

Geotecnia y Prospección Geofísica

Tema 6. Deformabilidad y resistencia de los suelos



Jorge Cañizal Berini
Gema Fernández Maroto
Marina Miranda Manzanares

Departamento de Ciencia e Ingeniería del
Terreno y de los Materiales

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



ÍNDICE

- 6.1.** Modelos de comportamiento:
- 6.2.** El Modelo de Mohr-Coulomb.
- 6.3.** Efecto del agua. Resistencia con y sin drenaje.
- 6.4.** Ensayo de corte directo.
- 6.5.** Resistencia al corte sin drenaje.
- 6.6.** Resistencia a corto y largo plazo.
- 6.7.** Ensayo triaxial:
 - 6.7.1.** Estado de tensiones en la muestra extraída.
 - 6.7.2.** Ensayo de compresión simple.

6.1. MODELOS DE COMPORTAMIENTO

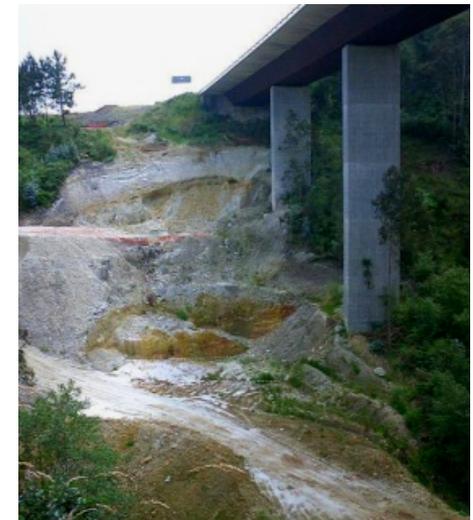
Concepto y objetivo

- Predecir la respuesta del suelo frente a esfuerzos, en general complejos, producidos por la obra a construir.

1. Observación de la **respuesta del suelo ante ensayos de laboratorio** o de campo consistentes en un **sistema de cargas relativamente sencillo**.



3. Predecir la **respuesta ante la obra concreta**, a través de Modelos de Comportamiento.



2. Interpretación con **Modelo de Comportamiento**.

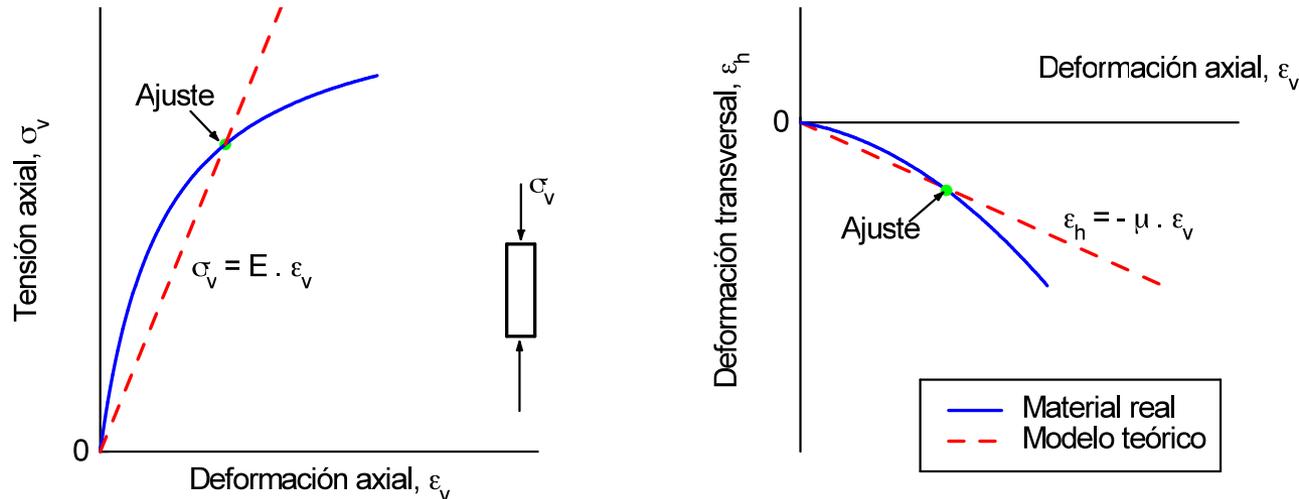


6.1. MODELOS DE COMPORTAMIENTO

Concepto y objetivo

• Modelos de Comportamiento Mecánico:

Conjunto de postulados (o premisas) que definen las leyes que relacionan las tensiones y las deformaciones.



Interpretación ensayo compresión simple con modelo elástico lineal.
Parámetros del modelo (E y μ).

- Se dice: "el terreno tiene un módulo de elasticidad de $E = 5 \cdot 10^4$ kPa".
- Se debería decir: "el terreno se comporta como un material elástico con $E = 5 \cdot 10^4$ kPa".

6.1. MODELOS DE COMPORTAMIENTO

Concepto y objetivo

- Es posible imaginar infinidad de modelos de comportamiento y cualquiera de ellos puede ser válido si cumple unas mínimas condiciones de tipo matemático y físico.
- Pero sólo son de utilidad práctica los que cumplen las siguientes condiciones:
 - Que proporcionen predicciones razonablemente similares al comportamiento real.
 - Que respondan a expresiones matemáticas sencillas⁽¹⁾.
 - Que dependan de pocos parámetros⁽²⁾.

⁽¹⁾ Sólo con formulaciones sencillas (p.e.: solución elástica o edométrica para relación entre tensiones y deformaciones, Mohr-Coulomb en situación de rotura) o, es posible obtener una solución analítica.

⁽²⁾ Cada parámetro requiere al menos de un ensayo para su caracterización.

6.1. MODELOS DE COMPORTAMIENTO

Mecánico

• Los Modelos Elastoplásticos:

– Dominio elástico:

No rotura. Relación entre tensiones y deformaciones.



Obtención de desplazamientos: movimientos del terreno

– Criterio de plastificación o rotura:

Relación entre las tensiones que no puede ser superada (frontera):

▪ 1 dimensión (sólo una tensión):

- Tensión a tracción (o compresión).



▪ 2 dimensiones (σ_1, σ_3):

- Tensión tangencial máxima (Tresca).

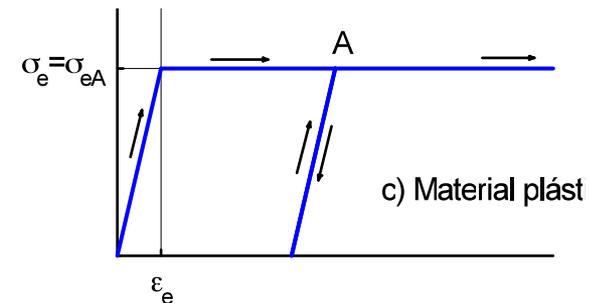
- **Mohr-Coulomb.**

▪ 3 dimensiones ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$):

- Tensión tangencial octaédrica (Von Mises).
- Drucker-Prager.

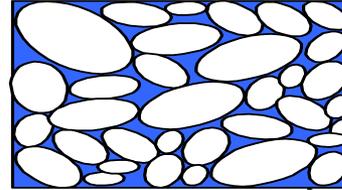
– Deformaciones elásticas y plásticas:

Alcanzada la plastificación (en la frontera).



6.2. EL MODELO DE MOHR-COULOMB

- El suelo es un agregado de partículas.



- La rotura podría ser por:

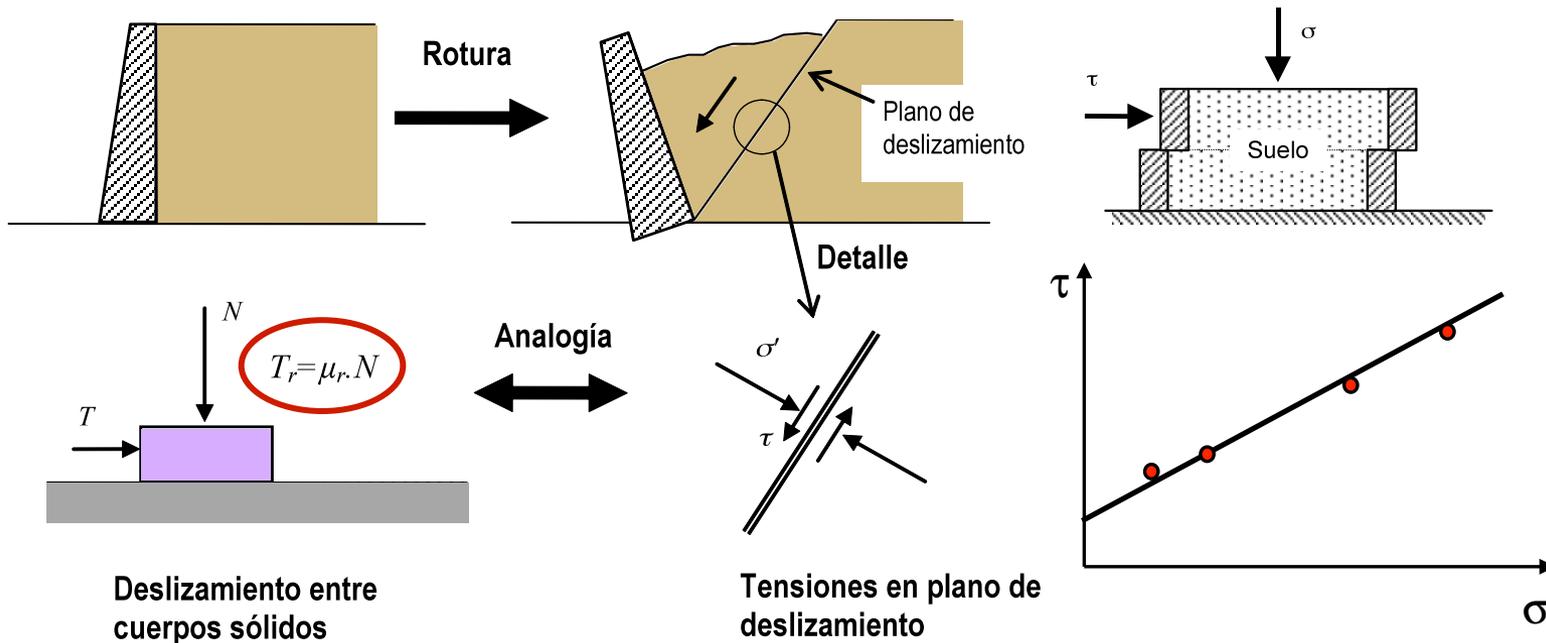
- Deslizamiento de partículas → Rotura a corte.
- Separación de partículas → Rotura a tracción.
- Aplastamiento de partículas → Rotura a compresión octaédrica a elevadísimas presiones.

- Resistencia a tracción de los suelos prácticamente nula.
- Aplastamiento de partículas sólo ocurre para cargas muy altas.
- En casos normales, la **ROTURA** se produce **POR CORTE**.

Cuando se habla de resistencia de suelos, se entiende RESISTENCIA AL CORTE.

6.2. EL MODELO DE MOHR-COULOMB

Criterio de Coulomb (1773). Cohesión y ángulo de rozamiento



$$\tau = \sigma' \tan \phi \quad (\text{en suelos granulares})$$

$$\tau = c + \sigma' \tan \phi \quad (\text{en suelos cohesivos})$$

c = cohesión

ϕ = ángulo de rozamiento interno

6.2. EL MODELO DE MOHR-COULOMB

- **Aplicación del criterio de Coulomb al terreno:**

- Cuando se conoce o supone la superficie (plano) de posible rotura:

$$\tau = c + \sigma' \tan \phi$$

- Esta es la situación de deslizamiento a través de discontinuidades (rocas) o superficies de debilidad supuestas.
- Cuando no se conoce el plano de rotura: hay que establecer el criterio en términos de tensiones principales σ_i .

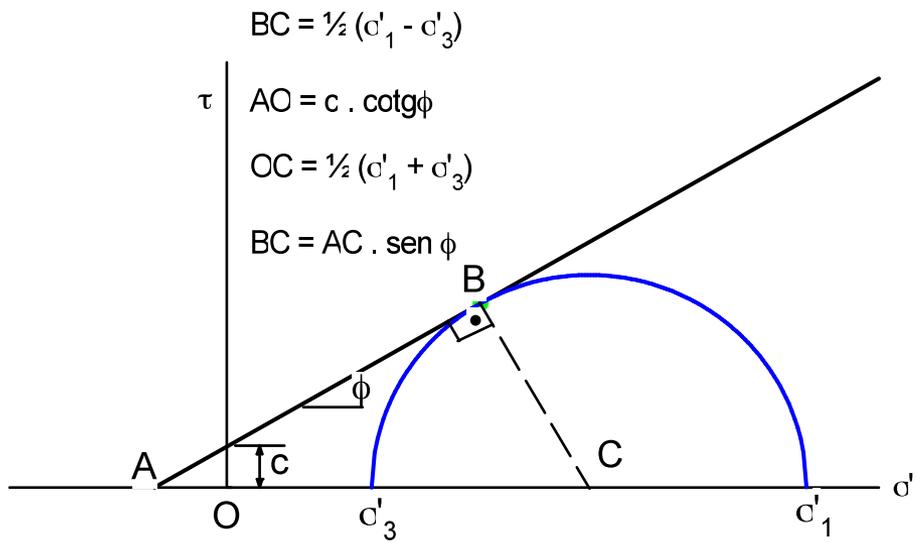
- **Formulación. Criterio de Mohr-Coulomb:**

- Mohr (1882) postuló: en un elemento de suelo sometido a cierto estado de tensión, se produce la rotura plástica cuando en alguno de los (infinitos) planos que pasan por él, el estado tensional cumple la relación definida por el criterio de Coulomb:

$$\tau = c + \sigma' \tan \phi$$

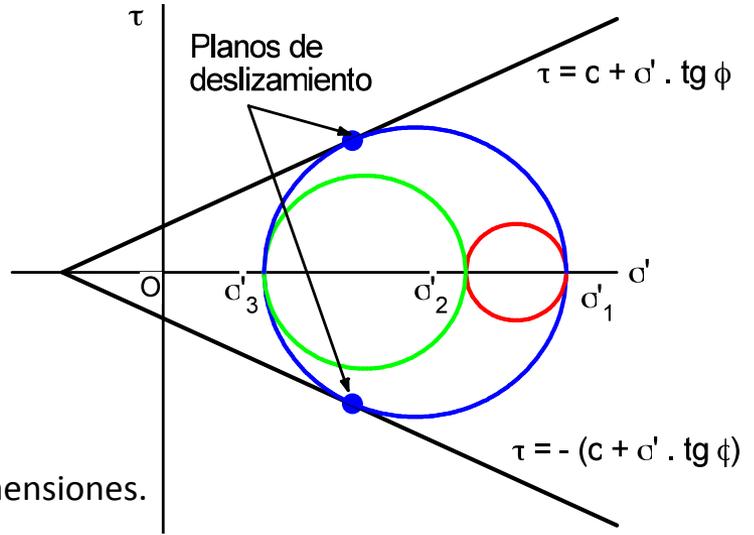
6.2. EL MODELO DE MOHR-COULOMB

- Esto es lo mismo que decir que el círculo de Mohr ha de ser tangente a la recta representativa del criterio de rotura.



$$\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} = c \cdot \cos \phi + \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \cdot \sin \phi$$

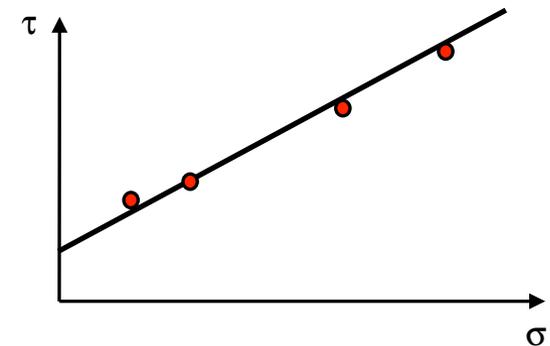
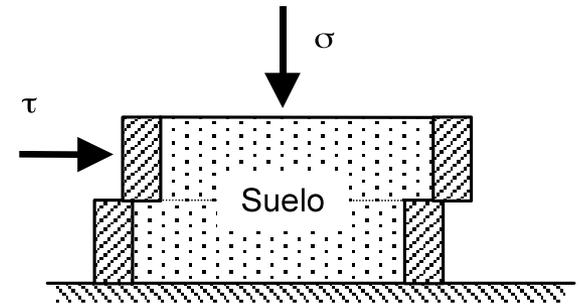
$$q = c \cdot \cos \phi + p' \cdot \text{sen } \phi$$



En 3 dimensiones.

