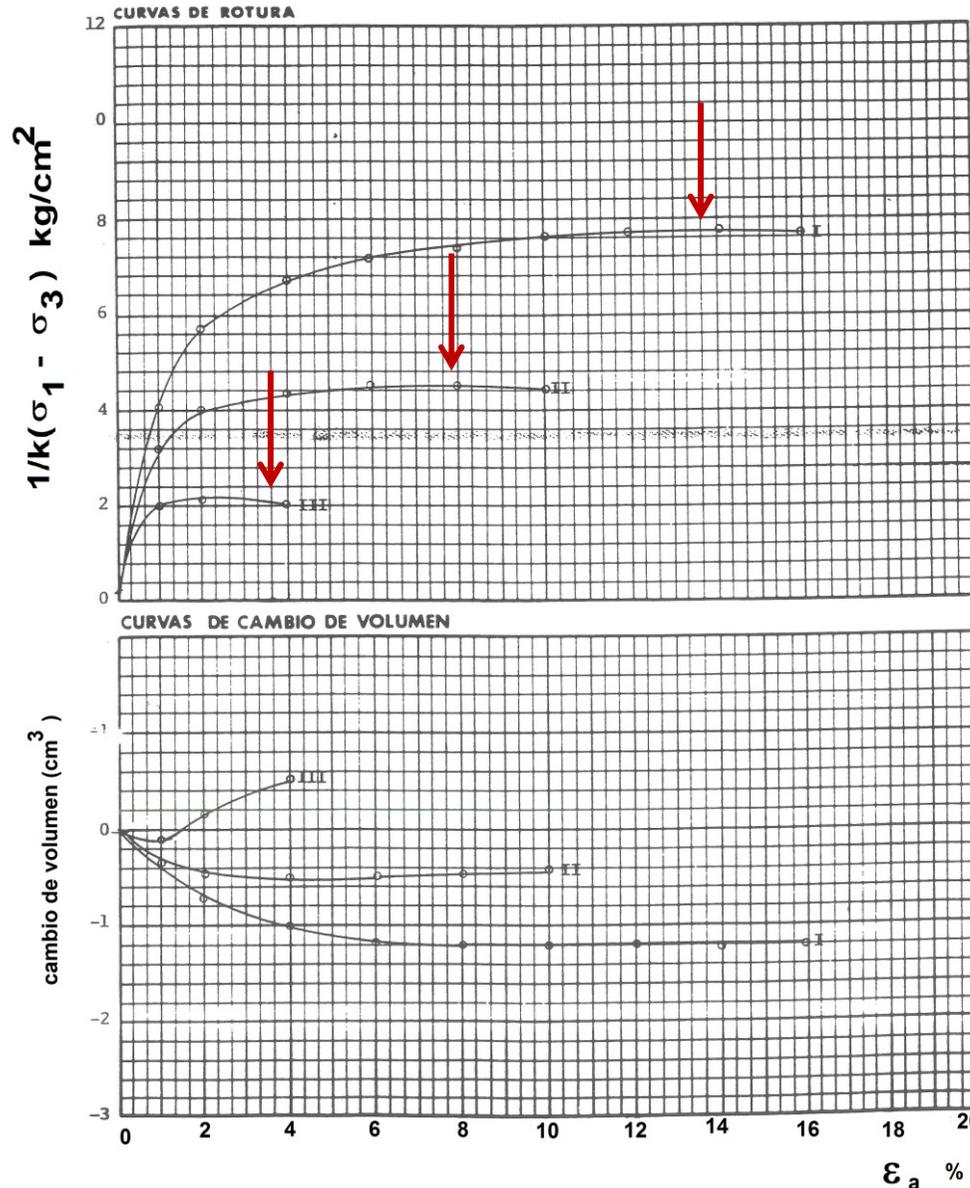
Durante el ensayo se mide el incremento de tensión vertical ( $\Delta\sigma_v$ ), la variación de volumen de la muestra ( $\Delta V$ ) y el acortamiento axial producido ( $\varepsilon_v$ ). La diferencia ( $q = \sigma_v - \sigma_h = \Delta\sigma_v$ ) se denomina desviador, y representa el doble de la tensión tangencial máxima en cada momento del ensayo.

$$q = \sigma_v - \sigma_h = (\sigma_{v_0} + \Delta\sigma_v) - (\sigma_{h_0} + \Delta\sigma_h) = \Delta\sigma_v$$

$$\sigma_{v_0} = \sigma_{h_0}; \quad \Delta\sigma_h = 0$$

ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL

PROBETA Nº	I	II	III		
$\sigma_3$ kg/cm <sup>2</sup>	9	7,5	6,5		
VALORES DE K	1	1	1		



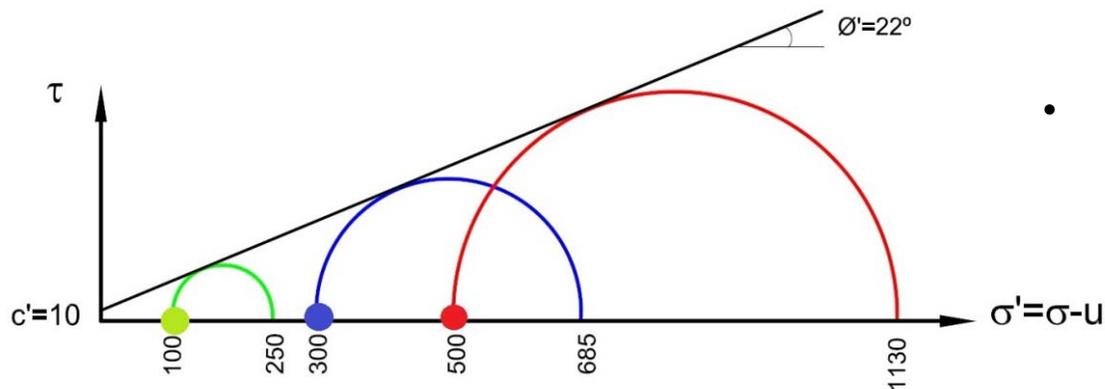
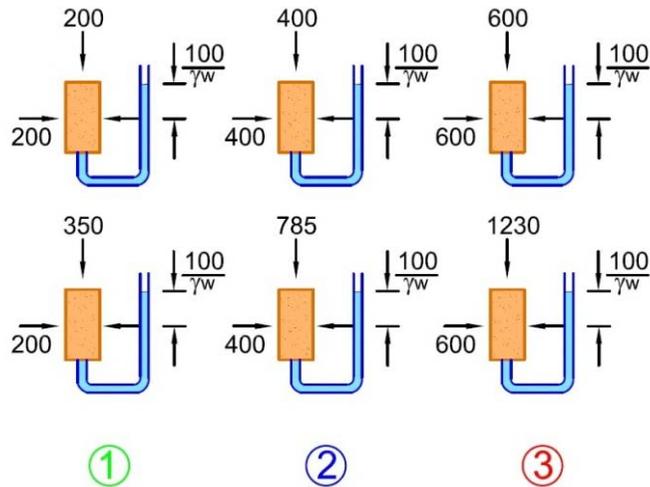
## EJEMPLO 1 DE ENSAYO TRIAXIAL CD

- Se ensayan tres probetas.
- En la fase de consolidación isotrópica se aplican presiones de cámara de 650, 750 y 900 kPa.
- La presión de cola es  $u=600$  kPa
- Las presiones efectivas de consolidación son pues: 50, 150 y 300 kPa.
- En los gráficos se representa la fase de corte. En el gráfico de arriba se muestra la relación (desviador - deformación axial).
- Las roturas se alcanzan con desviadores de 220, 450 y 775 kPa
- En el de abajo se muestra la relación (cambio de volumen - deformación axial). Se observa que las dos primeras probetas son contractantes y la tercera dilatante
- Con estos datos es inmediato dibujar los círculos de Mohr

## EJEMPLO DE ENSAYO CD

En la figura, tomada de Simons & Menzies, se representa un ensayo triaxial CD con las siguientes características:

- La presión de cola es  $u = 100$  kPa
- Las muestras se consolidan con tres presiones efectivas de cámara distintas: 100, 300 y 500 kPa
  - Probeta 1:  $\sigma'_c = 200 - 100 = 100$  kPa
  - Probeta 2:  $\sigma'_c = 400 - 100 = 300$  kPa
  - Probeta 3:  $\sigma'_c = 600 - 100 = 500$  kPa



- Las probetas llegan a rotura con los desviadores: 150, 385 y 630 kPa

## RECORRIDO DE TENSIONES ( $s'$ , $t$ )

En el caso del triaxial CD, para cada instante del ensayo se puede determinar cuales son las presiones antes definidas:

$$s' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} = \frac{\sigma'_v + \sigma'_h}{2} \quad t = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} = \frac{\sigma'_v - \sigma'_h}{2}$$

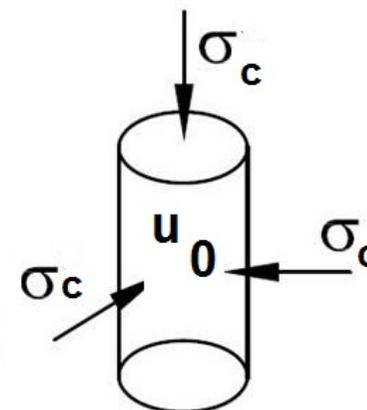
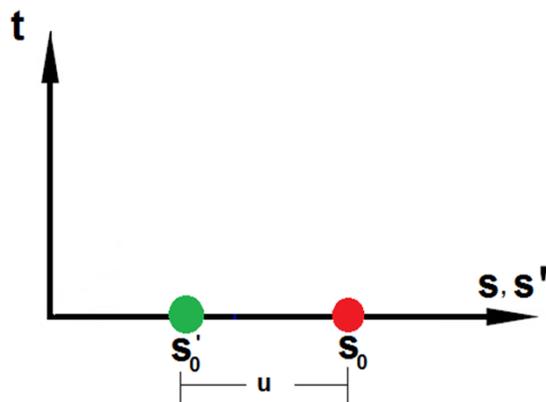
### 1.- Consolidación. Aplicación de presión total de cámara $\sigma_c$ y presión de cola $u_0$

#### Tensiones Totales

$$\sigma_v = \sigma_h = \sigma_c \quad s_0 = \frac{\sigma_c + \sigma_c}{2} = \sigma_c; \quad t = \frac{\sigma_c - \sigma_c}{2} = 0$$

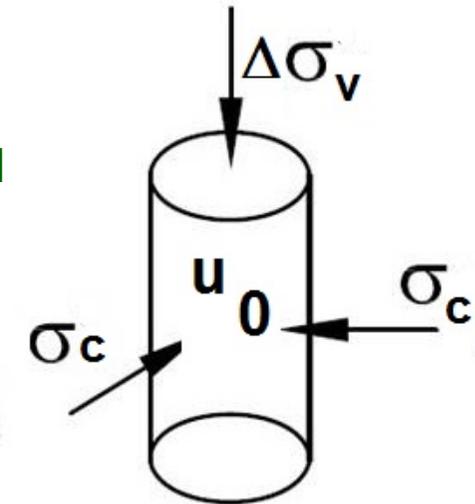
#### Tensiones efectivas

$$\sigma'_v = \sigma'_h = \sigma'_c = \sigma_c - u_0 \quad s'_0 = \frac{\sigma'_c + \sigma'_c}{2} = \sigma'_c; \quad t = \frac{\sigma'_c - \sigma'_c}{2} = 0$$



## RECORRIDO DE TENSIONES ( $s'$ , $t$ )

2 y 3.- Incrementos tensionales en la fase de corte. Aplicación del desviador. Pendiente del recorrido de tensiones



### Totales

$$\begin{aligned} \sigma_c = \sigma_h = \text{cte} &\rightarrow \Delta\sigma_h = 0 \\ \Delta\sigma_v &\neq 0 \end{aligned}$$

$$\Delta s = \frac{\Delta\sigma_v + \Delta\sigma_h}{2} = \frac{\Delta\sigma_v}{2}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta\sigma_v - \Delta\sigma_h}{2} = \frac{\Delta\sigma_v}{2}$$

$$\frac{\Delta t}{\Delta s} = 1$$

### Efectivas

$$\left. \begin{aligned} \sigma_c = \sigma_h = \text{cte} &\rightarrow \Delta\sigma_h = 0 \\ u = u_0 = \text{cte} &\rightarrow \Delta u = 0 \end{aligned} \right\} \rightarrow \begin{aligned} \sigma'_h = \sigma'_c = \text{cte} \\ \Delta\sigma'_h = 0 \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta\sigma_v &\neq 0 \\ u = u_0 = \text{cte} \end{aligned} \right\} \rightarrow \Delta\sigma'_v \neq 0$$

$$\Delta s' = \frac{\Delta\sigma'_v + \Delta\sigma'_h}{2} = \frac{\Delta\sigma'_v}{2}$$

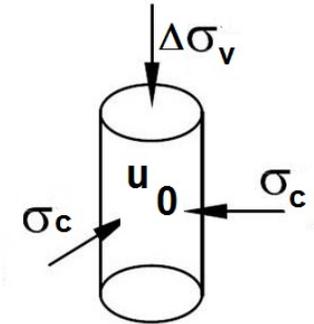
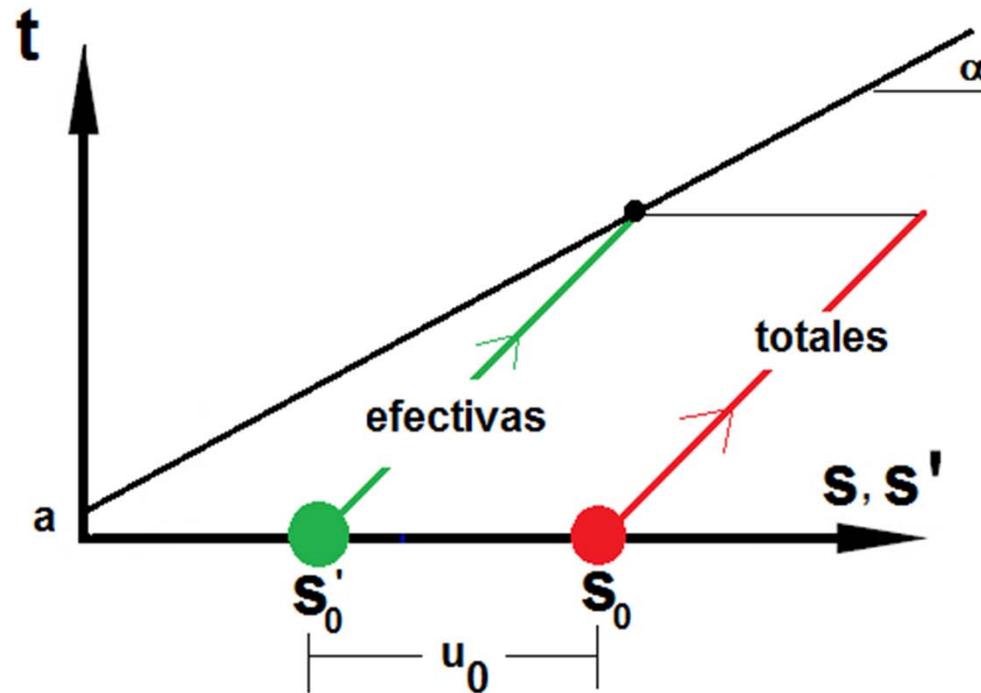
$$\Delta t = \frac{\Delta\sigma'_v - \Delta\sigma'_h}{2} = \frac{\Delta\sigma'_v}{2}$$

$$\frac{\Delta t}{\Delta s'} = 1$$

## RECORRIDO DE TENSIONES (s', t)

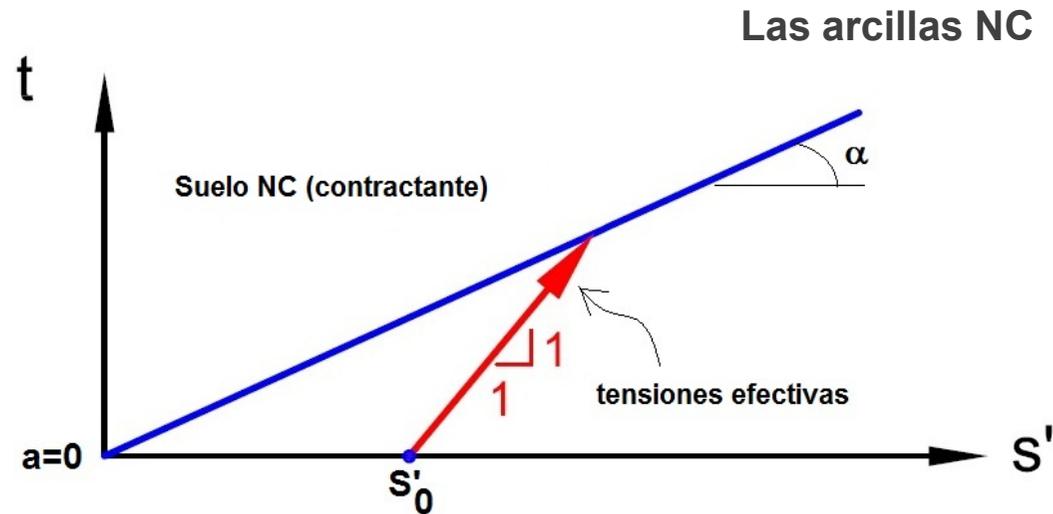
$$\frac{\Delta t}{\Delta s} = 1$$

$$\frac{\Delta t}{\Delta s'} = 1$$

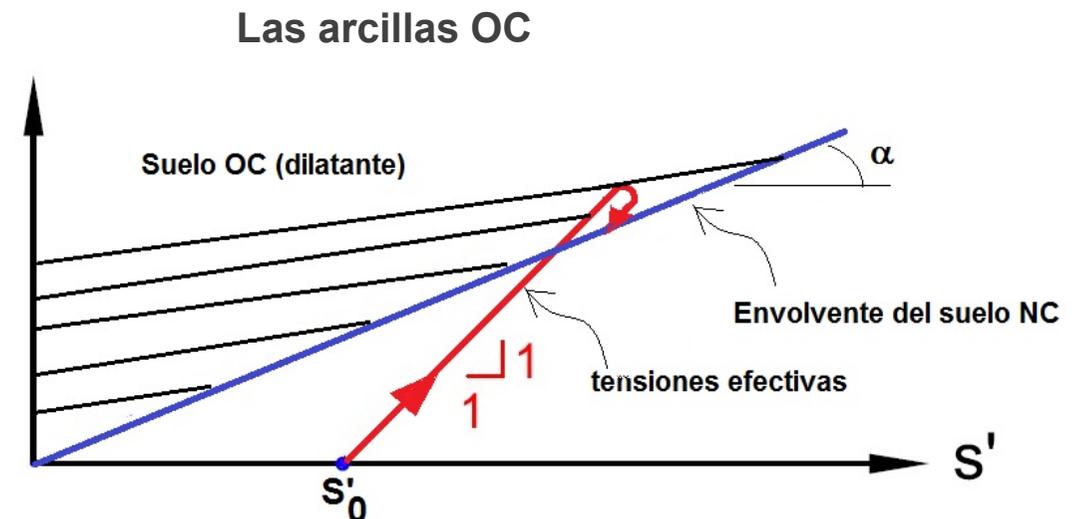


**NÓTESE QUE EL UN TRIAXIAL CD EL RECORRIDO DE TENSIONES TOTALES Y EFECTIVAS “ES OBLIGADO”**

## RECORDANDO LOS SUELOS CONTRACTANTES Y LOS DILATANTES



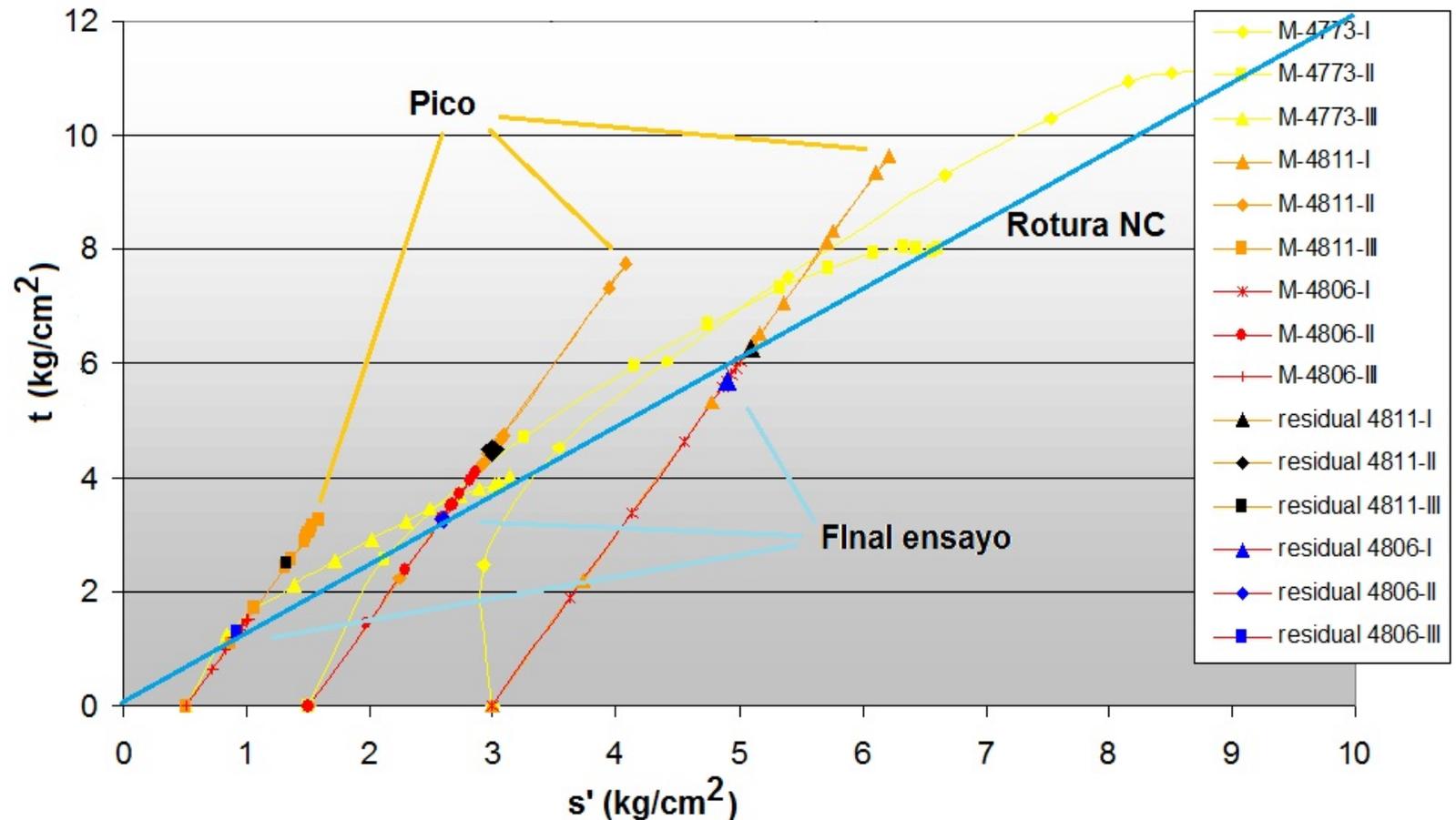
El pico en resistencia de las arcillas OC, el “empujoncito hacia arriba” a la envolvente de rotura del suelo NC y la cohesión efectiva



## EJEMPLO DE SUELO DILATANTE. ARCILLAS TERCIARIAS DE CARTAGENA

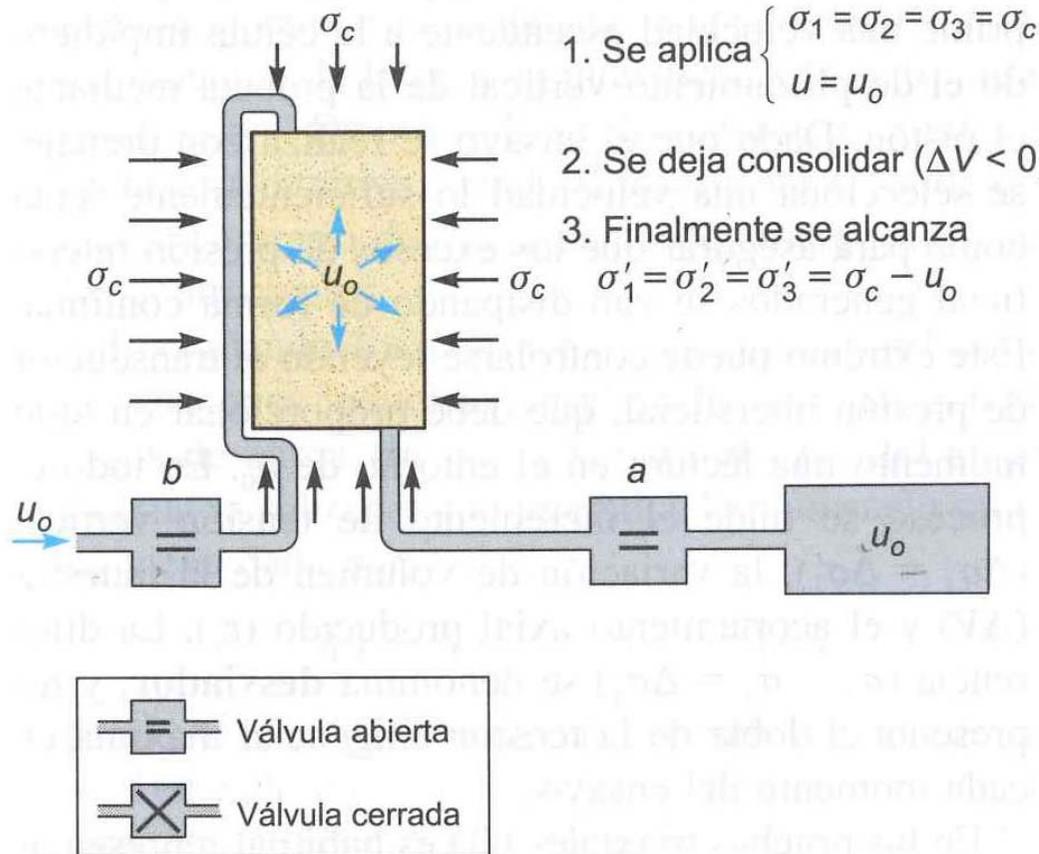
Arcillas limosas amarillentas. % Finos 75- 90 %,  $w_l$  32 - 45 %,  $IP$  11 - 21 %. Clasificación según Casagrande CL (arcilla de baja plasticidad). Densidad seca de  $1.8 \text{ t/m}^3$ ,  $w(\text{nat})\%$  del 19%.