6.2. EL MODELO DE MOHR-COULOMB

- La validez del criterio de Coulomb fue estudiada por él y otros autores posteriores resultando que:
 - En suelos **granulares**: se cumplía razonablemente con resistencia aproximadamente lineal y cohesión nula.
 - En suelos **arcillosos**: se encontraban grandes discrepancias para un mismo suelo (desde cohesión casi nula y ángulo de rozamiento elevado hasta resistencia puramente cohesiva con ángulo de rozamiento muy pequeño).



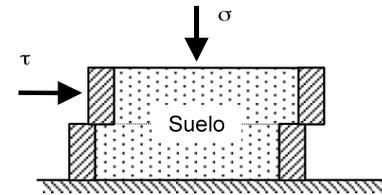
- La razón no se comprendió hasta que **Terzaghi** estableció el principio de tensiones efectivas en 1925.
- Se debe a las distintas condiciones de drenaje del agua intersticial.

6.3. EFECTO DEL AGUA. RESISTENCIA CON Y SIN DRENAJE

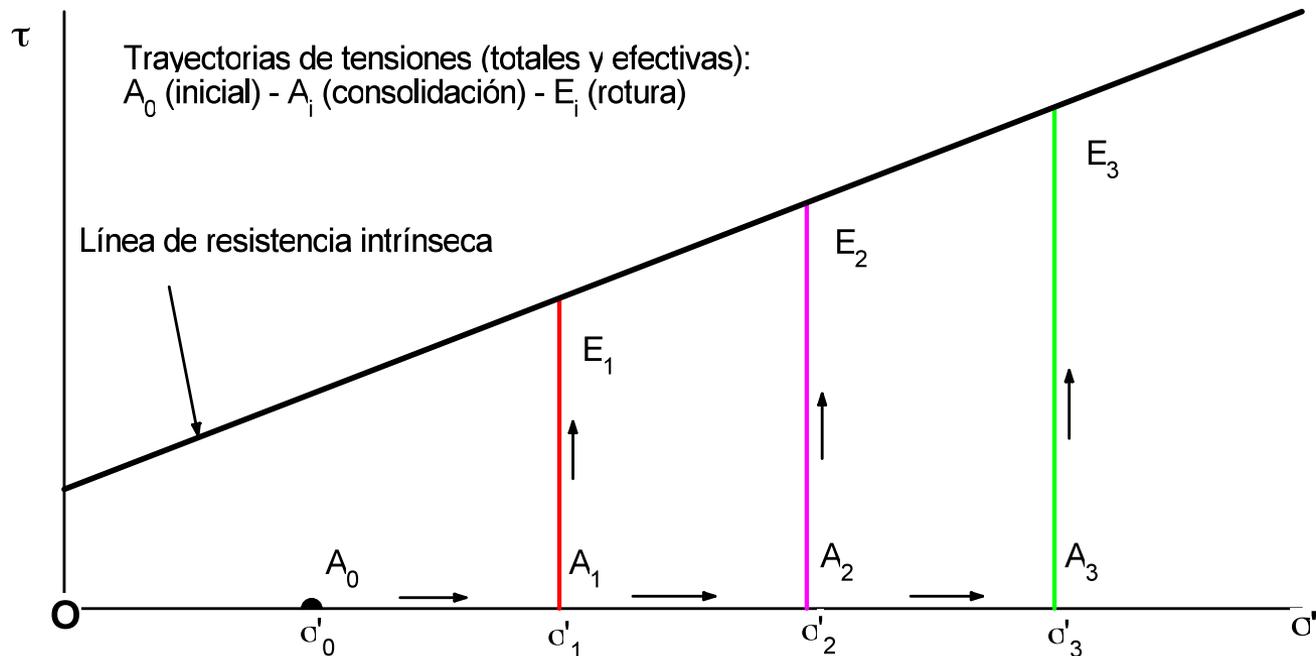
Ensayo con drenaje (suficientemente lento $u = u_a$)

- Trayectoria de tensiones. Resistencia:

- Las trayectorias han de establecerse en tensión normal – tensión tangencial.



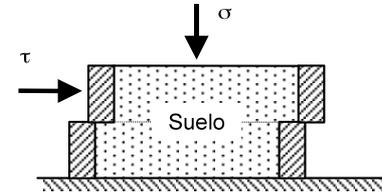
a) Ensayo con drenaje



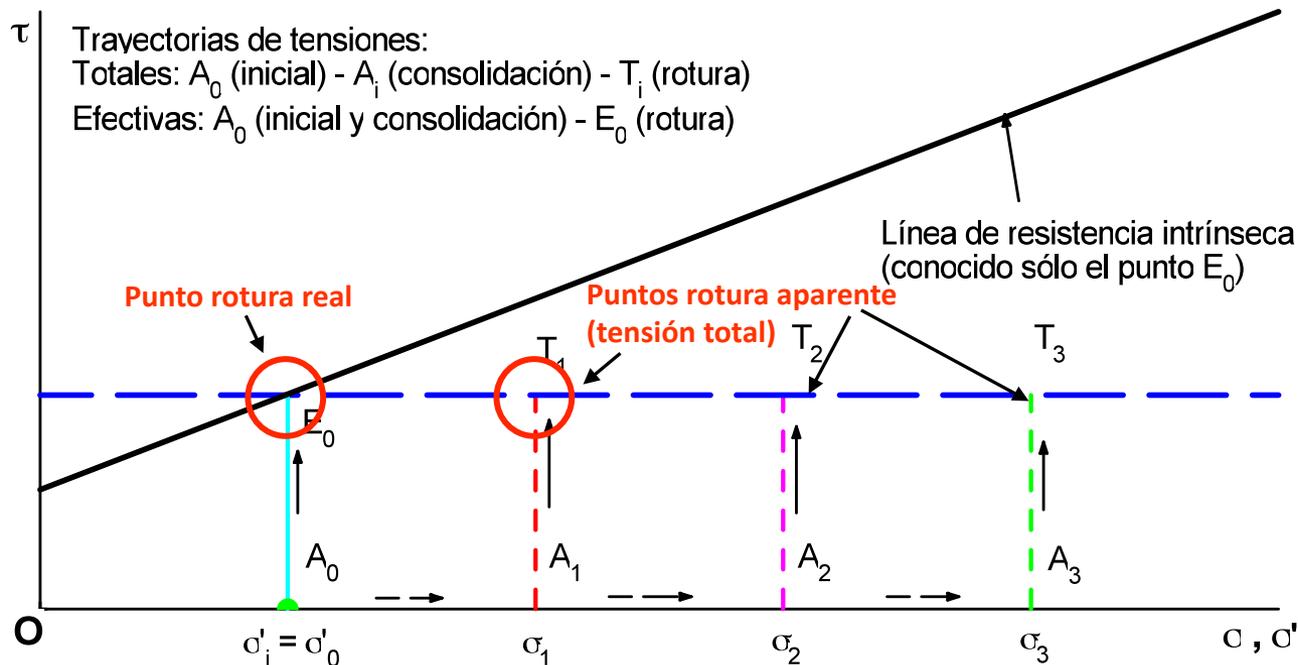
6.3. EFECTO DEL AGUA. RESISTENCIA CON Y SIN DRENAJE

Ensayo sin drenaje (infinitamente rápido)

- Trayectoria de tensiones. Resistencia:

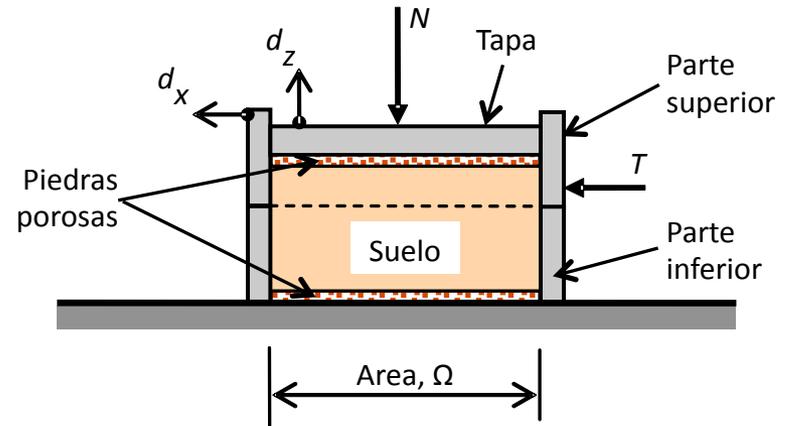
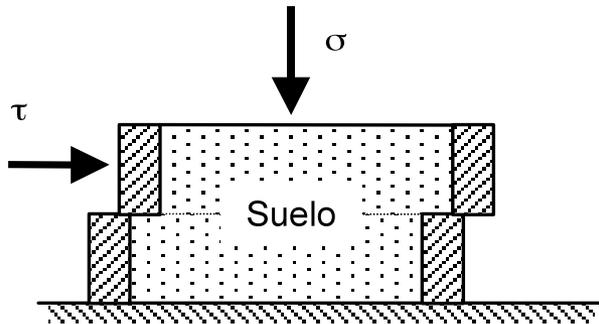


b) Ensayo sin drenaje



6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Descripción



$$\sigma_z = \frac{N}{\Omega}$$

$$\tau_{xz} = \frac{T}{\Omega}$$



Tamaños usuales de muestras: 50 a 100 mm.
Sección cuadrada o circular.

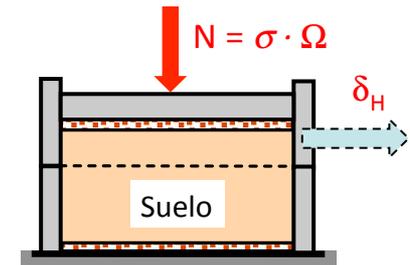
6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

- **Fases de un ensayo:**

- Saturación de la probeta para eliminar succiones (salvo en ensayo U).
- Aplicación de la presión normal σ .
- Rotura: desplazamiento horizontal genera tensión tangencial τ creciente hasta rotura.

- **Control del drenaje:**

- Suelos granulares: siempre drenaje total.
- Suelos arcillosos: control con la velocidad de cargas.



- **Tipos de ensayo:**

- Ensayos consolidados con drenaje (C-D): σ , τ se aplican con drenaje. Realizables en todo tipo de suelos.
- Ensayos consolidados-sin drenaje (C-U): σ se aplica con drenaje y τ sin drenaje. Realizable sólo en suelos poco permeables (arcillas y limos).
- Ensayos sin drenaje (U): σ , τ se aplican sin drenaje. Realizable sólo en suelos poco permeables (arcillas y limos).

6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Medidas que se realizan

- En la primera fase, si se permite la consolidación, se mide:
 1. Desplaz. vertical (δ_y).

- En fase de rotura se mide:
 1. Desplaz. horizontal (δ_x).
 2. Desplaz. vertical (δ_y).
 3. Tensión tangencial (τ).



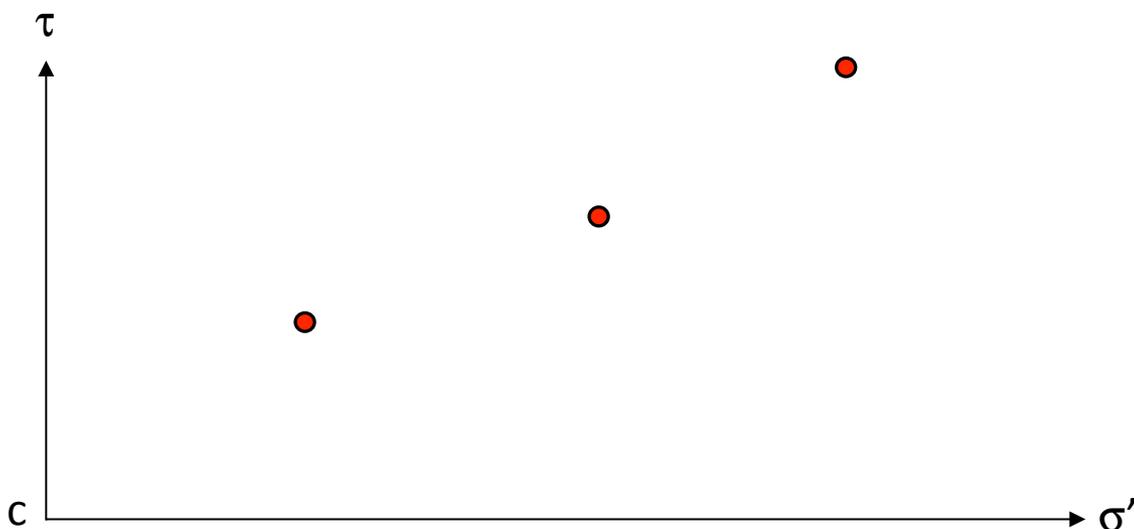
Las medidas de la fase de rotura se interpretan para la obtención de los valores de los parámetros resistentes, además de otros fenómenos.



6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Interpretación ensayos con drenaje (C-D)

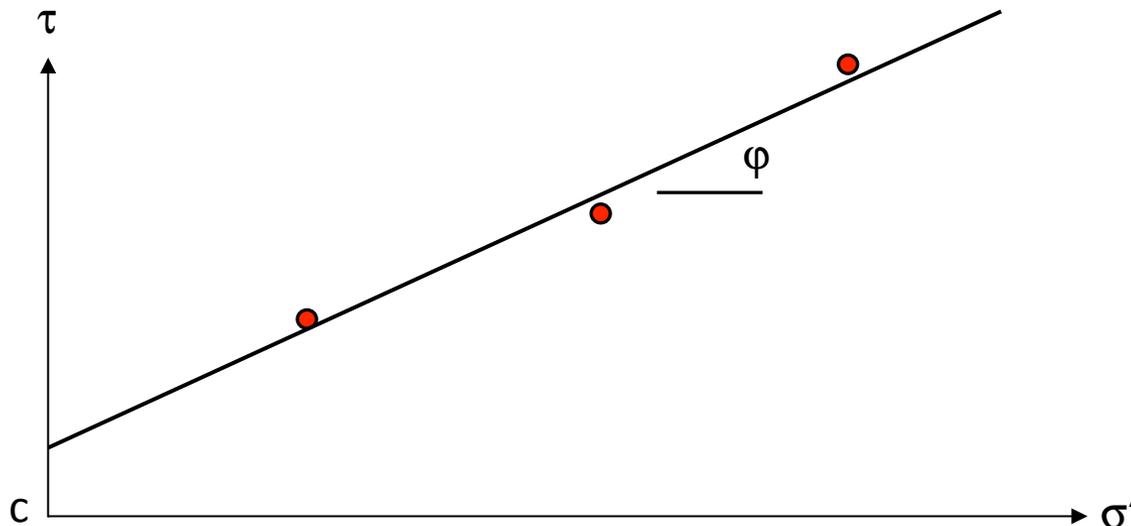
- Se realiza el ensayo con un mínimo de tres determinaciones (probetas) para tres valores diferentes de la tensión vertical.
- Se dibujan los puntos correspondientes a σ' , $\tau_{rot.}$ para cada probeta.
- Se ajustan a una recta (criterio de Coulomb), $\tau = c + \sigma' \tan \phi$
– Obteniendo $\rightarrow c$ y ϕ



6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Interpretación ensayos con drenaje (C-D)

- Se realiza el ensayo con un mínimo de tres determinaciones (probetas) para tres valores diferentes de la tensión vertical.
- Se dibujan los puntos correspondientes a σ' , $\tau_{rot.}$ para cada probeta.
- Se ajustan a una recta (criterio de Coulomb), $\tau = c + \sigma' \tan \phi$
– Obteniendo $\rightarrow c$ y ϕ



6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Interpretación ensayos con drenaje (C-D)

• Comportamiento real en arenas:

– Para un valor dado de la tensión normal:

Influye la densidad de la muestra.

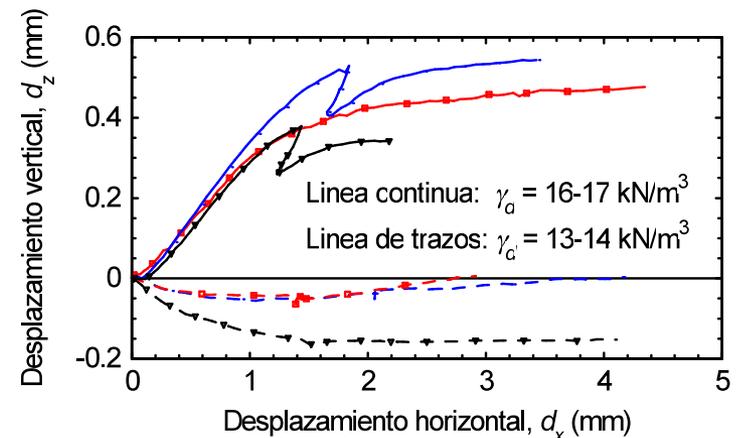
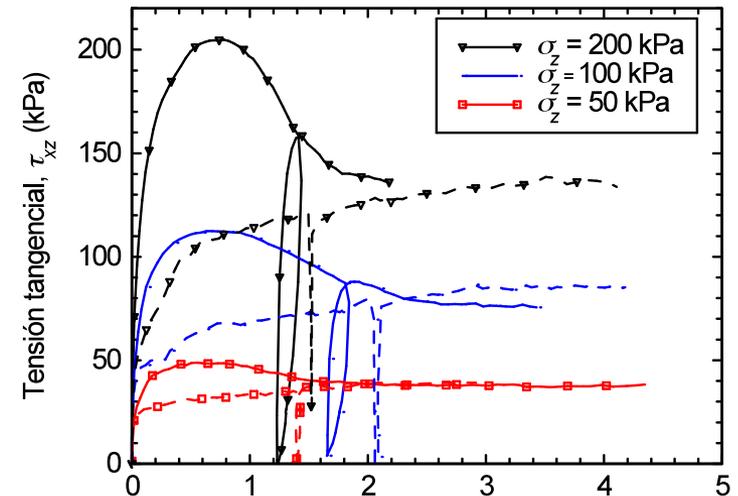
- Densa: si su compacidad es superior a la que corresponde a la tensión vertical σ'_z del ensayo
- Floja: en caso contrario.

– Influencia de la densidad:

- Densa → Tiene resistencia de pico.
- Floja → No tiene resistencia de pico.
- Densa → $\Delta\text{Volumen} > 0$.
- Floja → $\Delta\text{Volumen} < 0$.
(según la elasticidad debería ser 0).
- Para desplazamientos elevados:
 - La resistencia es la misma.
 - Ya no hay cambio de volumen.
(indicio de haber llegado a la misma densidad).

→ Estado crítico

→ Resistencia crítica

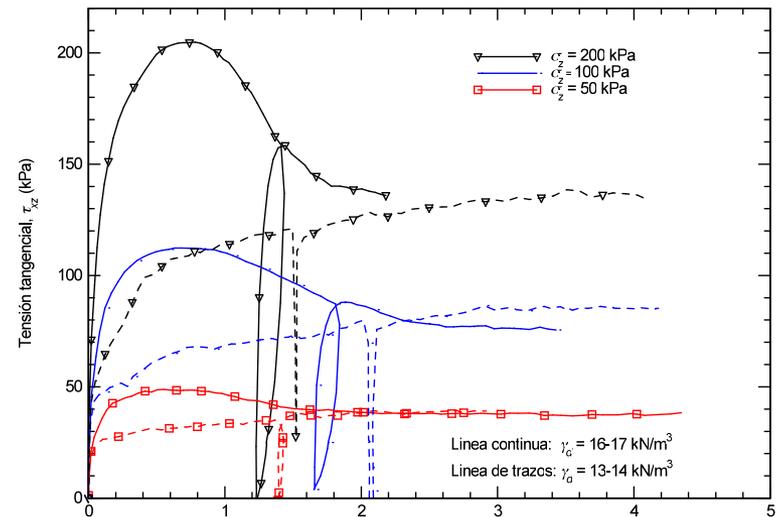
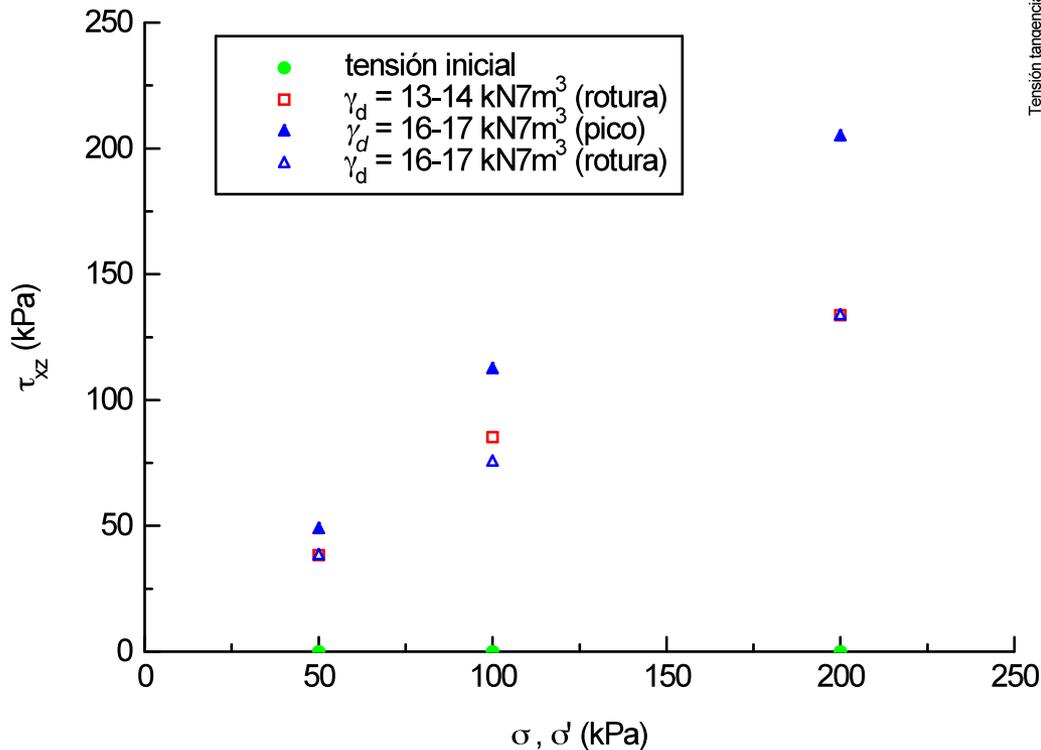


6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Interpretación ensayos con drenaje (C-D)

- Comportamiento real en arenas:**

- Influencia de la tensión normal:



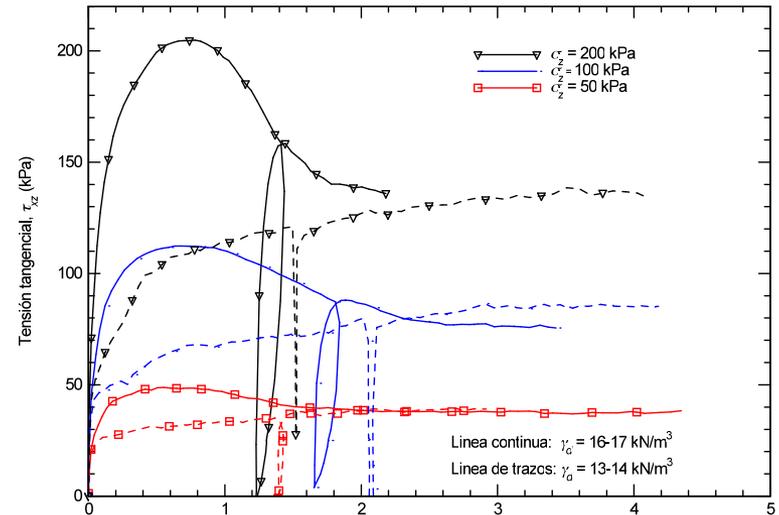
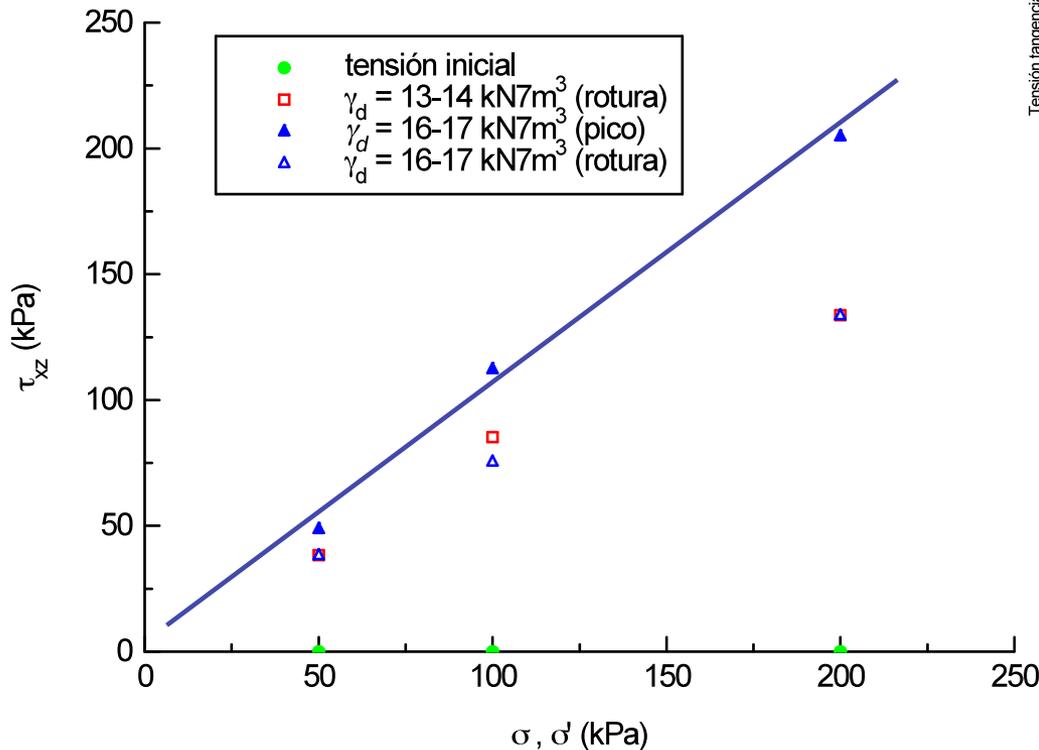
- La resistencia de pico (ϕ) es función de la densidad y siempre es mayor que la crítica.

6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Interpretación ensayos con drenaje (C-D)

• Comportamiento real en arenas:

– Influencia de la tensión normal:



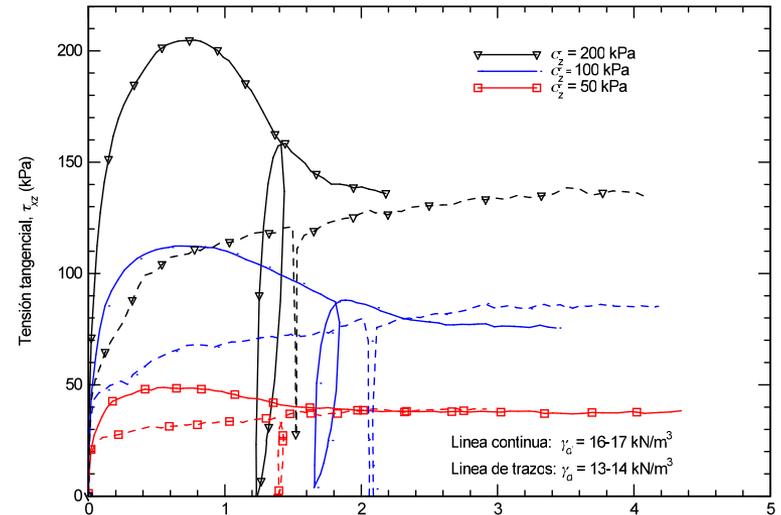
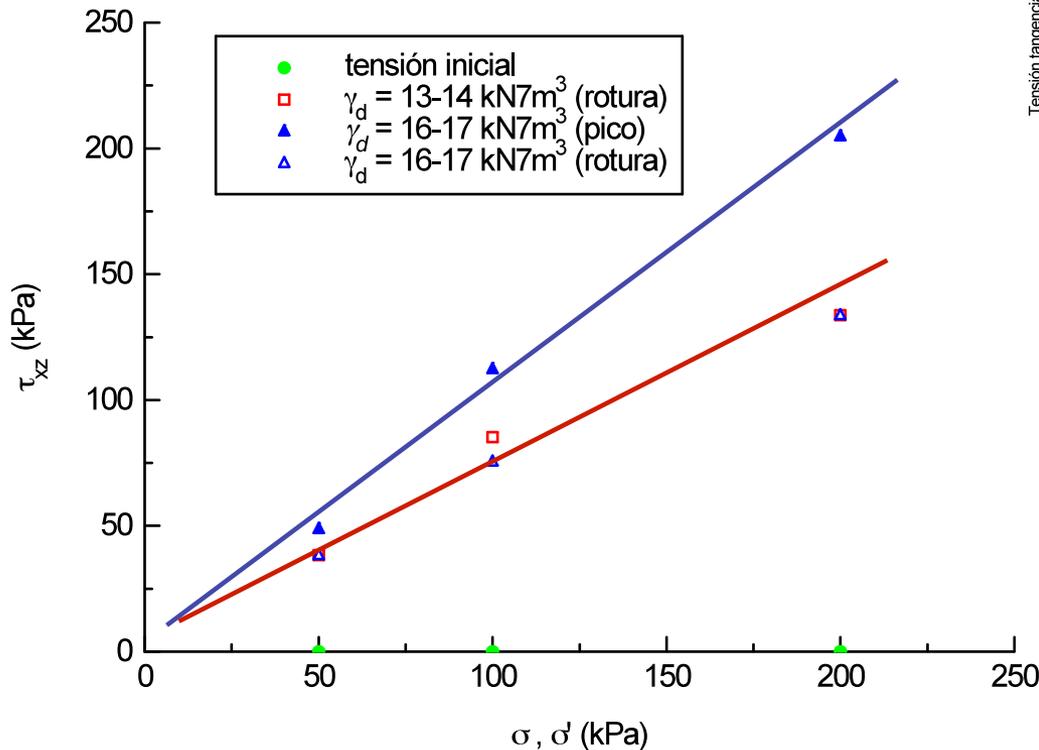
• La resistencia de pico (ϕ) es función de la densidad y siempre es mayor que la crítica.