- NOTAS:
- Los ensayos CD son los de línea naranja.
- Se dibuja muy bien la envolvente NC. Mucho mejor que con círculos de Mohr.
- Los “picos” darían la cohesión para las distintas muestras y grados de OC.
- Las curvas amarillas son ensayos CU (ver más adelante)



# EL ENSAYO TRIAXIAL CU (CONSOLIDADO, SIN DRENAJE Y CON MEDIDA DE LA PRESIÓN INTERSTICIAL

a) Aplicación de la presión de cámara (consolidación).



Tomada de González Vallejo, L. et al (2000)

## FASE DE CONSOLIDACIÓN

La primera fase es igual a la del triaxial CD.

Para ello se aplica una presión de cámara ( $\sigma_c$ ) y una presión intersticial ( $u_0$ , habitualmente de 0,6 MPa \*\*).

Se permite el drenaje y se deja consolidar la muestra hasta llegar al equilibrio, momento en el que la presión intersticial vuelve a ser  $u_0$  y la probeta ha dejado de expulsar agua, esto es, de reducir su volumen (ha consolidado).

Las presiones efectivas actuantes son entonces:

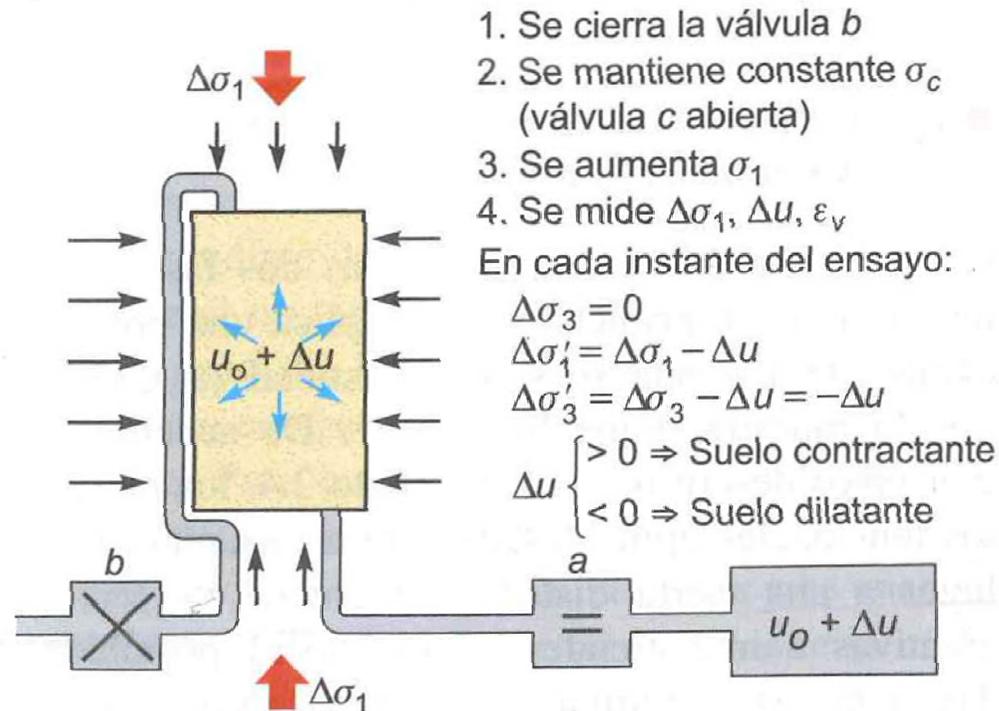
$$\sigma'_v = \sigma'_h = \sigma'_c = \sigma_c - u_0$$

NOTA: El círculo de Mohr en estas condiciones es un punto en el eje ( $\sigma$ ).

NOTA: Se puede medir el volumen de agua que sale de la probeta a lo largo del proceso. Con varios escalones de carga se puede obtener la curva de consolidación isótropa (similar a la del edómetro), se pueden dibujar curvas de consolidación de cada escalón (y obtener el coeficiente correspondiente), etc.

# EL ENSAYO TRIAXIAL CU (CONSOLIDADO, SIN DRENAJE Y CON MEDIDA DE LA PRESIÓN INTERSTICIAL

## FASE DE CORTE



Se cierra la válvula de drenaje (*b*).

Manteniendo la presión de cámara sin variar, se imprime un movimiento ascendente a la célula al mismo tiempo que se impide el desplazamiento vertical de la probeta por medio del pistón.

En todo el proceso se mide el incremento de tensión vertical total originado ( $\Delta\sigma_v$ ), la variación de la presión intersticial en la muestra ( $\Delta u$ ) y el acortamiento axial producido ( $\epsilon_v$ ).

En las pruebas triaxiales TCCU es habitual representar las curvas ( $\Delta\sigma'_1, \epsilon_1$ ) y ( $\Delta u, \epsilon_1$ ) a lo largo del ensayo.

$$q = \sigma_v - \sigma_h = (\sigma_{v_0} + \Delta\sigma_v) - (\sigma_{h_0} + \Delta\sigma_h) = \Delta\sigma_v$$

$$\sigma_{v_0} = \sigma_{h_0}; \quad \Delta\sigma_h = 0$$

# EL ENSAYO TRIAXIAL CU (CONSOLIDADO, SIN DRENAJE Y CON MEDIDA DE LA PRESIÓN INTERSTICIAL)

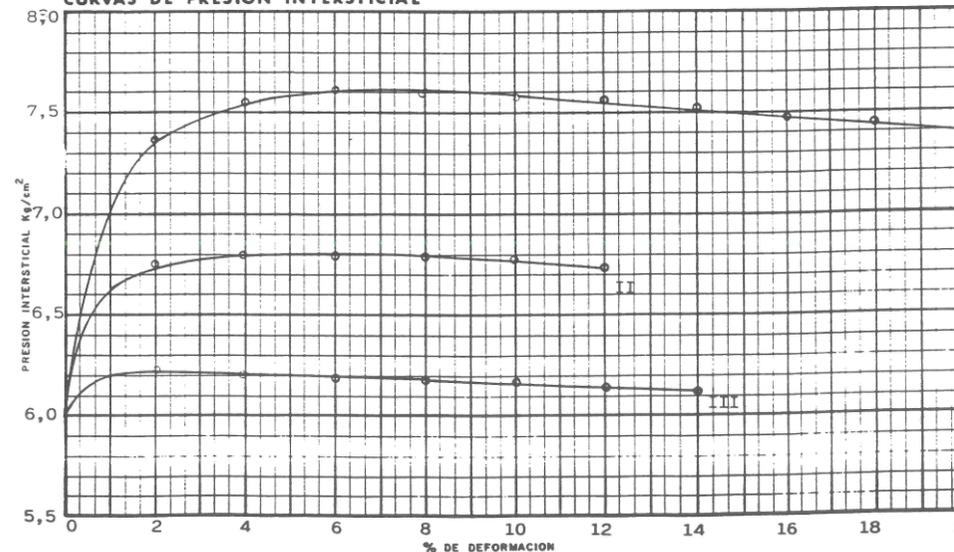
ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL

PROBETA Nº	I	II	III			
$\sigma_3$ Kg/cm <sup>2</sup>	9,5	7,5	6,5			
VALORES DE K	1	1	1			

CURVAS DE ROTURA



CURVAS DE PRESION INTERSTICIAL

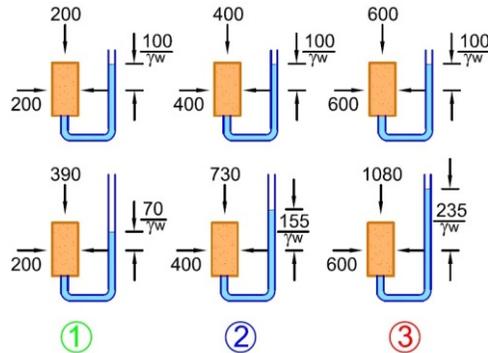


## EJEMPLO 1 DE ENSAYO TRIAXIAL CU

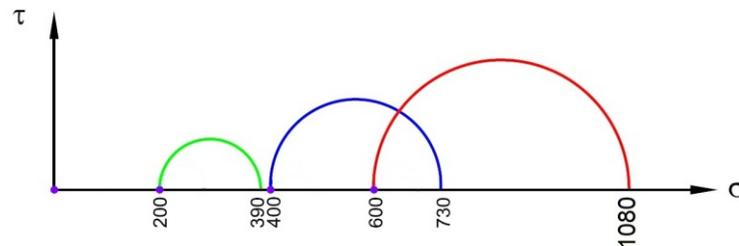
- Se ensayan tres probetas.
- En la fase de consolidación isotrópica se aplican presiones de cámara de 650, 750 y 900 kPa.
- La presión de cola es  $u=600$  kPa
- Las presiones efectivas de consolidación son pues: 50, 150 y 300 kPa.
- En los gráficos se representa la fase de corte. En el gráfico de arriba se muestra la relación (desviador - deformación axial).
- Las roturas se alcanzan con desviadores de 105, 180 y  $>360^*$  kPa (\*limitan las deformaciones)
- En el de abajo se muestra la relación (presión intersticial- deformación axial). Se observa que todas aumentan de presión con respecto a la inicial de cola. Son contractantes.
- Con estos datos es inmediato dibujar los círculos de Mohr

# EL ENSAYO TRIAXIAL CU (CONSOLIDADO, SIN DRENAJE Y CON MEDIDA DE LA PRESIÓN INTERSTICIAL)

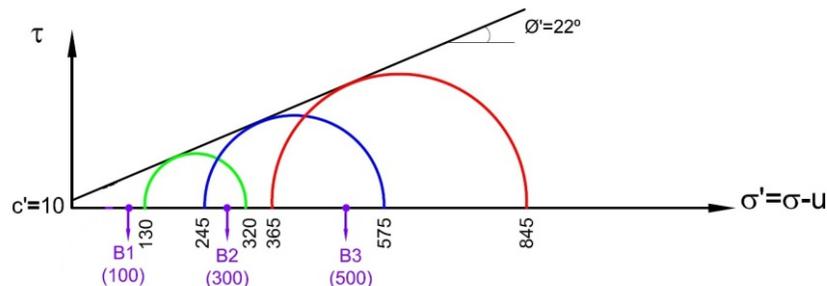
## EJEMPLO 2 DE ENSAYO TRIAXIAL CU



Tensiones totales



Tensiones efectivas



En la figura, tomada de Simons & Menzies, se representa un ensayo triaxial CU con las siguientes características:

- La presión de cola es  $u = 100$  kPa
- Las muestras se consolidan con tres presiones efectivas de cámara distintas: 100, 300 y 500 kPa
  - Probeta 1:  $\sigma'_c = 200 - 100 = 100$  kPa
  - Probeta 2:  $\sigma'_c = 400 - 100 = 300$  kPa
  - Probeta 3:  $\sigma'_c = 600 - 100 = 500$  kPa
- Las probetas llegan a rotura con los desviadores: 190, 330 y 480 kPa

# EL ENSAYO TRIAXIAL CU (CONSOLIDADO, SIN DRENAJE Y CON MEDIDA DE LA PRESIÓN INTERSTICIAL)

## RECORRIDO DE TENSIONES ( $s'$ , $t$ )

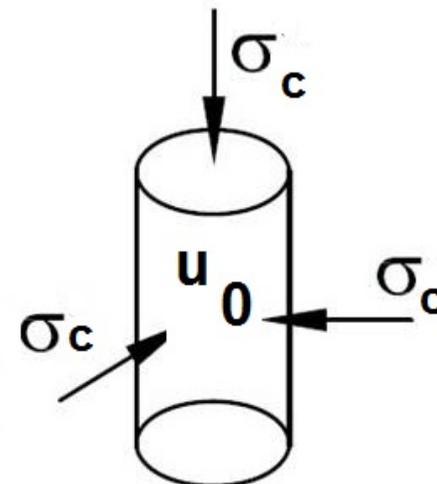
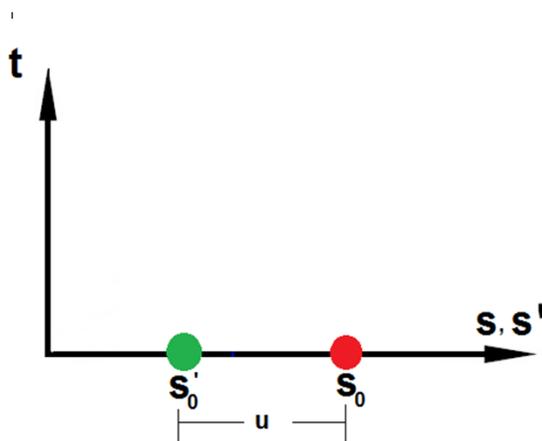
1.- Consolidación. Aplicación de presión total de cámara  $\sigma_c$  y presión de cola  $u_0$  (igual que el CD)

Tensiones Totales

$$\sigma_v = \sigma_h = \sigma_c \quad s_0 = \frac{\sigma_c + \sigma_c}{2} = \sigma_c; \quad t = \frac{\sigma_c - \sigma_c}{2} = 0$$

Tensiones efectivas

$$\sigma'_v = \sigma'_h = \sigma'_c = \sigma_c - u_0 \quad s'_0 = \frac{\sigma'_c + \sigma'_c}{2} = \sigma'_c; \quad t = \frac{\sigma'_c - \sigma'_c}{2} = 0$$



# EL ENSAYO TRIAXIAL CU (CONSOLIDADO, SIN DRENAJE Y CON MEDIDA DE LA PRESIÓN INTERSTICIAL)

## RECORRIDO DE TENSIONES ( $s'$ , $t$ )

### 2.- Incrementos tensionales en la fase de corte. Aplicación del desviador

**Totales (igual que CD)**

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_c = \sigma_h = \text{cte} \rightarrow \Delta\sigma_h = 0 \\ \Delta\sigma_v \neq 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \Delta s = \frac{\Delta\sigma_v + \Delta\sigma_h}{2} = \frac{\Delta\sigma_v}{2} \\ \Delta t = \frac{\Delta\sigma_v - \Delta\sigma_h}{2} = \frac{\Delta\sigma_v}{2} \end{array} \longrightarrow \frac{\Delta t}{\Delta s} = 1$$

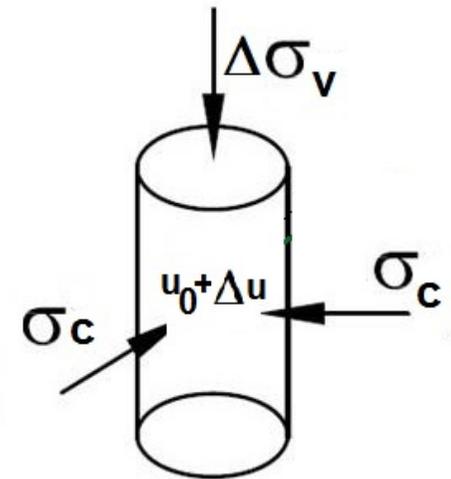
En recorrido en tensiones totales sigue siendo obligado

### Efectivas

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_c = \sigma_h = \text{cte} \\ u \neq u_0 \neq \text{cte} \end{array} \right\} \rightarrow \left. \begin{array}{l} \Delta\sigma_h = 0 \\ \Delta u \neq 0 \end{array} \right\} \rightarrow \Delta\sigma'_h \neq 0 \begin{cases} \text{Si } \Delta u > 0 \rightarrow \text{contractante} \\ \text{Si } \Delta u < 0 \rightarrow \text{dilatante} \end{cases}$$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta\sigma_v \neq 0 \\ \Delta u \neq 0 \end{array} \right\} \rightarrow \Delta\sigma'_v \neq 0$$

El recorrido en tensiones efectivas depende del suelo. Ya no es obligado. Veamos qué ocurre en función de si el suelo es contractante o dilatante (recordar clases iniciales de resistencia)

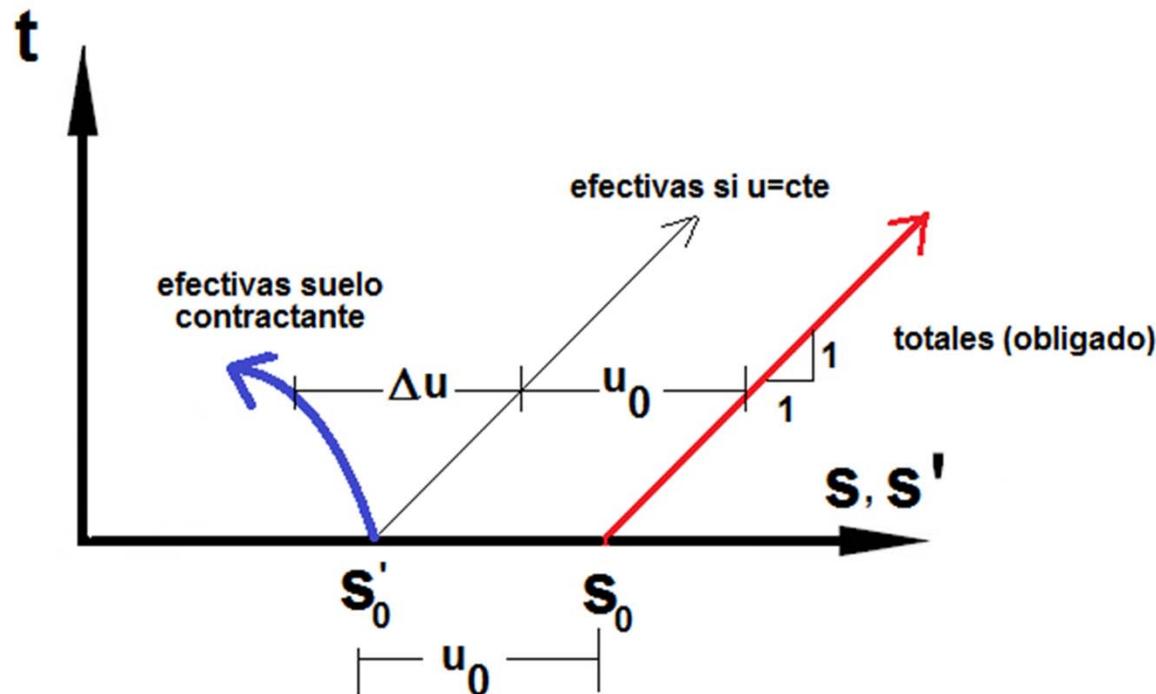
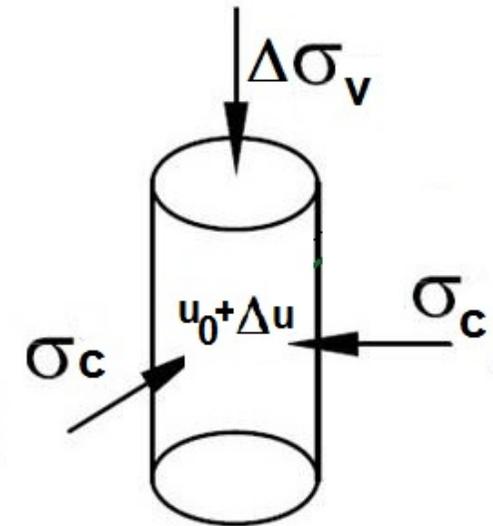


# EL ENSAYO TRIAXIAL CU (CONSOLIDADO, SIN DRENAJE Y CON MEDIDA DE LA PRESIÓN INTERSTICIAL)

## RECORRIDO DE TENSIONES ( $s'$ , $t$ )

### SUELO CONTRACTANTE

En un suelo contractante, al generarse incrementos de presión intersticial el recorrido de tensiones efectivas se desvía hacia la izquierda,



$$\Delta t = \frac{\Delta \sigma'_v - \Delta \sigma'_h}{2}$$

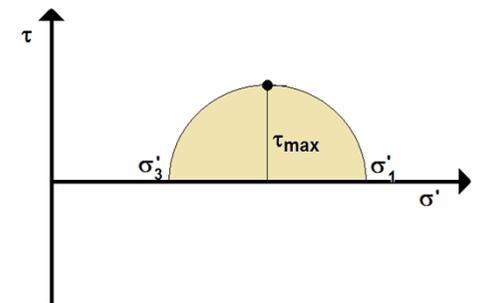
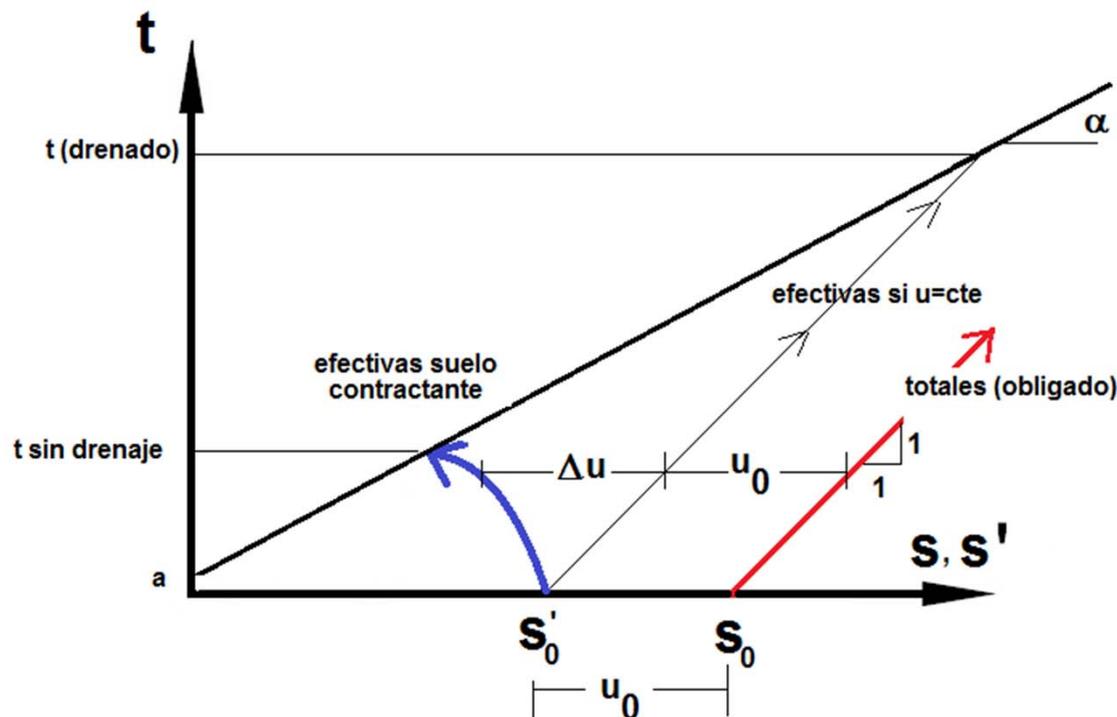
$$\Delta s' = \frac{\Delta \sigma'_v + \Delta \sigma'_h}{2}$$

# EL ENSAYO TRIAXIAL CU (CONSOLIDADO, SIN DRENAJE Y CON MEDIDA DE LA PRESIÓN INTERSTICIAL)

## RECORRIDO DE TENSIONES ( $s'$ , $t$ ) SUELO CONTRACTANTE

..... Y si el recorrido de tensiones efectivas se desvía hacia la izquierda, la envolvente de rotura se alcanza con una tensión tangencial menor a la que se habría alcanzado si el proceso de carga hubiera sido drenado.