6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Interpretación ensayos con drenaje (C-D)

- Comportamiento real en arenas:**

- Influencia de la tensión normal:

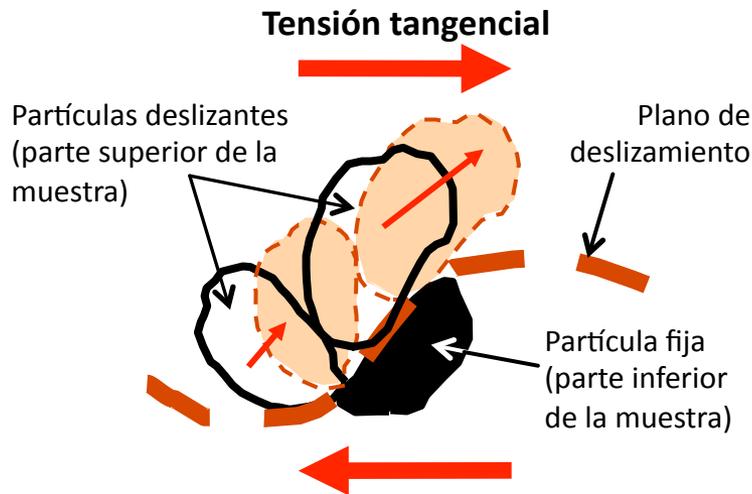


- La resistencia de pico (ϕ) es función de la densidad y siempre es mayor que la crítica.

6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Interpretación ensayos con drenaje (C-D)

• Comportamiento real en arenas:

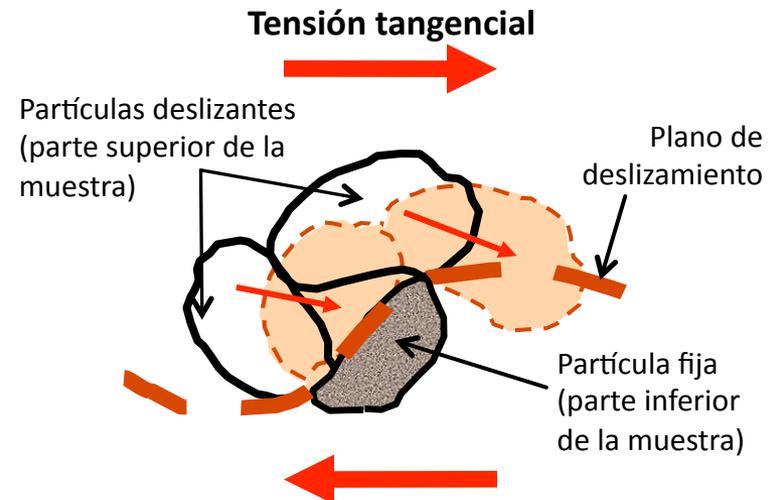


– Suelo denso (SC):

- Resistencia de pico y residual.
- Dilatancia positiva.

– Suelo flojo (NC):

- No resistencia de pico.
- Dilatancia negativa.



6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Interpretación ensayos con drenaje (C-D)

- Comportamiento real en arcillas:

(Cargas aplicadas muy lentamente para asegurar drenaje).

– Comportamiento cuantitativamente similar a las arenas.

ARENAS

- Denso:

- Tensión de pico – crítica.
- Dilatancia positiva.

- Flojo:

- Tensión crítica (no pico).
- Dilatancia negativa.

ARCILLAS

- Sobreconsolidada:

- Tensión de pico – crítica.
- Dilatancia positiva.

- **Normalmente consolidada o ligeramente sobreconsolidada $RSC \leq 1.5$ (aprox.):**

- Tensión crítica (no pico).
- Dilatancia negativa.

6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Interpretación ensayos consolidados sin drenaje (C-U)

- **En ensayos sin drenaje no hay admisión ni expulsión de agua de los poros:**
(Volumen de agua constante).

- **Suelo saturado.**

No hay cambio de volumen

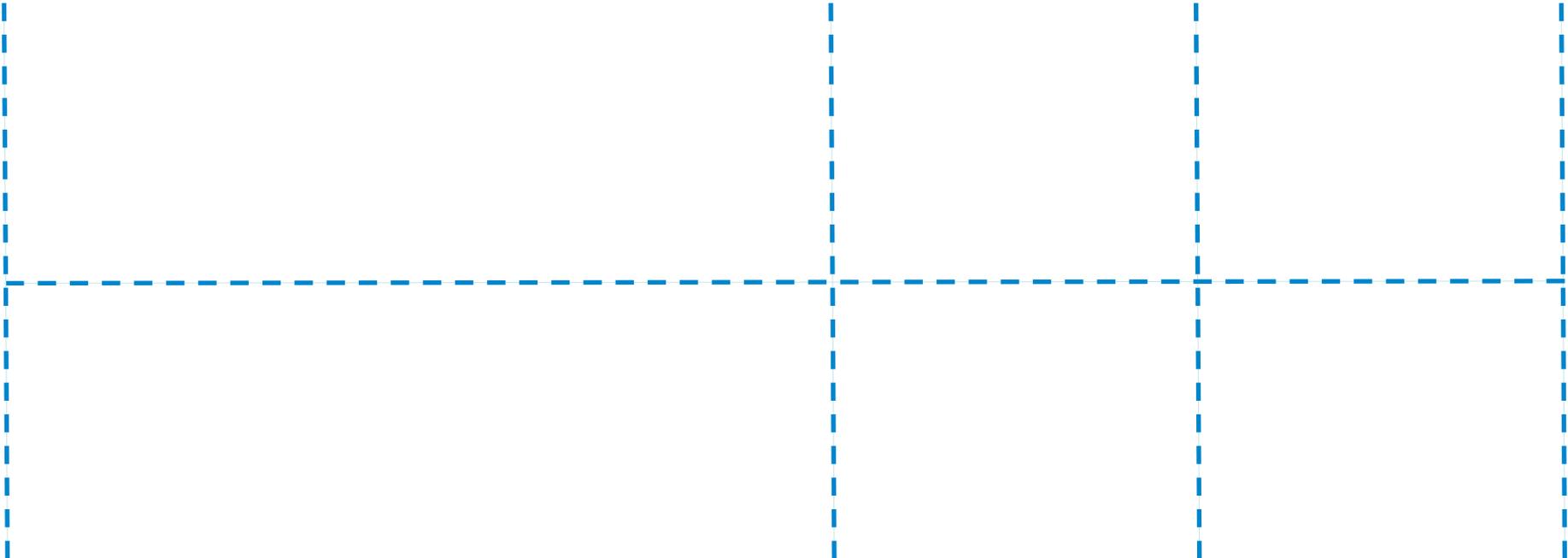
6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Interpretación ensayos consolidados sin drenaje (C-U)

- En ensayos sin drenaje no hay admisión ni expulsión de agua de los poros:
(Volumen de agua constante).

No hay cambio de volumen

- Suelo saturado.



6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Interpretación ensayos consolidados sin drenaje (C-U)

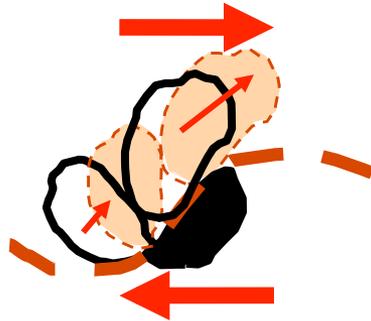
- **En ensayos sin drenaje no hay admisión ni expulsión de agua de los poros:**
(Volumen de agua constante).

No hay cambio de volumen

- **Suelo saturado.**

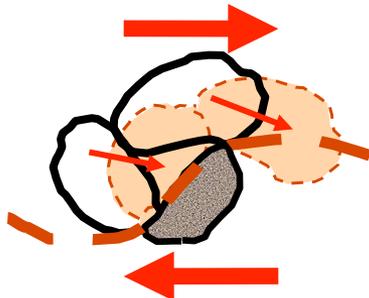
Ensayo drenado

Suelos densos o sobreconsolidados.



$$\Delta \text{Vol.} > 0$$

Suelos flojos, normal o ligeramente sobreconsolidados (RSC < 1,5).



$$\Delta \text{Vol.} < 0$$

6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Interpretación ensayos consolidados sin drenaje (C-U)

- **En ensayos sin drenaje no hay admisión ni expulsión de agua de los poros:**
(Volumen de agua constante).

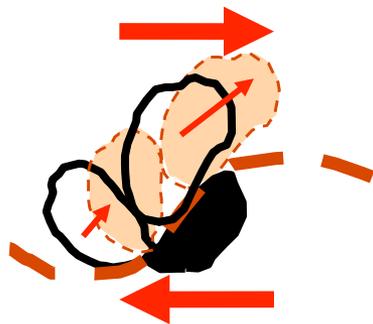
No hay cambio de volumen

- **Suelo saturado.**

Ensayo drenado

Ensayo sin drenaje

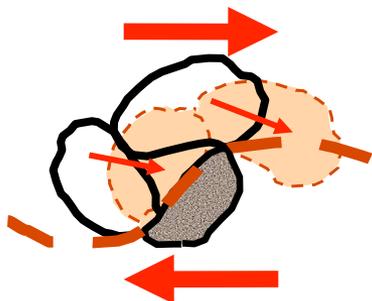
Suelos densos o sobreconsolidados.



$\Delta \text{Vol.} > 0$

$\Delta \text{Vol.} = 0$

Suelos flojos, normal o ligeramente sobreconsolidados (RSC < 1,5).



$\Delta \text{Vol.} < 0$

$\Delta \text{Vol.} = 0$

6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Interpretación ensayos consolidados sin drenaje (C-U)

- **En ensayos sin drenaje no hay admisión ni expulsión de agua de los poros:**
(Volumen de agua constante).

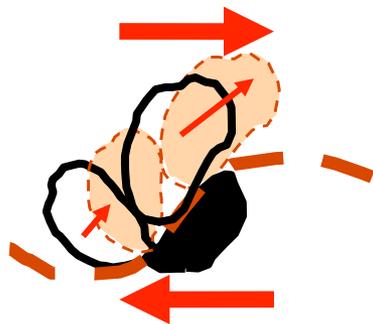
No hay cambio de volumen

- **Suelo saturado.**

Ensayo drenado

Ensayo sin drenaje

Suelos densos o sobreconsolidados.

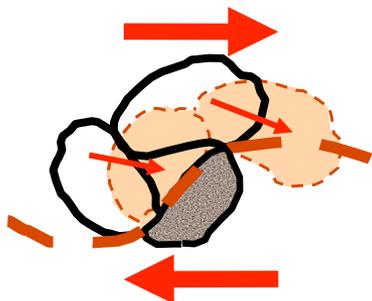


$\Delta \text{Vol.} > 0$

$\Delta \text{Vol.} = 0$

¿?

Suelos flojos, normal o ligeramente sobreconsolidados (RSC < 1,5).



$\Delta \text{Vol.} < 0$

$\Delta \text{Vol.} = 0$

6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Interpretación ensayos consolidados sin drenaje (C-U)

• **En ensayos sin drenaje no hay admisión ni expulsión de agua de los poros:**
(Volumen de agua constante).

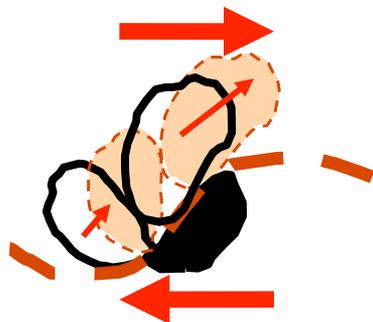
No hay cambio de volumen

• **Suelo saturado.**

Ensayo drenado

Ensayo sin drenaje

Suelos densos o sobreconsolidados.

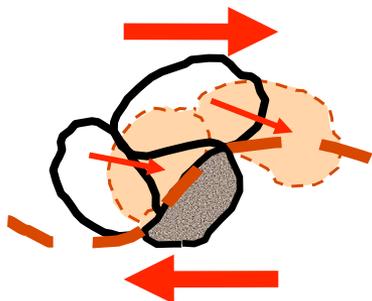


$\Delta \text{Vol.} > 0$

$\Delta \text{Vol.} = 0$

¿?

Suelos flojos, normal o ligeramente sobreconsolidados (RSC < 1,5).



$\Delta \text{Vol.} < 0$

$\Delta \text{Vol.} = 0$

Debe ser el agua intersticial.

6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Interpretación ensayos consolidados sin drenaje (C-U)

- **En ensayos sin drenaje no hay admisión ni expulsión de agua de los poros:**
(Volumen de agua constante).

No hay cambio de volumen

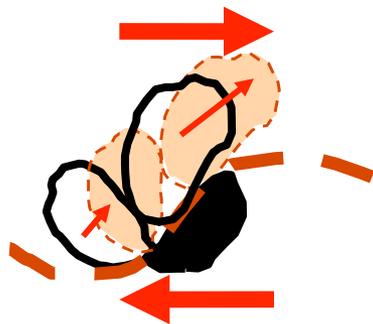
- **Suelo saturado.**

¿Qué pasa con el agua de los poros?

Ensayo drenado

Ensayo sin drenaje

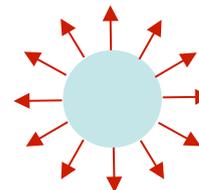
Suelos densos o sobreconsolidados.



$\Delta \text{Vol.} > 0$

$\Delta \text{Vol.} = 0$

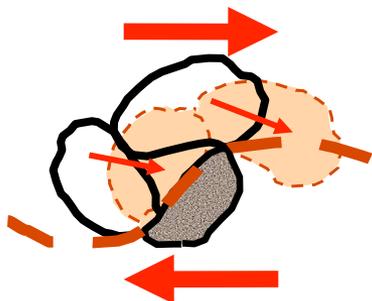
Impide separación partículas.



$\Delta u < 0$

¿?

Suelos flojos, normal o ligeramente sobreconsolidados (RSC < 1,5).



$\Delta \text{Vol.} < 0$

$\Delta \text{Vol.} = 0$

Debe ser el agua intersticial.

6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Interpretación ensayos consolidados sin drenaje (C-U)

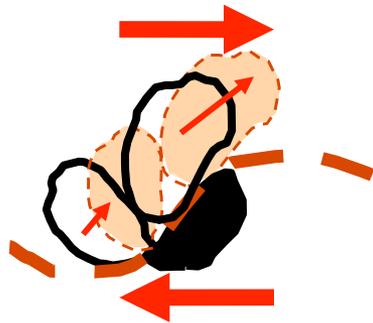
• **En ensayos sin drenaje no hay admisión ni expulsión de agua de los poros:**
(Volumen de agua constante).

No hay cambio de volumen

• **Suelo saturado.**

Ensayo drenado

Suelos densos o sobreconsolidados.



$\Delta Vol. > 0$

Ensayo sin drenaje

$\Delta Vol. = 0$

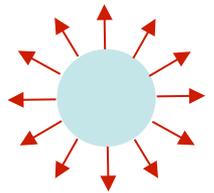
¿?

$\Delta Vol. = 0$

Debe ser el agua intersticial.

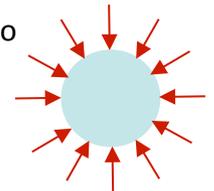
¿Qué pasa con el agua de los poros?

Impide separación partículas.



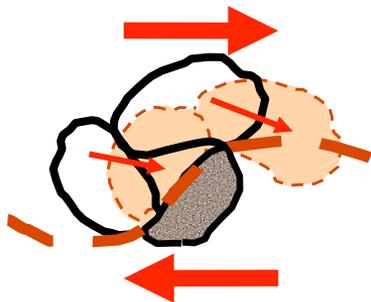
$\Delta u < 0$

Impide acercamiento partículas.



$\Delta u > 0$

Suelos flojos, normal o ligeramente sobreconsolidados (RSC < 1,5).