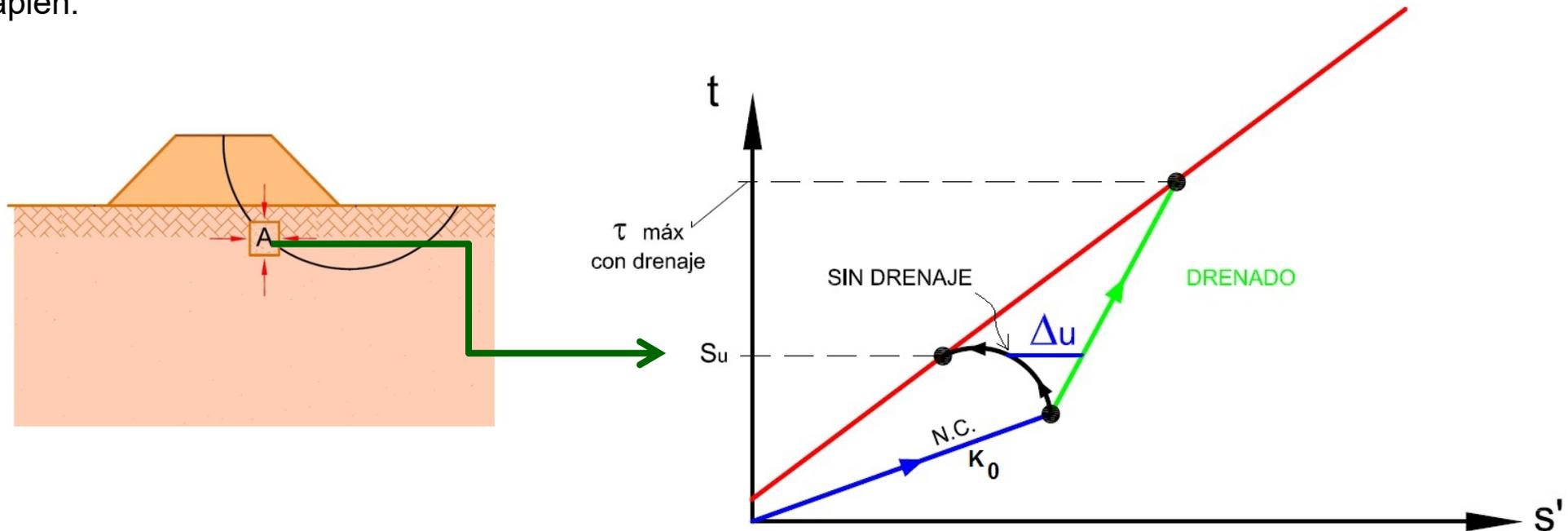
Por cierto, a la tensión tangencial máxima (resistencia al corte) que puede alcanzarse en un proceso de carga sin drenaje le llamamos, lógicamente “resistencia al corte sin drenaje”. La representamos como  $S_u$ , o  $c_u$ , pero es simplemente  $t$ ,  $\tau_{max}$ , es decir, el radio del círculo de Mohr en rotura



# EL ENSAYO TRIAXIAL CU (CONSOLIDADO, SIN DRENAJE Y CON MEDIDA DE LA PRESIÓN INTERSTICIAL)

## SUELO CONTRACTANTE SOMETIDO A CORTE. ALGUNAS APLICACIONES PRÁCTICAS

La observación anterior es muy relevante. Cuando construimos un terraplén sobre un suelo arcilloso blando, normalmente consolidado, (contractante), incluso una velocidad de construcción normal puede dar lugar a un proceso de carga sin drenaje (el terreno es muy impermeable y tarda mucho en consolidar). Como se ve en la figura con el recorrido de tensiones, estas pueden ser las circunstancias más desfavorables de la vida del terraplén.

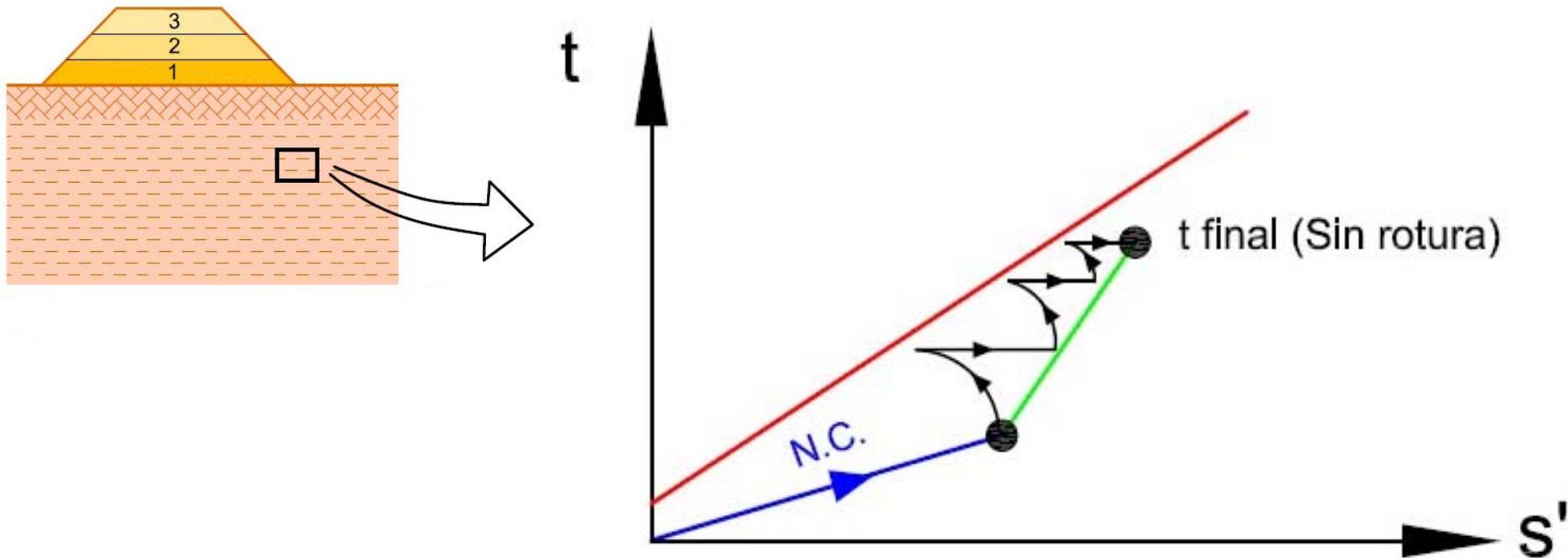


# EL ENSAYO TRIAXIAL CU (CONSOLIDADO, SIN DRENAJE Y CON MEDIDA DE LA PRESIÓN INTERSTICIAL)

## SUELO CONTRACTANTE SOMETIDO A CORTE. ALGUNAS APLICACIONES PRÁCTICAS

Una posible solución puede ser la “construcción en etapas”. Consiste en ir levantando el terraplén en tramos de altura limitada, dejando tiempo entre medias para que consolide (se disipen los excesos de presión intersticial generados por la carga).

A veces, para ayudar a que se produzca la consolidación, se instalan drenes.

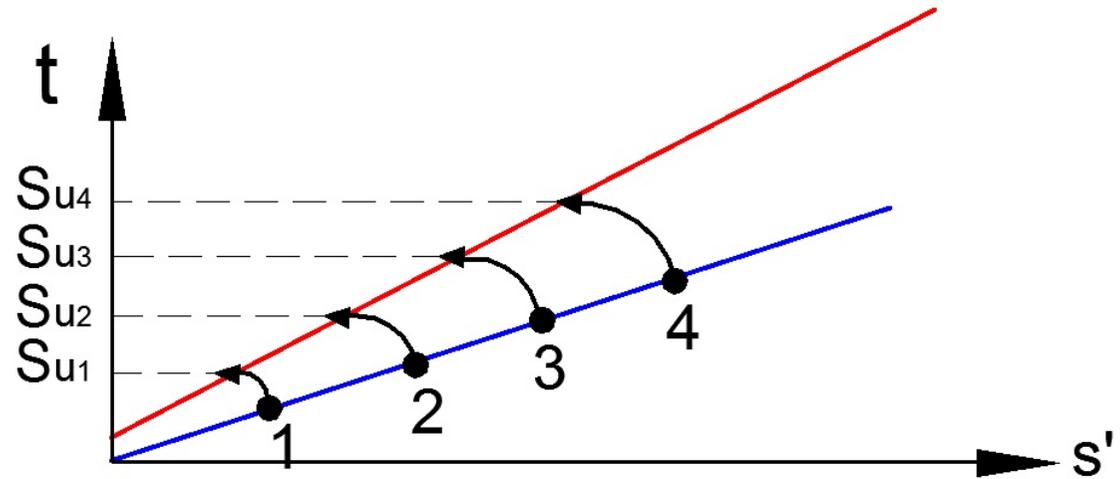
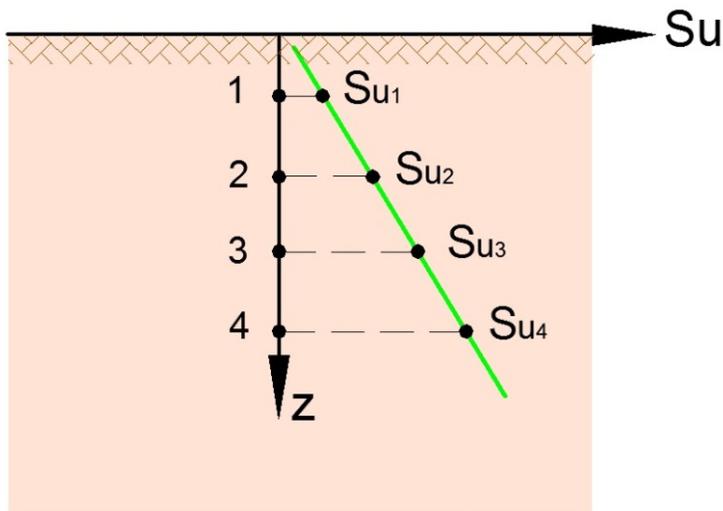


# EL ENSAYO TRIAXIAL CU (CONSOLIDADO, SIN DRENAJE Y CON MEDIDA DE LA PRESIÓN INTERSTICIAL)

## LA RESISTENCIA AL CORTE SIN DRENAJE EN SUELOS CONTRACTANTES

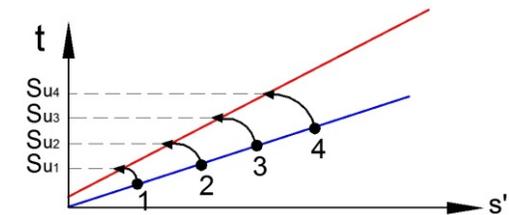
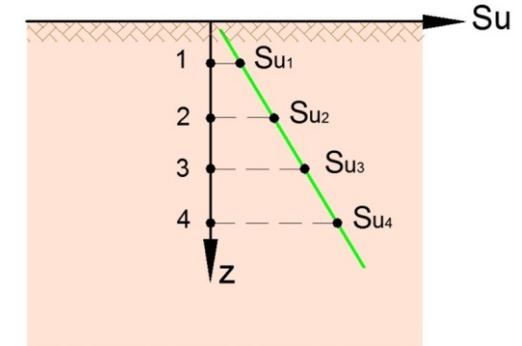
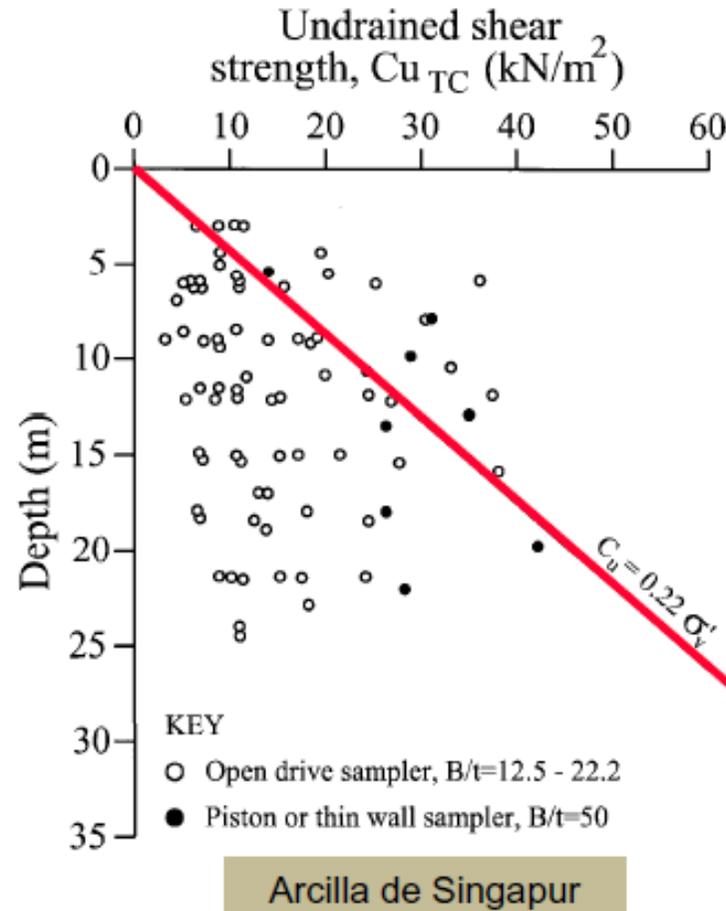
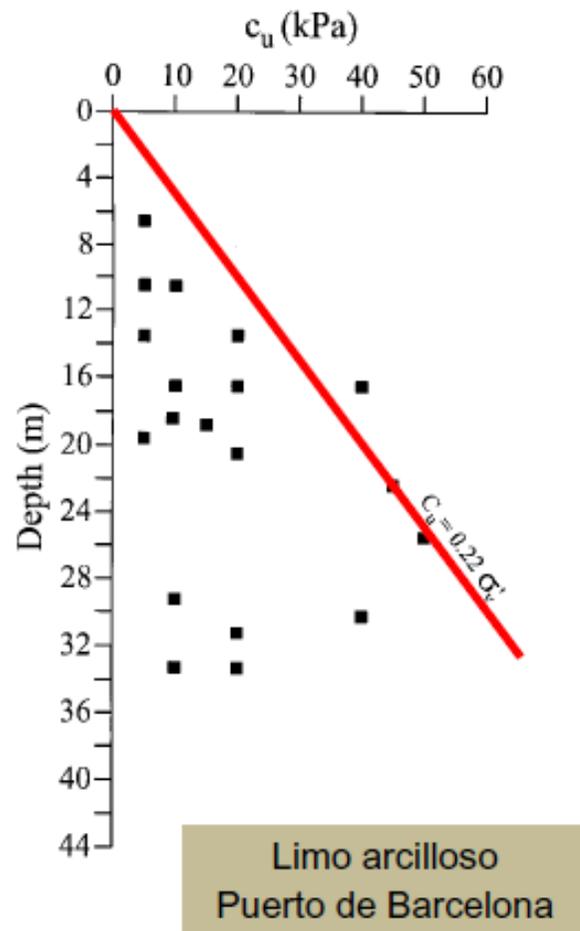
Evidentemente y la vista de las definiciones anteriores, la resistencia al corte sin drenaje del suelo no es una constante (aunque hay quien lo cree).