$\Delta Vol. < 0$

6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Interpretación ensayos consolidados sin drenaje (C-U)

- Ensayos C-U **sólo en suelos arcillosos.**

!!!Aplicación de τ produce variación de u !!!

6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Interpretación ensayos consolidados sin drenaje (C-U)

- Ensayos C-U **sólo en suelos arcillosos.**

!!!Aplicación de τ produce variación de u !!!

Suelos densos o
RSC > 1,5 $\Delta u < 0$

Suelos flojos, o
RSC < 1,5 $\Delta u > 0$

6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

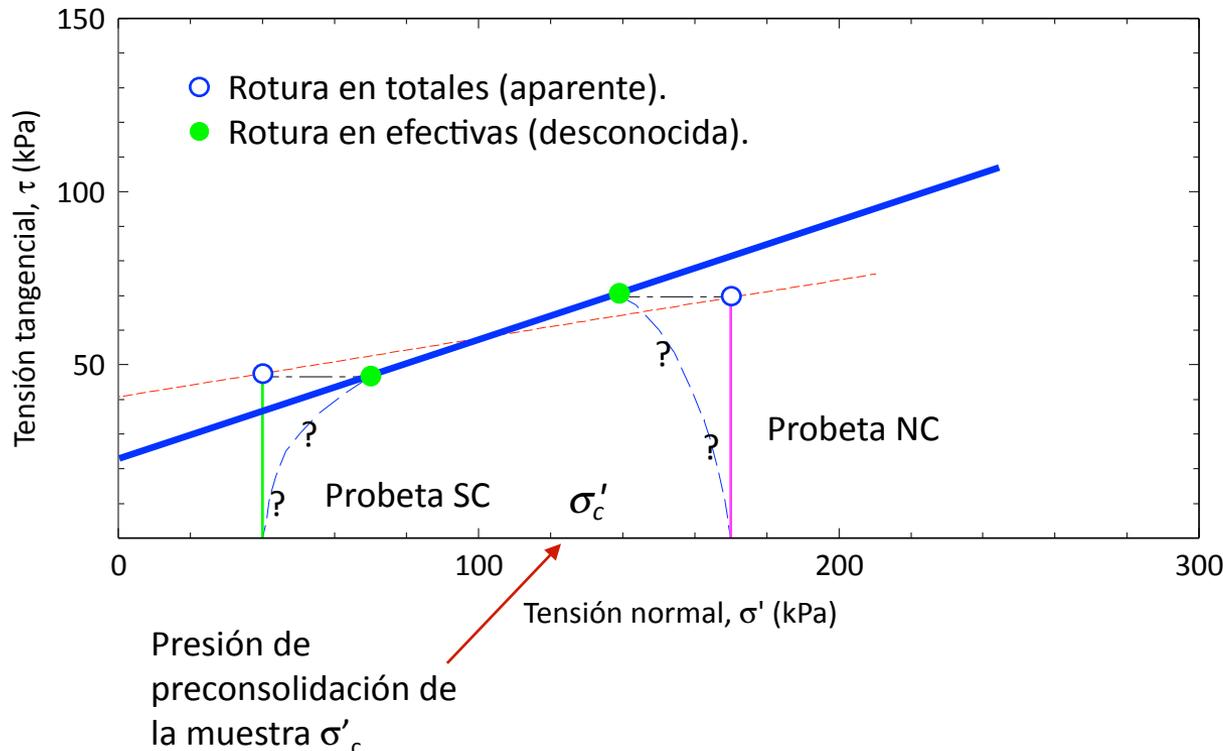
Interpretación ensayos consolidados sin drenaje (C-U)

- Ensayos C-U **sólo en suelos arcillosos.**

!!! Aplicación de τ produce variación de u !!!

Suelos densos o
RSC > 1,5 $\Delta u < 0$

Suelos flojos, o
RSC < 1,5 $\Delta u > 0$



6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Interpretación ensayos consolidados sin drenaje (C-U)

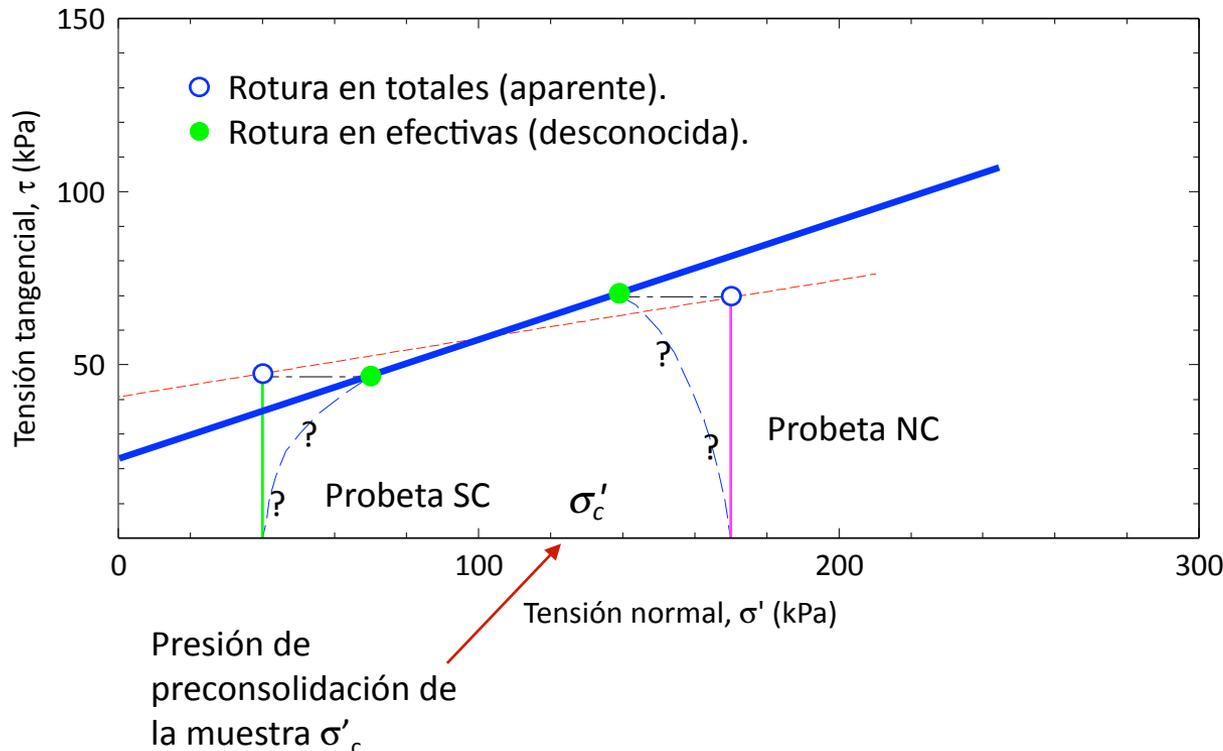
- Ensayos C-U **sólo en suelos arcillosos.**

!!! Aplicación de τ produce variación de u !!!

Suelos densos o
RSC > 1,5 $\Delta u < 0$

Suelos flojos, o
RSC < 1,5 $\Delta u > 0$

¿Cuánto vale Δu ?



6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

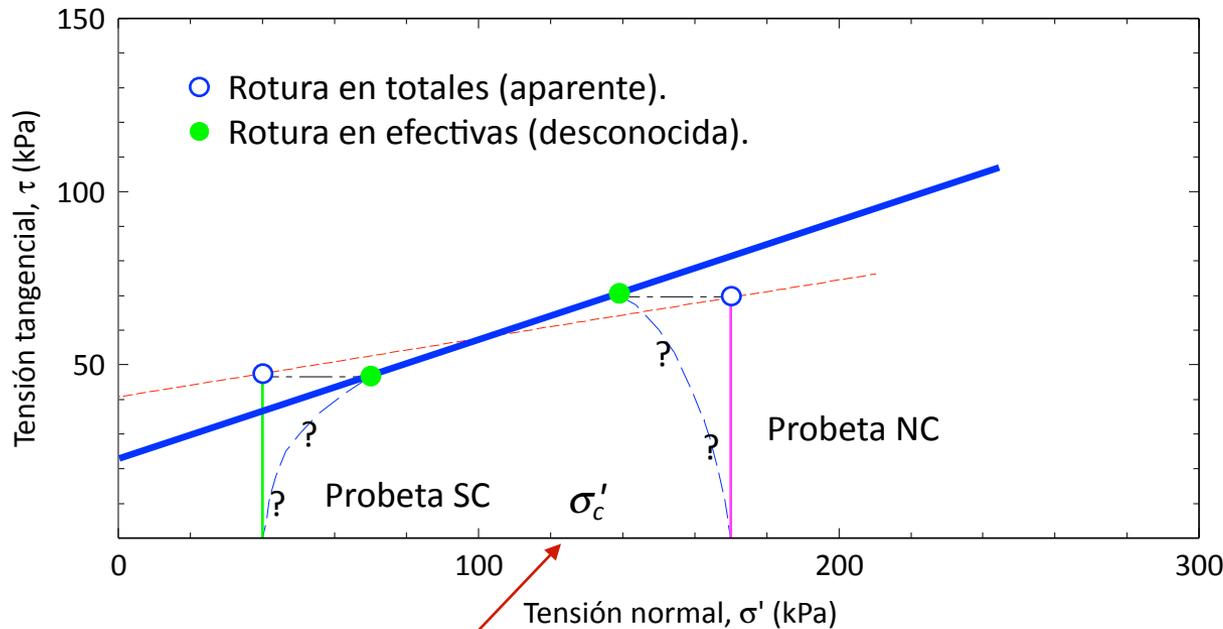
Interpretación ensayos consolidados sin drenaje (C-U)

- Ensayos C-U **sólo en suelos arcillosos.**

!!! Aplicación de τ produce variación de u !!!

Suelos densos o
RSC > 1,5 $\Delta u < 0$

Suelos flojos, o
RSC < 1,5 $\Delta u > 0$



¿Cuánto vale Δu ?

Lo siento, no puede medirse en el ensayo.

No es posible la interpretación en tensiones efectivas.

6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

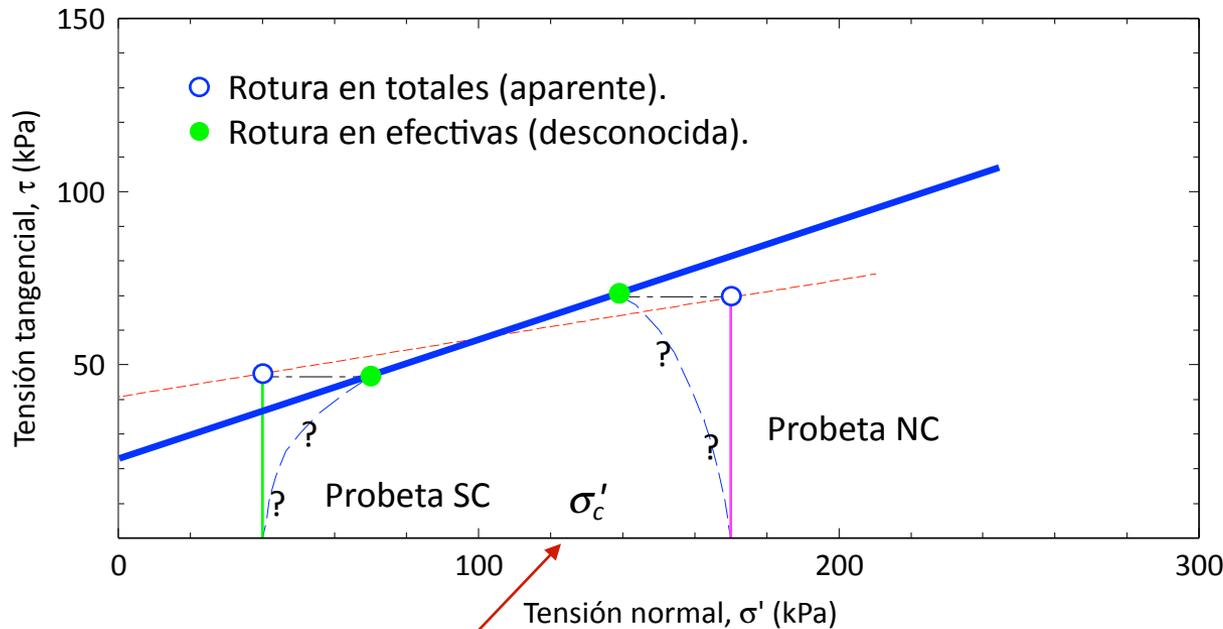
Interpretación ensayos consolidados sin drenaje (C-U)

- Ensayos C-U **sólo en suelos arcillosos.**

!!! Aplicación de τ produce variación de u !!!

Suelos densos o
RSC > 1,5 $\Delta u < 0$

Suelos flojos, o
RSC < 1,5 $\Delta u > 0$



Presión de preconsolidación de la muestra σ'_c

¿Cuánto vale Δu ?

Lo siento, no puede medirse en el ensayo.

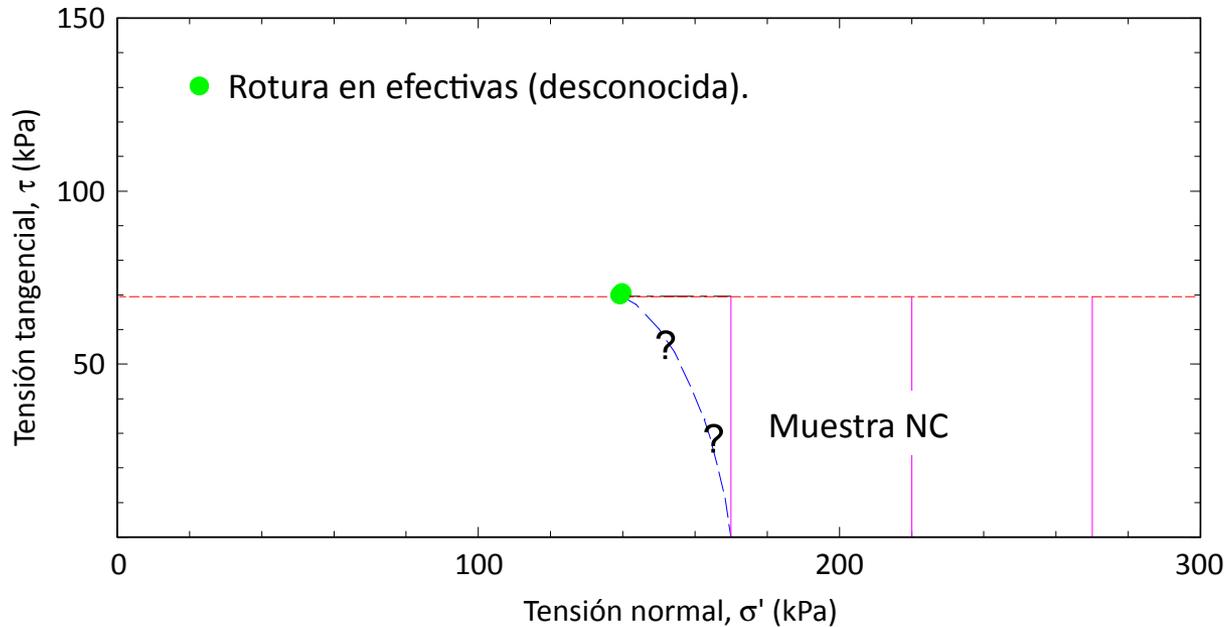
No es posible la interpretación en tensiones efectivas.

Su ejecución carece de sentido práctico.

6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Interpretación ensayos sin drenaje (U)

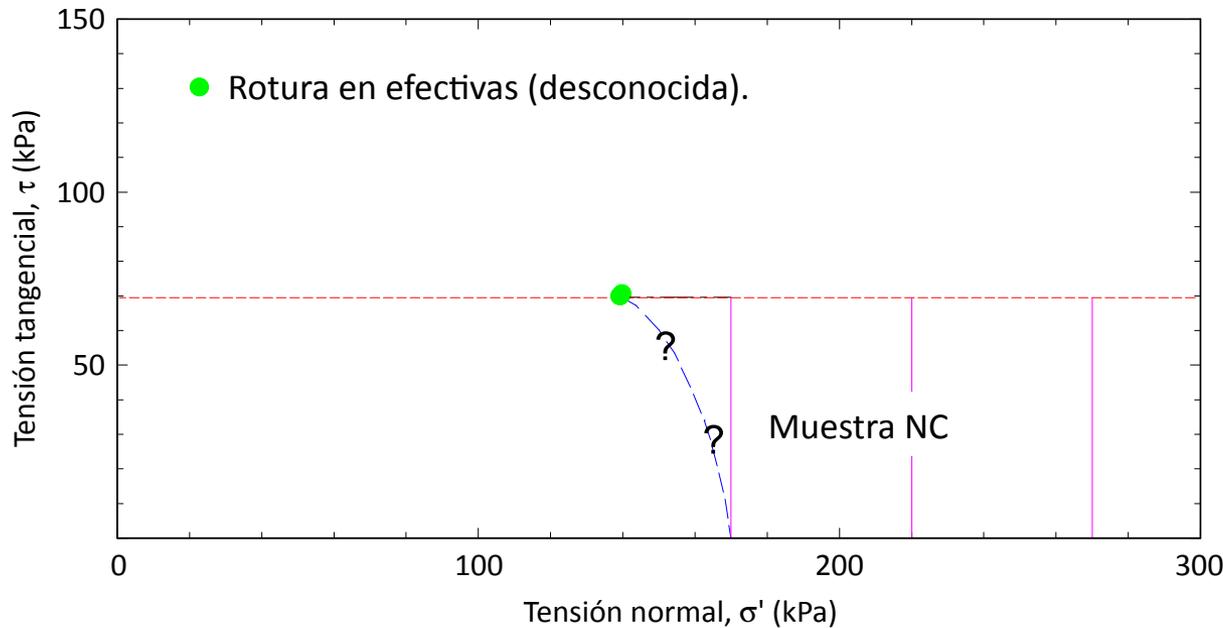
- Comportamiento real:
- **Ensayos U sólo en suelos arcillosos.**



6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Interpretación ensayos sin drenaje (U)

- Comportamiento real:
- Ensayos U **sólo en suelos arcillosos.**

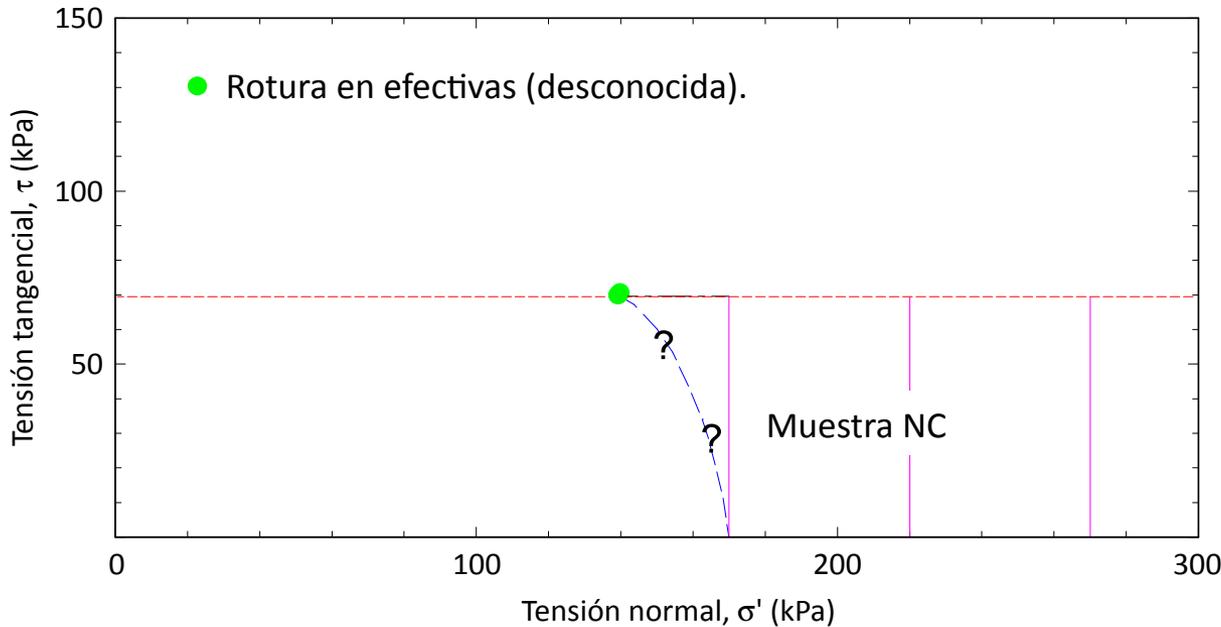


¿Cuánto vale Δu ?

6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Interpretación ensayos sin drenaje (U)

- Comportamiento real:
- **Ensayos U sólo en suelos arcillosos.**



¿Cuánto vale Δu ?

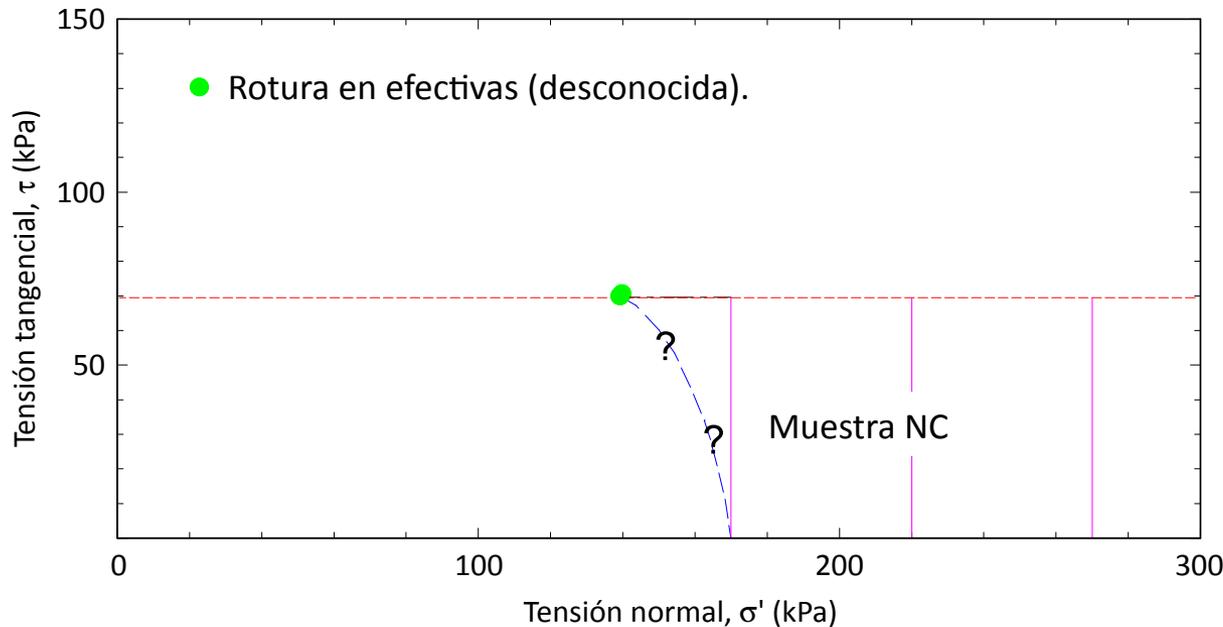


No es posible la interpretación del ensayo en tensiones efectivas.

6.4. ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Interpretación ensayos sin drenaje (U)

- Comportamiento real:
- Ensayos U **sólo en suelos arcillosos.**



¿Cuánto vale Δu ?



No es posible la interpretación del ensayo en tensiones efectivas.

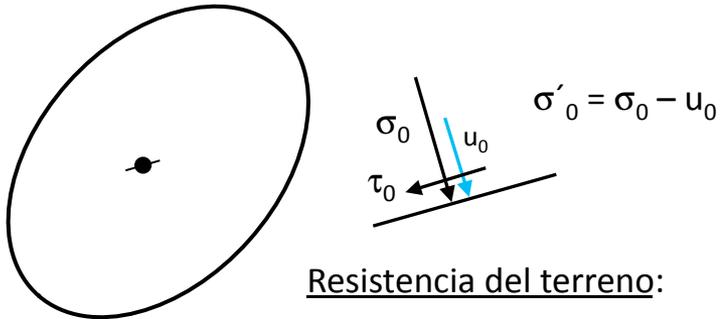
Pero introduce un concepto muy importante.



La resistencia al corte sin drenaje c_u

6.5. RESISTENCIA AL CORTE SIN DRENAJE

Situación inicial

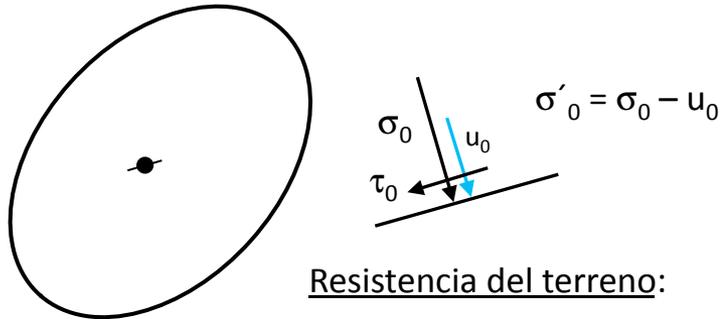


Resistencia del terreno:

$$\tau_{rot.} = c + \sigma'_0 \cdot \tan\phi$$

6.5. RESISTENCIA AL CORTE SIN DRENAJE

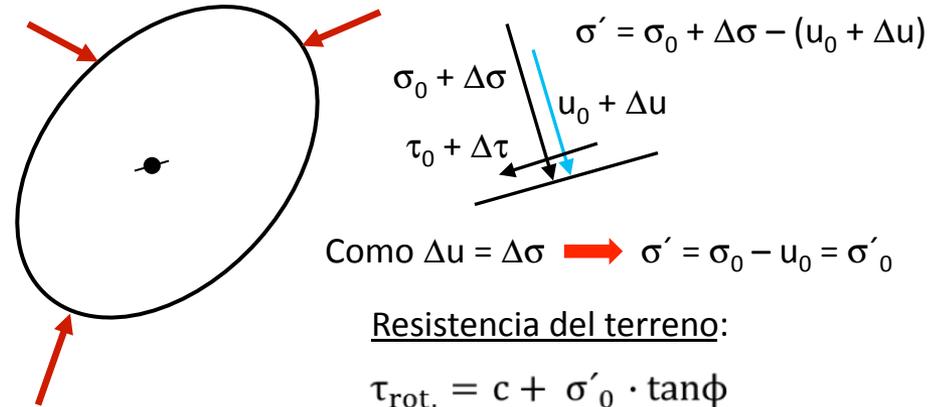
Situación inicial



Resistencia del terreno:

$$\tau_{rot.} = c + \sigma'_0 \cdot \tan\phi$$

Situación inmediatamente posterior a la carga



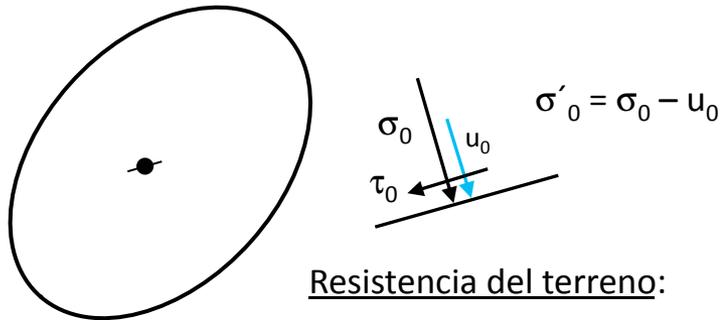
Como $\Delta u = \Delta \sigma$ ➔ $\sigma' = \sigma_0 - u_0 = \sigma'_0$

Resistencia del terreno:

$$\tau_{rot.} = c + \sigma'_0 \cdot \tan\phi$$

6.5. RESISTENCIA AL CORTE SIN DRENAJE

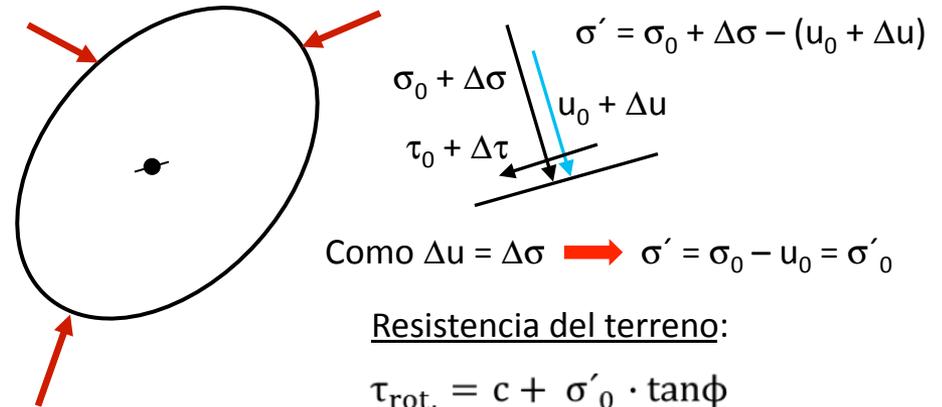
Situación inicial



Resistencia del terreno:

$$\tau_{rot.} = c + \sigma'_0 \cdot \tan\phi$$

Situación inmediatamente posterior a la carga



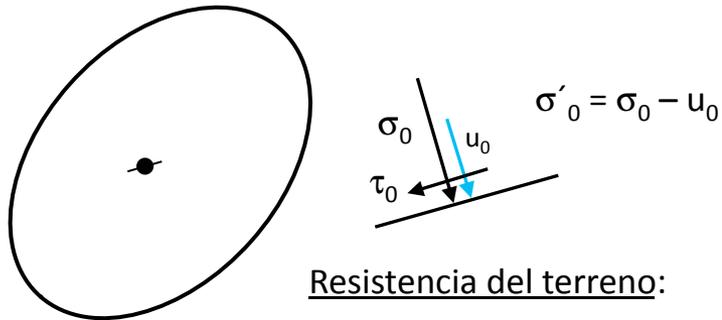
Como $\Delta u = \Delta \sigma$ \rightarrow $\sigma' = \sigma_0 - u_0 = \sigma'_0$

Resistencia del terreno:

$$\tau_{rot.} = c + \sigma'_0 \cdot \tan\phi$$

6.5. RESISTENCIA AL CORTE SIN DRENAJE

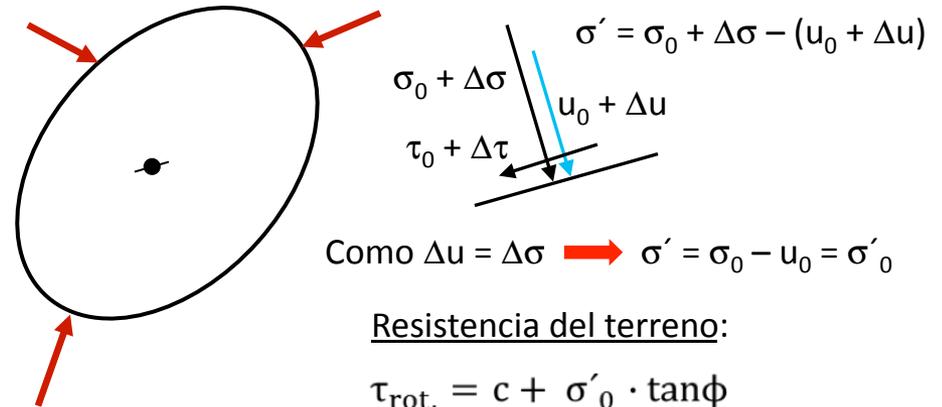
Situación inicial



Resistencia del terreno:

$$\tau_{rot.} = c + \sigma'_0 \cdot \tan\phi$$

Situación inmediatamente posterior a la carga



Como $\Delta u = \Delta \sigma \rightarrow \sigma' = \sigma_0 - u_0 = \sigma'_0$

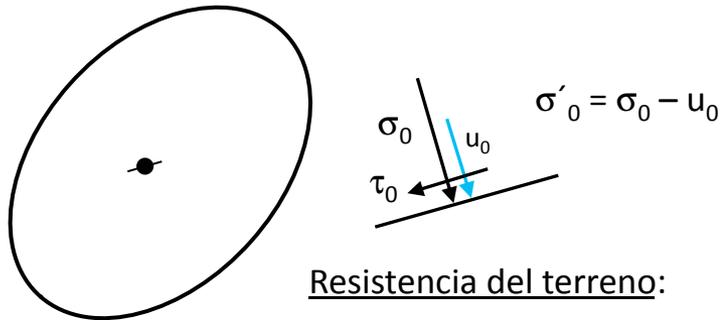
Resistencia del terreno:

$$\tau_{rot.} = c + \sigma'_0 \cdot \tan\phi$$

Independiente del incremento de tensión normal.