- Depende del estado de tensiones inicial (en realidad de la densidad inicial del suelo)
- Depende del proceso de carga. (Lo que se ha representado es el recorrido de tensiones a que da lugar un triaxial, con una relación determinada entre las tensiones totales aplicadas. Si el sistema de carga es distinto, la resistencia al corte sin drenaje obtenida también podrá serlo (y de hecho lo es).



# EL ENSAYO TRIAXIAL CU (CONSOLIDADO, SIN DRENAJE Y CON MEDIDA DE LA PRESIÓN INTERSTICIAL)

## LA RESISTENCIA AL CORTE SIN DRENAJE EN SUELOS NC



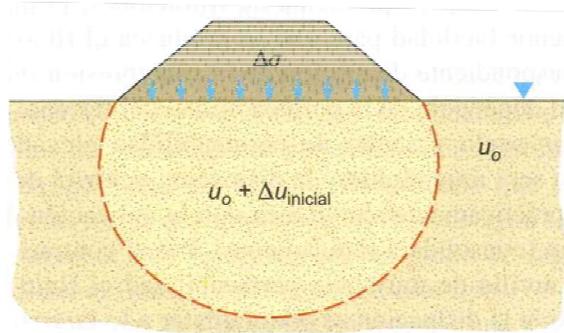
$$\left. \begin{matrix} S_u \\ c_u \end{matrix} \right\} \approx 0.22 \cdot \sigma'_v$$

Tomada de Alonso, E. (2011)

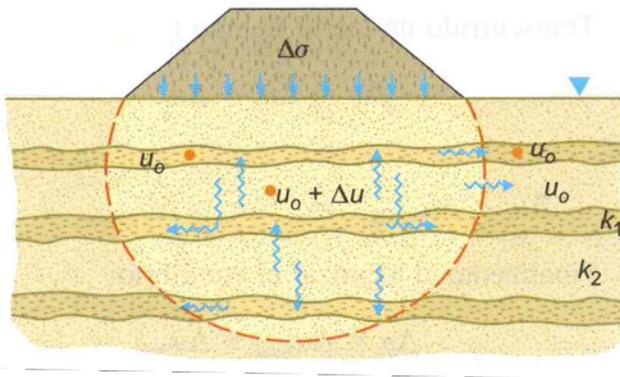
# CARGA SIN DRENAJE SOBRE SUELO SATURADO. DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES INICIALES

## RECORDANDO LOS CONCEPTOS DE “CARGA SIN DRENAJE” Y “CARGA CON DRENAJE”

De los mecanismos descritos derivan dos conceptos fundamentales de la práctica geotécnica habitual: las condiciones de carga “**sin drenaje**” (a veces llamada, de forma un tanto confusa, carga “a corto plazo”), y las condiciones de carga “**con drenaje**” (también confusamente denominada en ocasiones “a largo plazo”).



□ Diremos que un proceso de carga se produce en **condiciones “sin drenaje”** cuando las condiciones existentes (velocidad de carga, permeabilidad del terreno, etc) hagan razonable suponer que en el momento de la situación a considerar o calcular, **no han comenzado a disiparse los excesos de presión intersticial** generados por la aplicación de la carga (final de la construcción de un terraplén sobre arcilla blanda saturada, por ejemplo)



□ El proceso será “**con drenaje**” en caso contrario, esto es, cuando para la situación a considerar o calcular pueda suponerse que **se han disipado por completo los excesos de presión intersticial** generados por las cargas aplicadas.

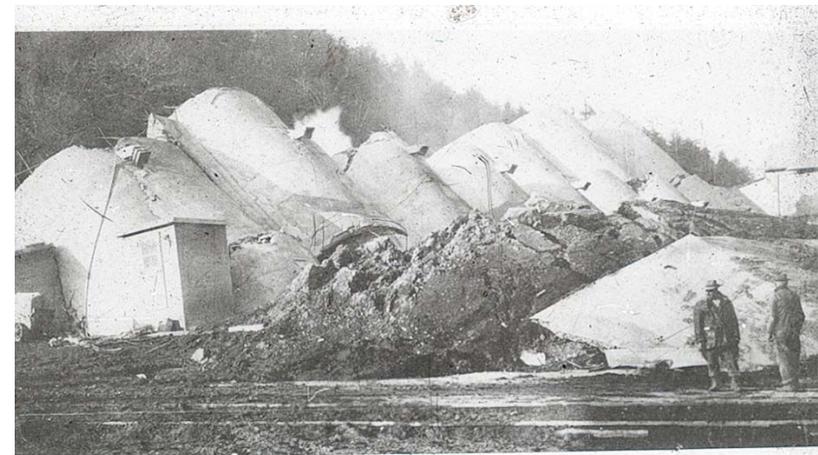
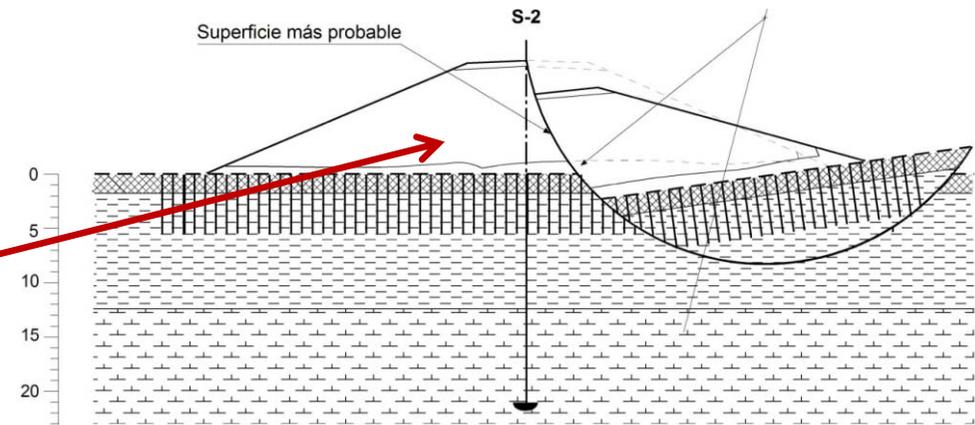
□ Obviamente existirá también toda la gama de situaciones intermedias, con drenaje o disipación parcial de  $\Delta u$ . No obstante, en general la situación más desfavorable suele ser alguna de las dos anteriores, lo que facilita los cálculos (no hay que deducir o calcular lo que queda de  $\Delta u$  en cada momento t).

# EL “COMPLETO”: POCO RESISTENTE, MUCHO ASIENTO Y MUCHO TIEMPO: LOS SUELOS ARCILLOSOS BLANDOS

Desde el punto de vista de la resistencia o la estabilidad, cuando se construye sobre un suelo arcilloso blando y saturado, la situación más desfavorable suele ser la inicial, justo tras la carga, antes de que haya dado tiempo a que se disipen los excesos de presión intersticial (carga sin drenaje). De hecho, no es infrecuente que se produzcan roturas y hundimientos en estas condiciones.



Ejemplo de rotura “sin drenaje”. Terraplén sobre marisma (Variante de Lebrija, Sevilla).



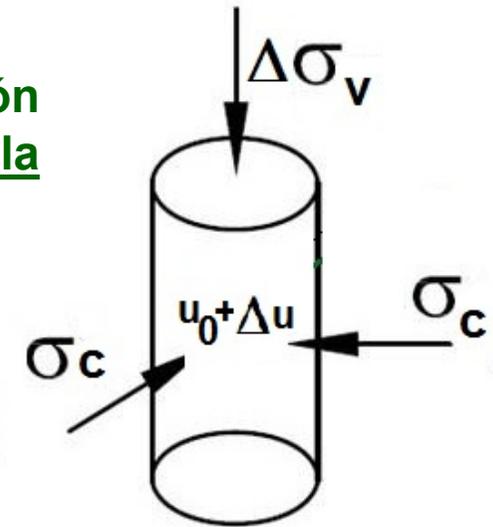
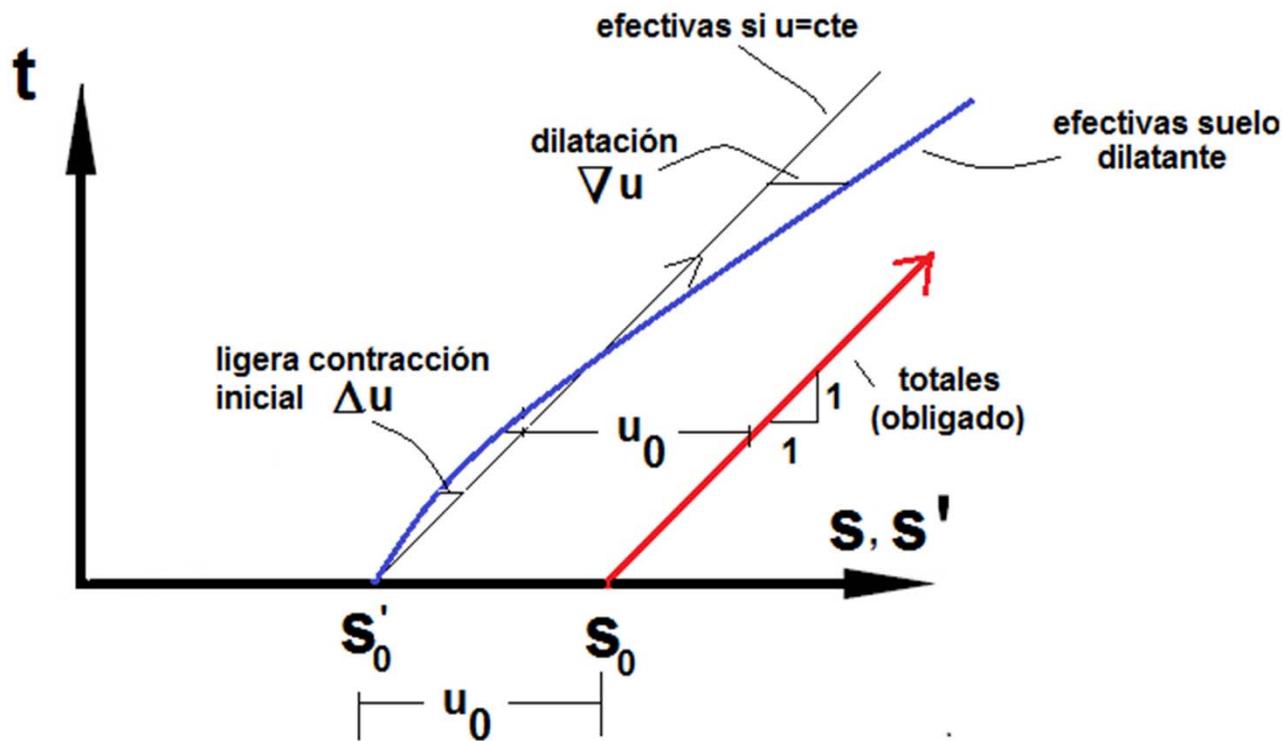
Unos silos de la bibliografía (En estas construcciones las condiciones de carga rápida se cumplen con facilidad por las pruebas de estanqueidad)

Cuando la resistencia y la estabilidad constituyen un problema, se puede reforzar el terreno (aunque a veces es suficiente llevar a cabo una construcción lenta, por etapas)