6.5. RESISTENCIA AL CORTE SIN DRENAJE

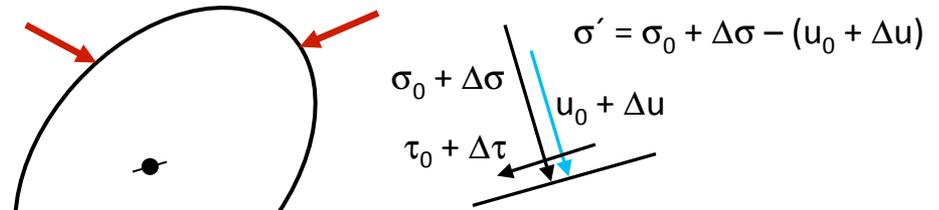
Situación inicial



Resistencia del terreno:

$$\tau_{rot.} = c + \sigma'_0 \cdot \tan\phi$$

Situación inmediatamente posterior a la carga



Como $\Delta u = \Delta \sigma \rightarrow \sigma' = \sigma_0 - u_0 = \sigma'_0$

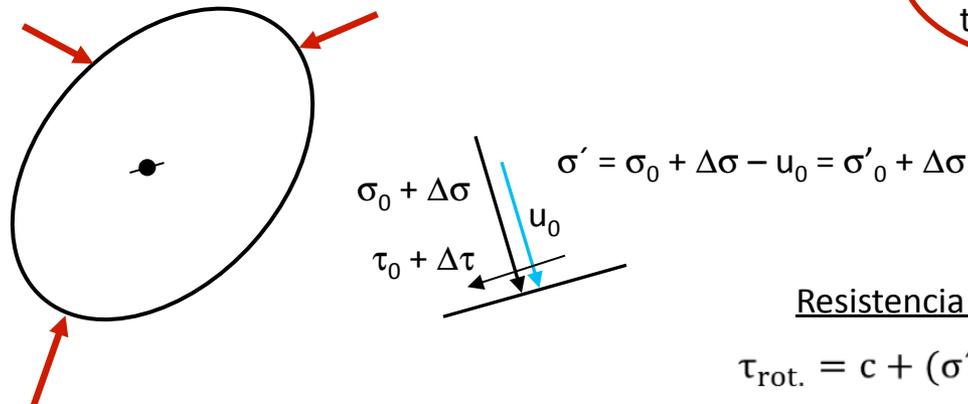
Resistencia del terreno:

$$\tau_{rot.} = c + \sigma'_0 \cdot \tan\phi$$

Independiente del incremento de tensión normal.

Situación a tiempo infinito (fin de la consolidación)

Se han disipado las presiones intersticiales inducidas por la carga.



Resistencia del terreno:

$$\tau_{rot.} = c + (\sigma'_0 + \Delta\sigma) \cdot \tan\phi$$

Nota: en el razonamiento no se ha tenido en cuenta la variación de la presión de agua producida por el cambio de tensión tangencial.

6.6. RESISTENCIA A CORTO Y LARGO PLAZO

Suelos	Cargas construcción	Expulsión de agua	Condiciones carga
Gravas, arenas.	Semanas, meses.	Minutos, horas.	Con drenaje.
Arcillas, limos.	Semanas, meses.	Meses, años.	Sin drenaje (corto plazo).



A tiempo ∞
DRENAJE
(largo plazo)

• Análisis:

– A largo plazo:

Tensiones efectivas y parámetros resistentes efectivos c y ϕ .

– A corto plazo:

Tensiones totales y resistencia al corte sin drenaje c_u ; $\phi = 0$.

– En suelos granulares sólo es posible un análisis a

Largo plazo.

– En suelos cohesivos hay dos tipos de análisis

Corto plazo.

Largo plazo.

6.6. RESISTENCIA A CORTO Y LARGO PLAZO

- **Las solicitaciones sobre el terreno pueden ser de carga: $\Delta\sigma > 0$.**
 - Cimentaciones, rellenos...
- **O de descarga: $\Delta\sigma < 0$.**
 - Excavaciones a cielo abierto, túneles...
- **¿Cuál es la peor situación?:**
 - Corto plazo: Resistencia del terreno: $\tau_{rot.} = c + \sigma'_0 \cdot \tan\phi$
 - Largo plazo: Resistencia del terreno: $\tau_{rot.} = c + (\sigma'_0 + \Delta\sigma) \cdot \tan\phi$

En descarga $\Delta\sigma > 0$  Resistencia a largo plazo > Resistencia a corto plazo.

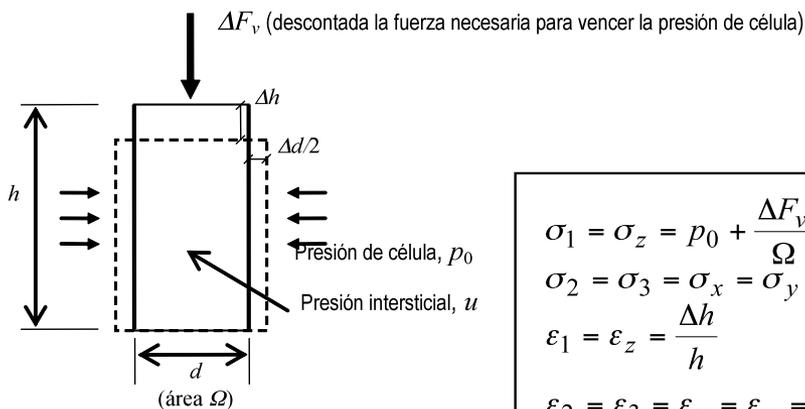
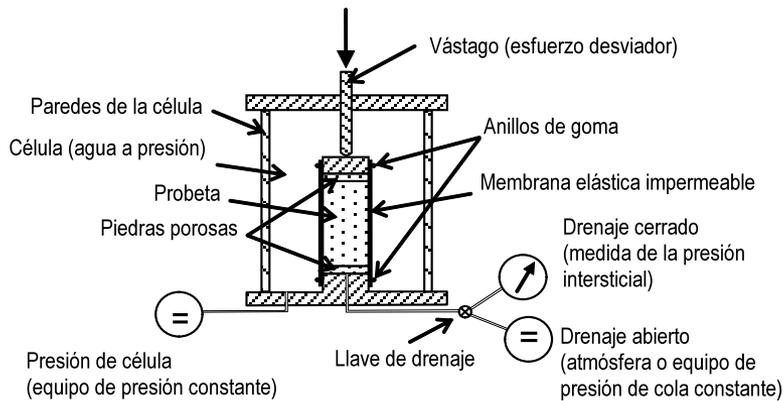
Situación pésima  Corto plazo.

En descarga $\Delta\sigma < 0$  Resistencia a corto plazo < Resistencia a largo plazo.

Situación pésima  Largo plazo.

6.7. ENSAYO TRIAXIAL

Descripción



$$\sigma_1 = \sigma_z = p_0 + \frac{\Delta F_v}{\Omega}$$

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_x = \sigma_y = p_0$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_z = \frac{\Delta h}{h}$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_x = \varepsilon_y = \frac{\Delta d}{d} = \frac{\varepsilon_{vol} - \varepsilon_z}{2}$$



• Tamaños usuales de muestras:

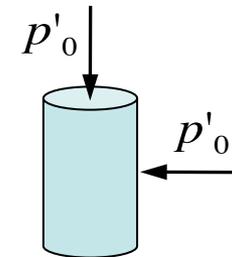
- $\Phi = 1.5'$; $h = 3'$.
- $\Phi = 50 \text{ mm}$; $h = 100 \text{ mm}$.

6.7. ENSAYO TRIAXIAL

• Fases de un ensayo:

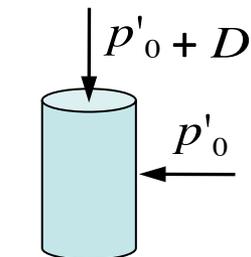
– Fase 1:

- Saturación de la probeta para eliminar succiones (salvo en ensayo U).
 - Se aplica simultáneamente a la presión de cola una presión de célula ligeramente superior.
- Aplicación de la presión de célula isotrópica.



– Fase 2:

- Desviador: aumento de la tensión vertical respecto a la horizontal.



$$D = \sigma_z$$

• Control del drenaje:

- Asegurado mediante la llave de drenaje.

6.7. ENSAYO TRIAXIAL

• Tipos de ensayo:

		1ª Fase: Consolidación	
		Lento Consolidado C	Rápido Sin consolidar U
Desviador	2ª Fase: Lento Con drenaje D	C-D D	-
	Rápido Sin drenaje U	C-U	U-U U

• Medidas en fase de rotura:

Tipo de ensayo

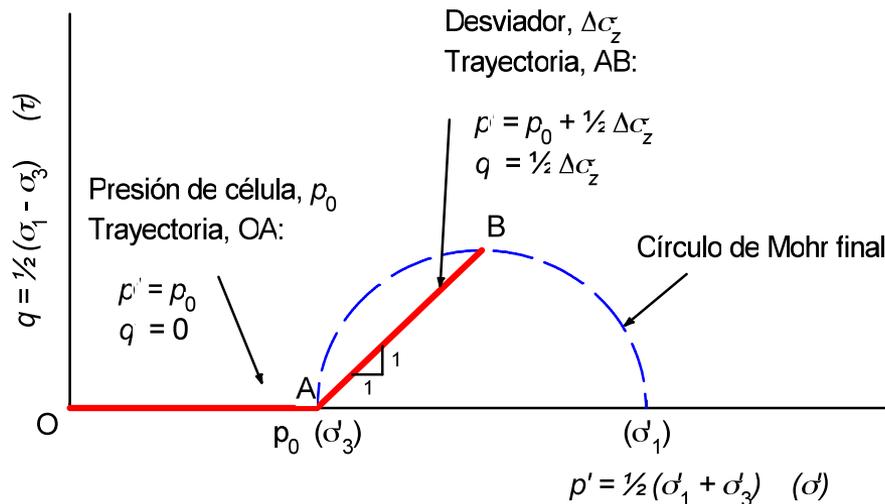
	D	C-U	U
1. $\Delta\sigma_z$ (desviador).	✓	✓	✓
2. Acortamiento vertical (ϵ_z).	✓	✓	✓
3. Presión intersticial (u).		✓	
4. Cambio de volumen (ϵ_{vol}).	✓		

6.7. ENSAYO TRIAXIAL

Interpretación ensayos con drenaje (D)

- Trayectoria de tensiones. Resistencia:

- Las trayectorias han de establecerse en tensiones principales (p, q):



$$\left. \begin{aligned} p' &= p_0 + \frac{1}{2} \Delta\sigma_z \\ q &= \frac{1}{2} \Delta\sigma_z \end{aligned} \right\} q = p' - p_0$$

- Se ajustan los resultados (máximo desviador) de 3 o más probetas a una recta.

- Criterio de rotura

(en tensiones principales).

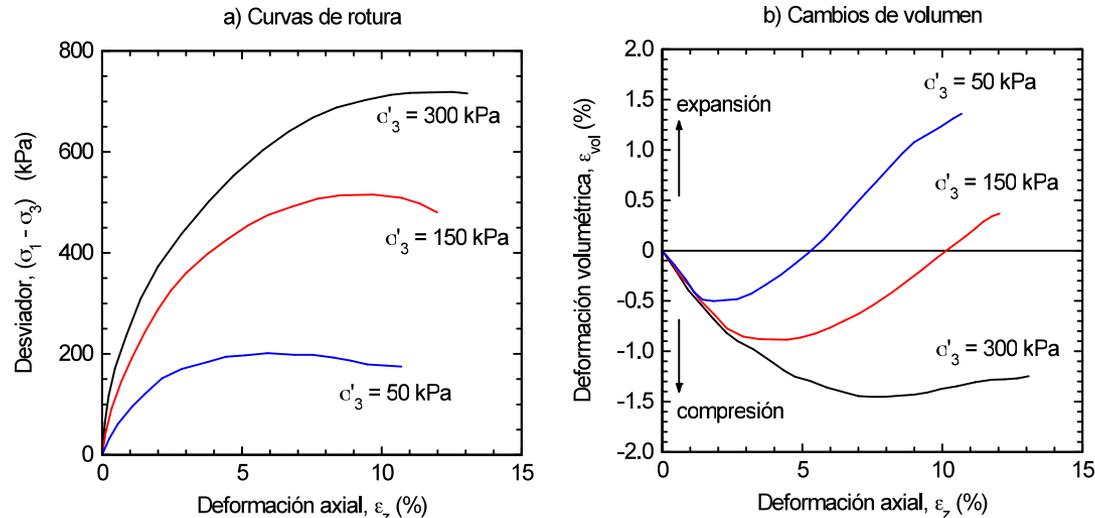
$$q = c \cdot \cos \phi + p' \cdot \sen \phi$$



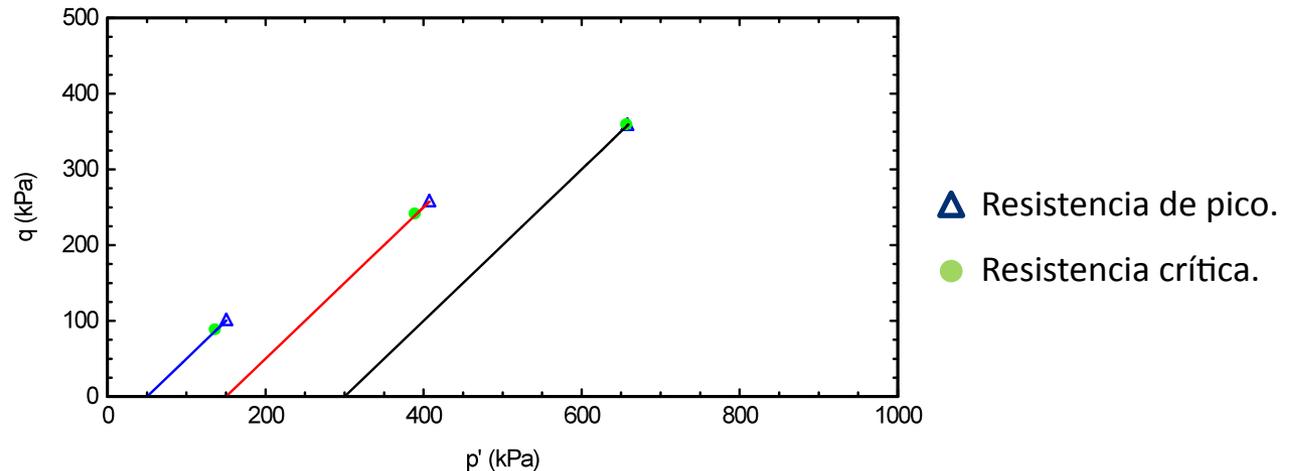
$$c, \phi$$

6.7. ENSAYO TRIAXIAL

Comportamiento real en ensayos con drenaje (D)