# EL ENSAYO TRIAXIAL CU (CONSOLIDADO, SIN DRENAJE Y CON MEDIDA DE LA PRESIÓN INTERSTICIAL)

## RECORRIDO DE TENSIONES ( $s'$ , $t$ ) SUELO DILATANTE

En un suelo dilatante, al generarse decrementos de presión intersticial el recorrido de tensiones efectivas se desvía hacia la derecha



$$\Delta t = \frac{\Delta \sigma'_v - \Delta \sigma'_h}{2}$$

$$\Delta s' = \frac{\Delta \sigma'_v + \Delta \sigma'_h}{2}$$

# EL ENSAYO TRIAXIAL CU (CONSOLIDADO, SIN DRENAJE Y CON MEDIDA DE LA PRESIÓN INTERSTICIAL)

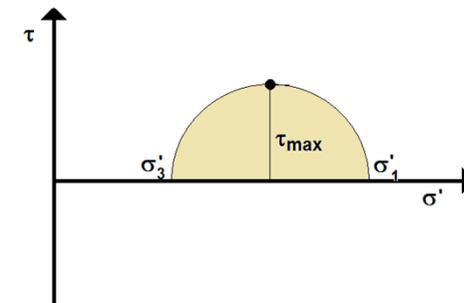
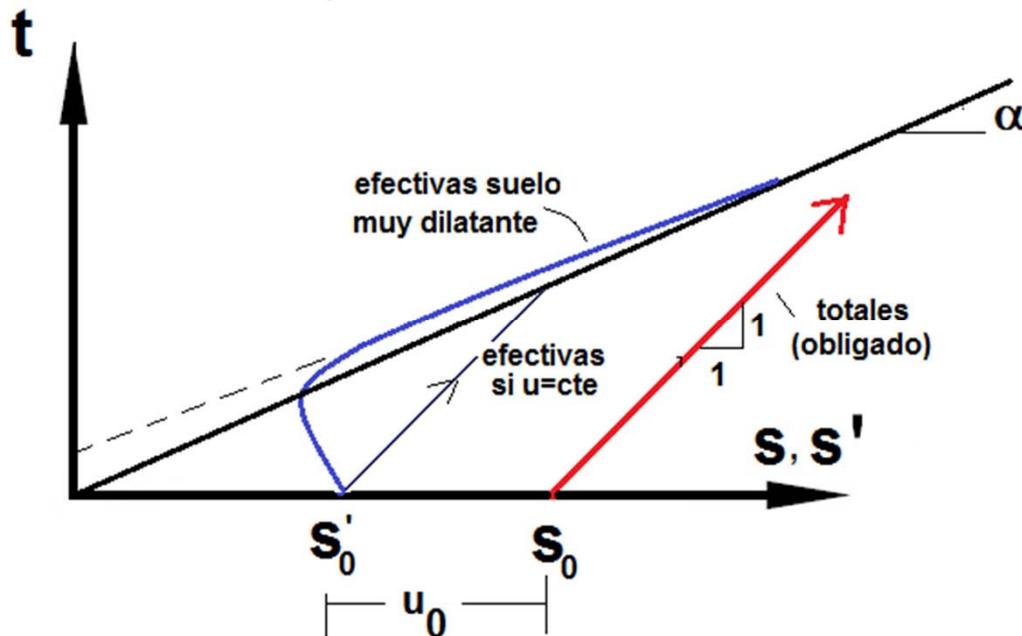
## RECORRIDO DE TENSIONES ( $s'$ , $t$ ) SUELO DILATANTE

..... Y si el suelo está sobreconsolidado, el recorrido de tensiones podrá rebasar la envolvente de rotura del suelo NC (pico). Después se desvía hacia la derecha y “viaja” dilatando (reduciendo  $u$ ) hasta alcanzar con suficiente deformación un estado similar al del suelo NC (si no rompe antes, que a veces pasa)

(Recordar las clases de resistencia al corte básica)

Como puede observarse, la resistencia al corte sin drenaje en este caso puede ser bastante elevada, función de OCR y del tipo de terreno

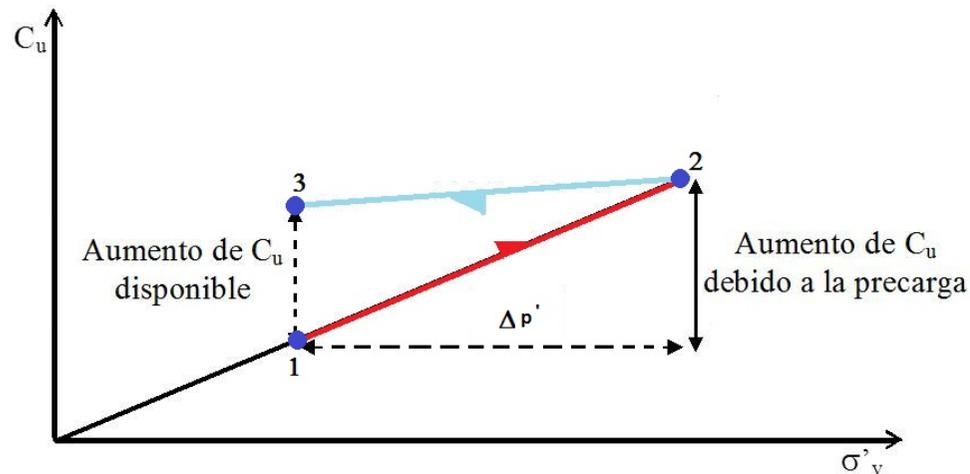
Al reducirse la presión intersticial con la carga, el suelo buscará el equilibrio “hinchando”, esto es, absorbiendo agua



# EL ENSAYO TRIAXIAL CU (CONSOLIDADO, SIN DRENAJE Y CON MEDIDA DE LA PRESIÓN INTERSTICIAL

## RECORRIDO DE TENSIONES ( $s'$ , $t$ ) SUELO DILATANTE (OC ó SC)

..... Y si el suelo está sobreconsolidado,



$$\left( \frac{S_u}{\sigma'_v} \right)_{OC} \approx (0.23 \pm 0.04) \cdot OCR^{0.8}$$

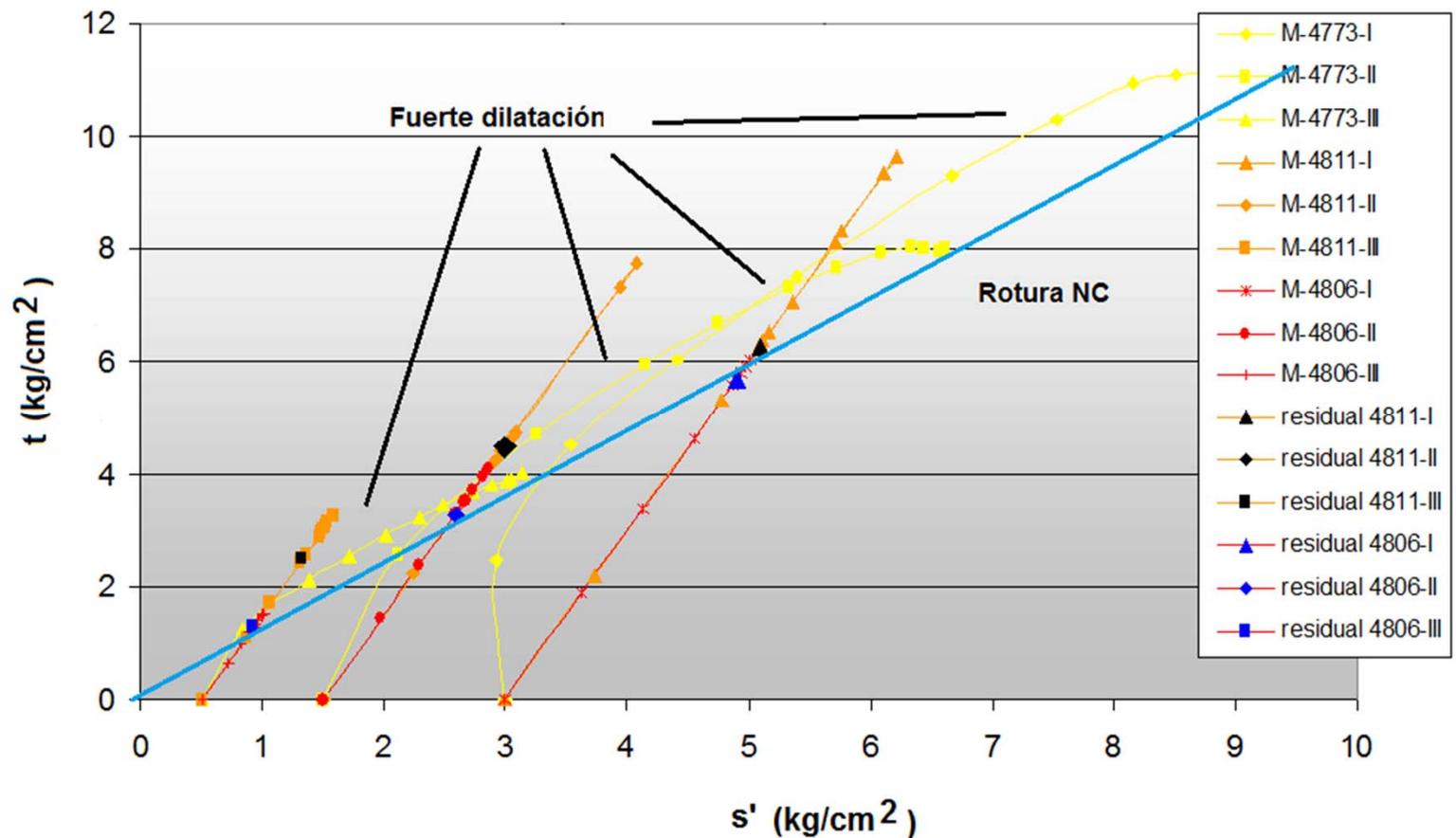
Tomada de Alonso, E. (2011)

# EL ENSAYO TRIAXIAL CU (CONSOLIDADO, SIN DRENAJE Y CON MEDIDA DE LA PRESIÓN INTERSTICIAL)

## EJEMPLO DE SUELO DILATANTE. ARCILLAS TERCIARIAS DE CARTAGENA

Arcillas limosas amarillentas. % Finos 75- 90 %,  $w_l$  32 - 45 %,  $IP$  11 - 21 %. Clasificación según Casagrande CL (arcilla de baja plasticidad). Densidad seca de  $1.8 \text{ t/m}^3$ ,  $w(\text{nat})\%$  del 19%.

- NOTAS:
- Los ensayos CU son los de línea amarilla
- Se observa cómo sobrepasan la envolvente del material NC y se curvan mucho a la derecha, dilatando fuertemente.
- Se observa cómo buscan la envolvente NC
- Este tipo de información es imposible con círculos de Mohr.

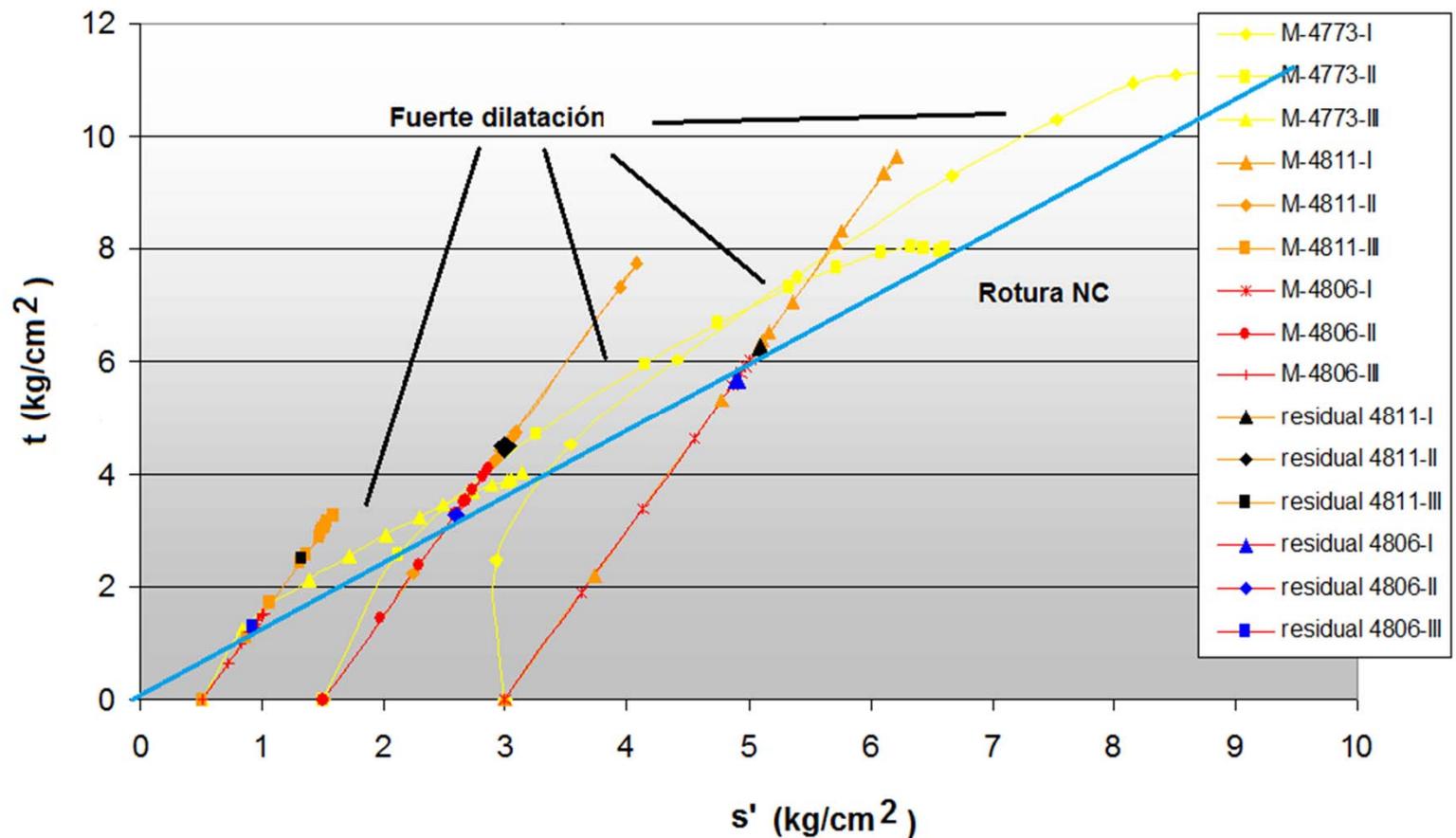


# EL ENSAYO TRIAXIAL CU (CONSOLIDADO, SIN DRENAJE Y CON MEDIDA DE LA PRESIÓN INTERSTICIAL)

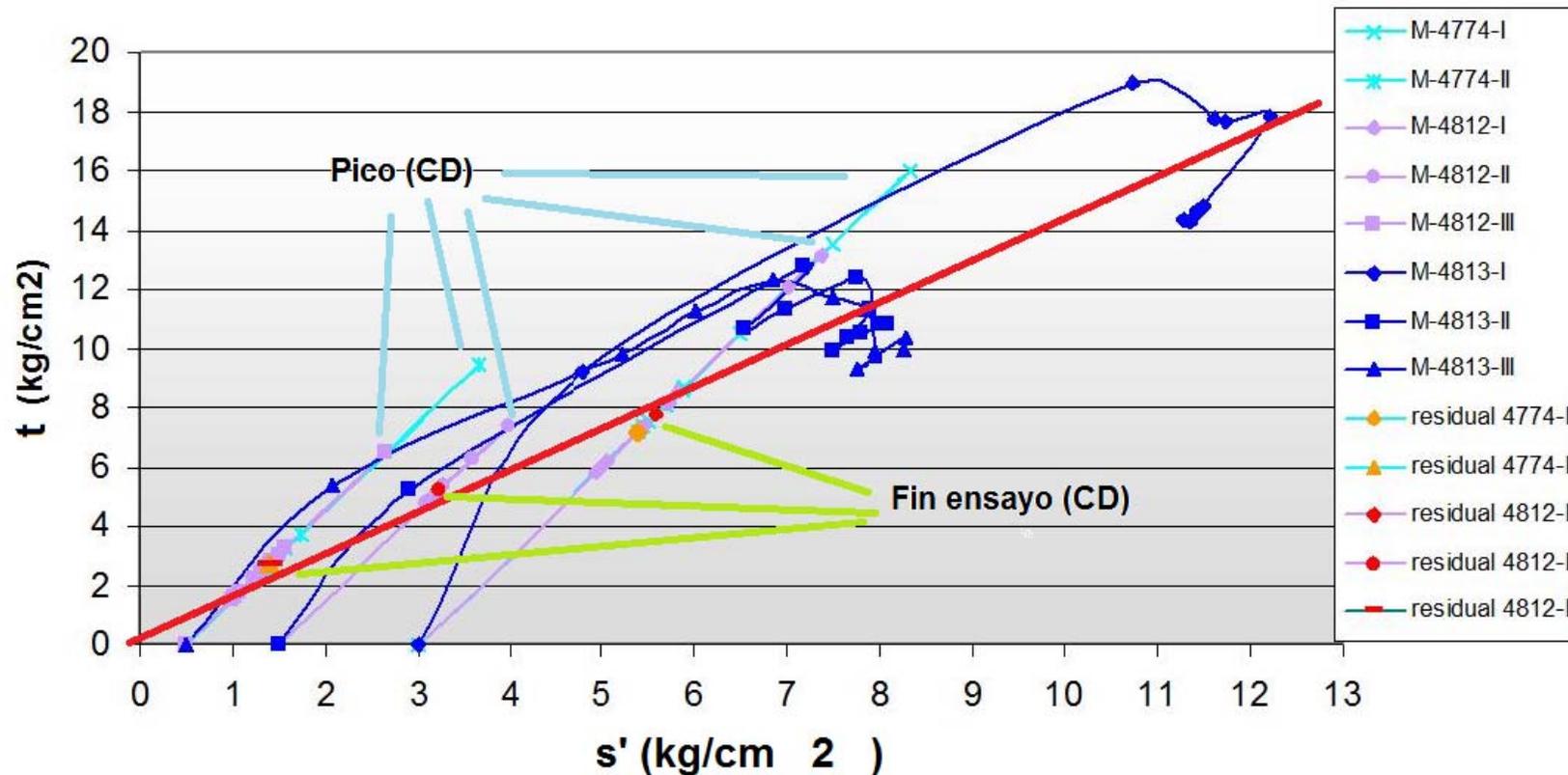
## EJEMPLO DE SUELO DILATANTE. ARCILLAS TERCIARIAS DE CARTAGENA

Arcillas limosas amarillentas. % Finos 75- 90 %,  $w_l$  32 - 45 %,  $IP$  11 - 21 %. Clasificación según Casagrande CL (arcilla de baja plasticidad). Densidad seca de  $1.8 \text{ t/m}^3$ ,  $w(\text{nat})\%$  del 19%.

- NOTAS:
- Los ensayos CU son los de línea amarilla
- Se observa cómo sobrepasan la envolvente del material NC y se curvan mucho a la derecha, dilatando fuertemente.
- Se observa cómo buscan la envolvente NC
- Este tipo de información es imposible con círculos de Mohr.



## EJEMPLO DE SUELO DILATANTE. ARCILLAS TERCIARIAS DE CARTAGENA



# EL ENSAYO TRIAXIAL CU (CONSOLIDADO, SIN DRENAJE Y CON MEDIDA DE LA PRESIÓN INTERSTICIAL)

## Consideraciones sobre la ausencia de drenaje y la respuesta de la presión intersticial.

Habitualmente para procesos de carga sin drenaje se emplean los parámetros de presión intersticial propuestos por Skempton en 1954:

$$\Delta u = B \Delta \sigma_3 + A \cdot (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$$

$B=1$  si el suelo está saturado, y  $A$  es un parámetro que depende del tipo de suelo. Teniendo en cuenta que en la fase de corte la presión total de cámara permanece constante ( $\Delta \sigma_h=0$ ), la expresión anterior queda reducida a  $\Delta u = A \cdot (\Delta \sigma_v)$

y en el momento de la rotura:  $\Delta u_f = A_f \cdot (\Delta \sigma_1)_f$

Como  $(\Delta \sigma_1)_f$  es positivo, el “signo” de  $(\Delta u)_f$  depende exclusivamente de  $A_f$ . En la tabla siguiente se recoge un orden de magnitud del parámetro  $A$  en rotura para algunos suelos (Skempton, 1954)

Tipo de suelo	$\Delta V$ en ensayos con drenaje	$A_f$ en ensayos triaxiales sin drenaje
Arcilla sensitiva	Gran contracción	+0,75 → + 1,5
Arcilla normalmente consolidada	Contracción	+0,50 → + 1,0
Arcilla arenosa compactada	Ligera contracción	+0,25 → + 0,75
Arcilla ligeramente sobreconsolidada	Ligera a nula contracción	+0,00 → + 0,5
Grava arcillosa compactada	Dilatación/contracción	-0,25 → + 0,25
Arcilla muy sobreconsolidada	Dilatación	-0,50 → 0,0

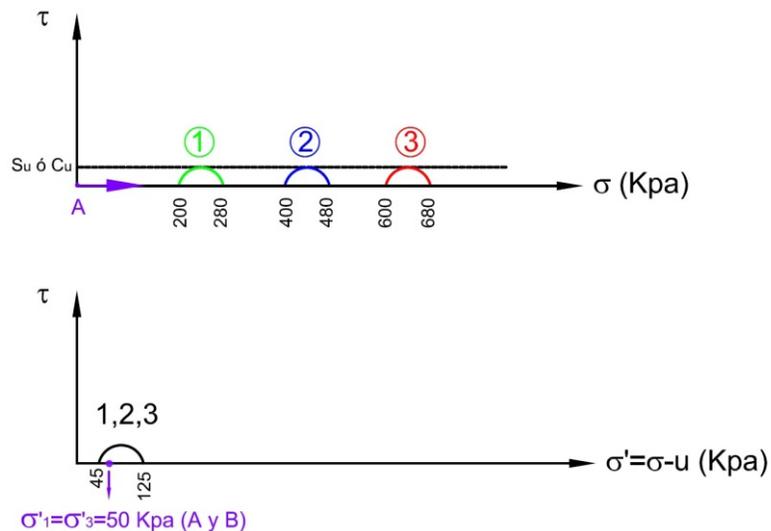
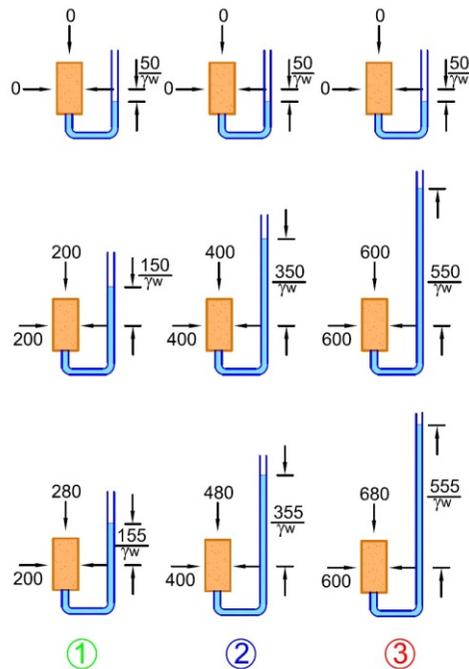
# EL ENSAYO TRIAXIAL UU, SIN CONSOLIDACIÓN PREVIA Y ROTURA SIN DRENAJE

Este ensayo presenta la particularidad de que la válvula de drenaje y de introducción de presión intersticial (b) permanecen siempre cerradas.

En la primera fase se aplica simplemente una presión isótropa de célula ( $\sigma_v = \sigma_h = \sigma_c$ ) impidiendo el drenaje. Si la probeta está saturada, en ausencia de drenaje toda la tensión total de cámara se transmite al líquido intersticial, y por lo tanto las tensiones efectivas iniciales en el suelo no varían.

Por ello, aunque se lleven a cabo tres ensayos en tres muestras idénticas y se apliquen tres tensiones de cámara distintas, las tensiones efectivas iniciales son las mismas en las tres muestras. Este hecho da lugar a que al ejecutar la fase de corte, también sin drenaje, el desviador de rotura  $(\Delta\sigma_1)_f$  resulte siempre el mismo. En dicha fase se miden el incremento de tensión vertical total  $(\Delta\sigma_1)$  y la deformación axial  $\varepsilon_v$ .

# EL ENSAYO TRIAXIAL UU, SIN CONSOLIDACIÓN PREVIA Y ROTURA SIN DRENAJE



## EJEMPLO 1 DE ENSAYO TRIAXIAL UU

En la figura, tomada de Simons & Menzies, se representa un ensayo triaxial UU con las siguientes características:

- La presión intersticial inicial es negativa\*\* ( $u = -50$  kPa)
- Se aplican tres presiones totales de cámara distintas: 200, 400 y 600 kPa.
- Como la válvula de drenaje está cerrada, todo el incremento de presión total se transforma en incremento de presión intersticial ( $u$  sube a 150, 350 y 550 kPa).
- Las tensiones efectivas de las tres probets son idénticas: 50, 50 y 50 kPa
- En la fase de corte se mantienen las válvuloas cerradas y se llega a rotura con desviadores de: 80, 80 y 80 kPa
- Sólo hay un círculo de Mohr en tensiones efectivas

- ❑ Alonso, E. (2011): “Resistencia al Esfuerzo Cortante de Suelos”. Curso sobre la Resistencia del Terreno y los Nuevos Métodos de Cálculo de Estabilidad de Taludes en Carreteras y Ferrocarriles. CIESM-INTEVIA. Madrid.
- ❑ González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. & Oteo, C. (2002): “Ingeniería Geológica”. Prentice Hall. Madrid.
- ❑ Jiménez Salas, J.A. y Justo Alpañés, J.L. (1975): Geotecnia y Cimientos I. Cap. 5. Ed Rueda. Madrid.
- ❑ Simons N. & Menzies, B. (2005): “A Short Course on Foundation Engineering”. Thomas Telford. London.
- ❑ Ortuño Abad, L. (2012): “Curso de Geotecnia”. Módulo de Terraplenes y Obras de Tierra”. Administradora Boliviana de Carreteras. La Paz, Agosto de 2012