• Trayectorias:

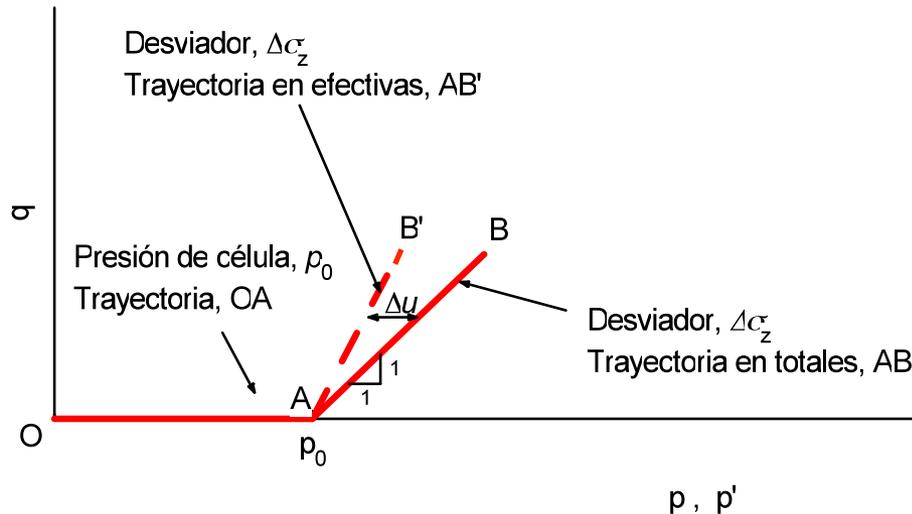


6.7. ENSAYO TRIAXIAL

Interpretación ensayos consolidados sin drenaje (C-U)

- Trayectoria de tensiones:

- Hay trayectoria de tensiones totales y de tensiones efectivas.



- Línea de rotura:

A partir de los resultados

obtenidos en 3 probetas $\rightarrow c, \phi$

Totales :

$$\left. \begin{aligned} p &= p_0 + \frac{1}{2} \Delta\sigma_z \\ q &= \frac{1}{2} \Delta\sigma_z \end{aligned} \right\} q = p - p_0$$

Efectivas :

$$\left. \begin{aligned} p' &= p - u = p_0 + \frac{1}{2} \Delta\sigma_z - \Delta u \\ q &= \frac{1}{2} \Delta\sigma_z \end{aligned} \right\} q = p' - (p_0 - \Delta u)$$

6.7. ENSAYO TRIAXIAL

Interpretación ensayos consolidados sin drenaje (C-U)

- Presión intersticial generada por la carga sin drenaje:

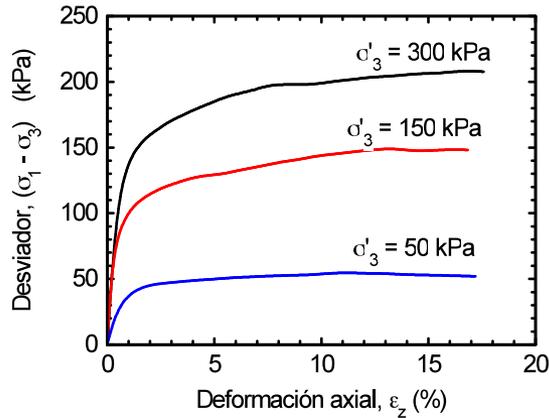
	<u>Con drenaje</u>	<u>Sin drenaje</u>	
Suelos NC o algo SC	$\Delta vol. < 0$	$\Delta u > 0$	<i>Los valores Δu se miden durante el ensayo.</i>
Suelos claramente SC	$\Delta vol. > 0$	$\Delta u < 0$	

– La razón de sobreconsolidación se refiere a la relación entre la presión de preconsolidación σ'_c y la presión de consolidación p_0 (presión de célula en el ensayo).

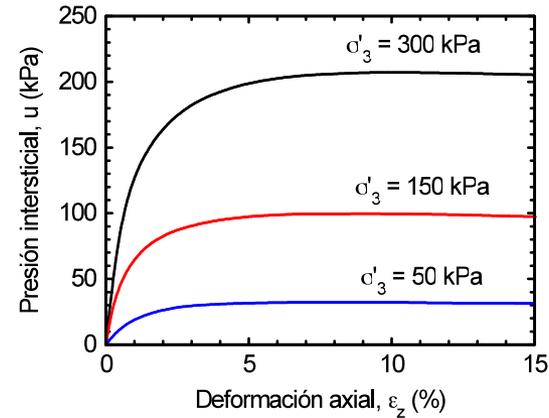
6.7. ENSAYO TRIAXIAL

Ejemplo de un ensayo real consolidado sin drenaje (C-U)

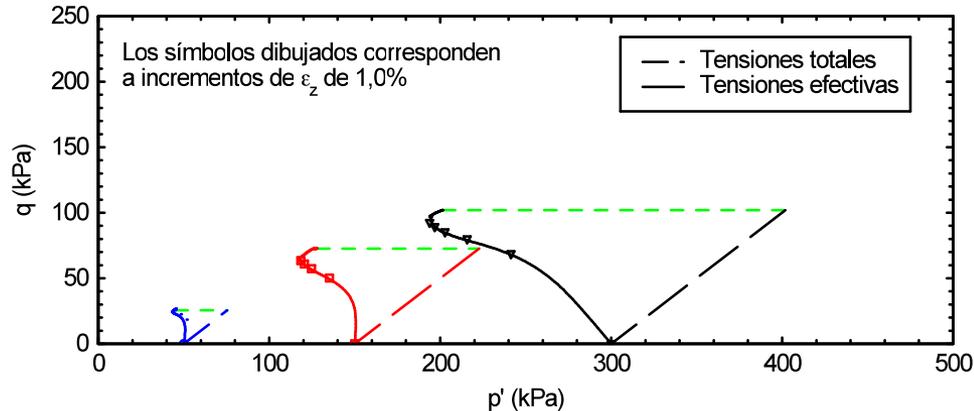
Curvas de rotura



Presión intersticial



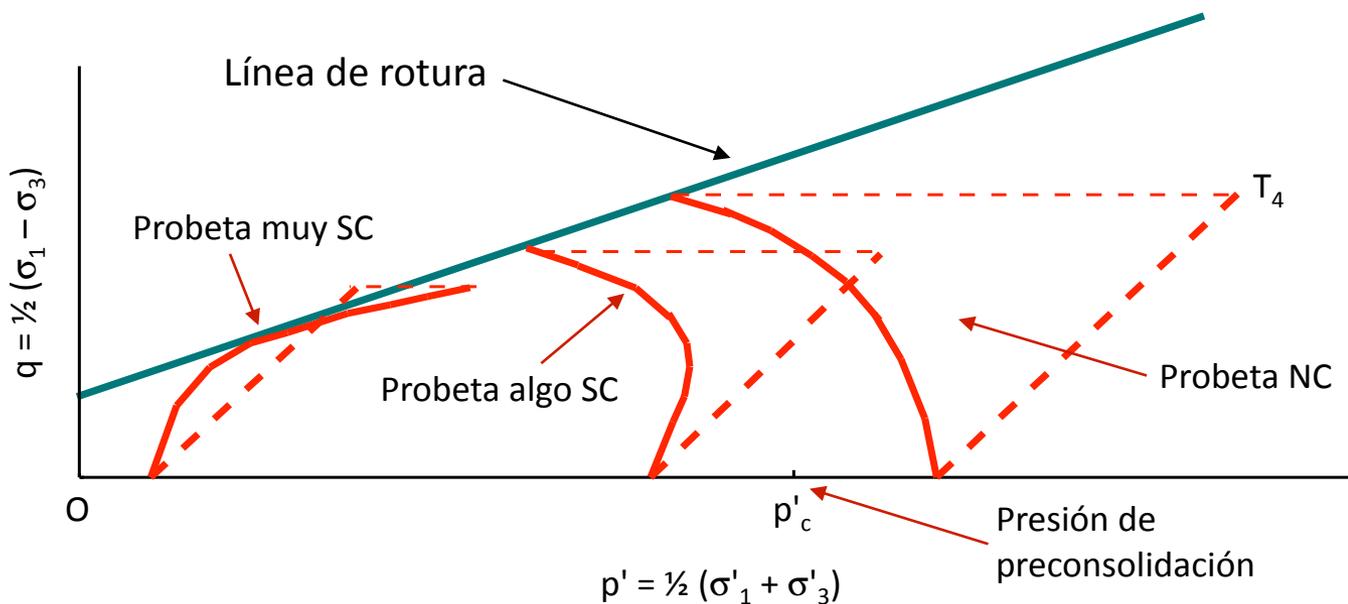
Trayectorias de tensiones



6.7. ENSAYO TRIAXIAL

Interpretación ensayos consolidados sin drenaje (C-U)

- Trayectoria de tensiones. Resistencia efectiva:



- Línea de rotura:

– Se ajusta una línea recta envolvente de las trayectorias de las tres probetas:

$$q = c \cdot \cos \phi + p' \cdot \sen \phi \quad \rightarrow \quad c, \phi$$

6.7. ENSAYO TRIAXIAL

Interpretación ensayos consolidados sin drenaje (C-U)

• Presión intersticial generada por la carga sin drenaje:

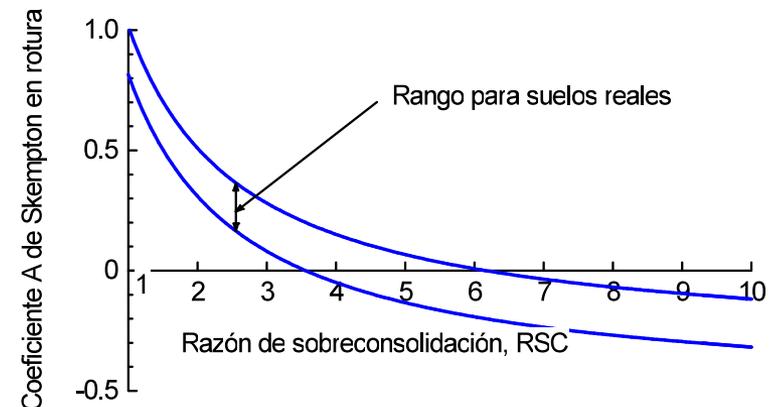
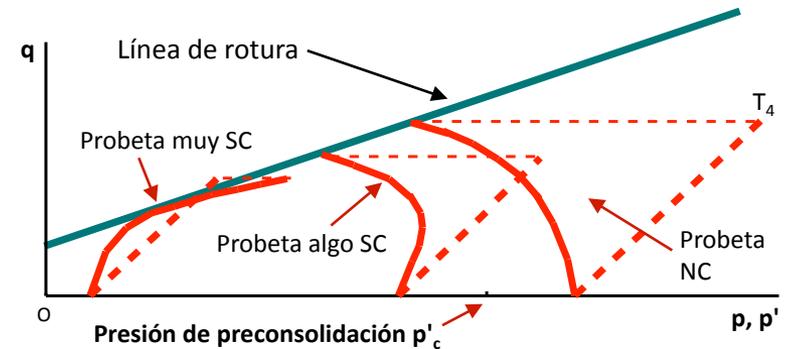
- En un ensayo triaxial convencional se define el coeficiente A (Skempton) como:

$$\Delta u = A \cdot \Delta \sigma_z$$

- El coeficiente A no es constante sino que varía a lo largo del ensayo. Dicha variación depende de la RSC de la probeta ensayada.
- El coeficiente A en rotura depende de la razón de sobreconsolidación.

$$A_{rot.} = f(RSC)$$

- El rango de valores de $A_{rot.}$ en suelos reales viene reflejado en la figura adjunta.



6.7. ENSAYO TRIAXIAL

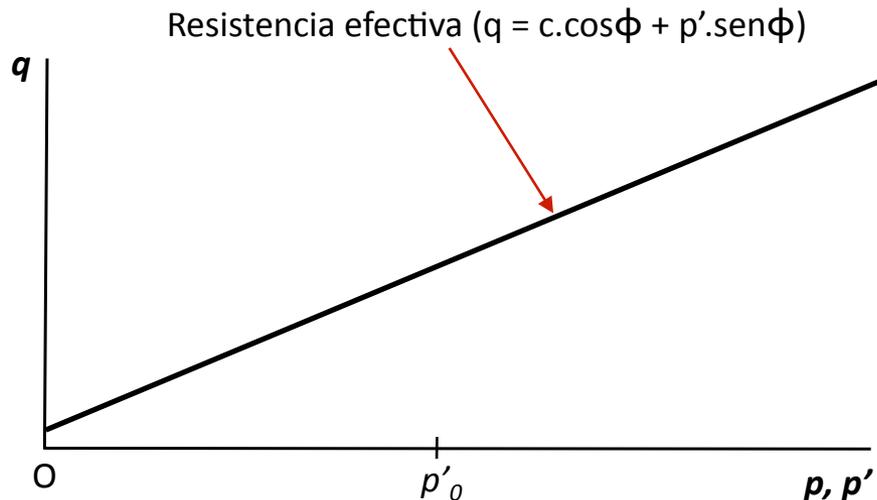
Resistencia al corte sin drenaje

- Probeta consolidada a una tensión p'_0 . Se cierra drenaje. Con drenaje cerrado se somete a $\Delta\sigma_1$ y $\Delta\sigma_3$.

6.7. ENSAYO TRIAXIAL

Resistencia al corte sin drenaje

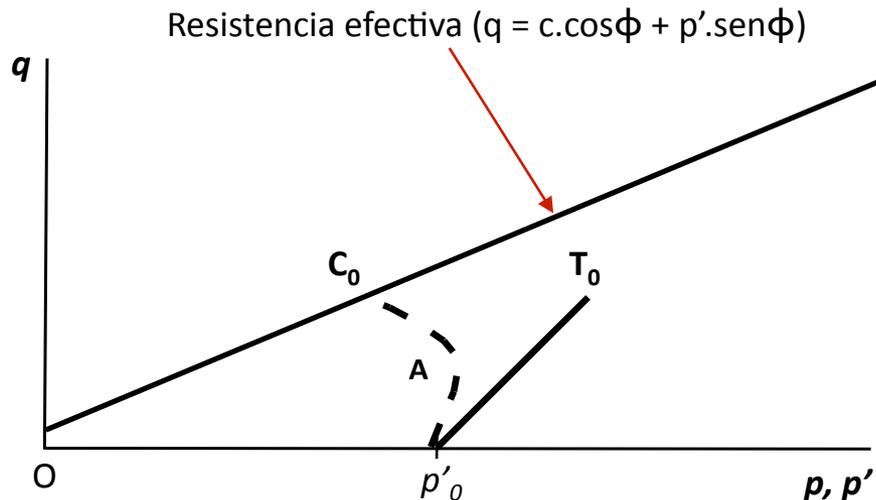
- Probeta consolidada a una tensión p'_0 . Se cierra drenaje. Con drenaje cerrado se somete a $\Delta\sigma_1$ y $\Delta\sigma_3$.
- En un triaxial convencional (trayectoria totales T_0) $\Delta\sigma_3 = 0$.



6.7. ENSAYO TRIAXIAL

Resistencia al corte sin drenaje

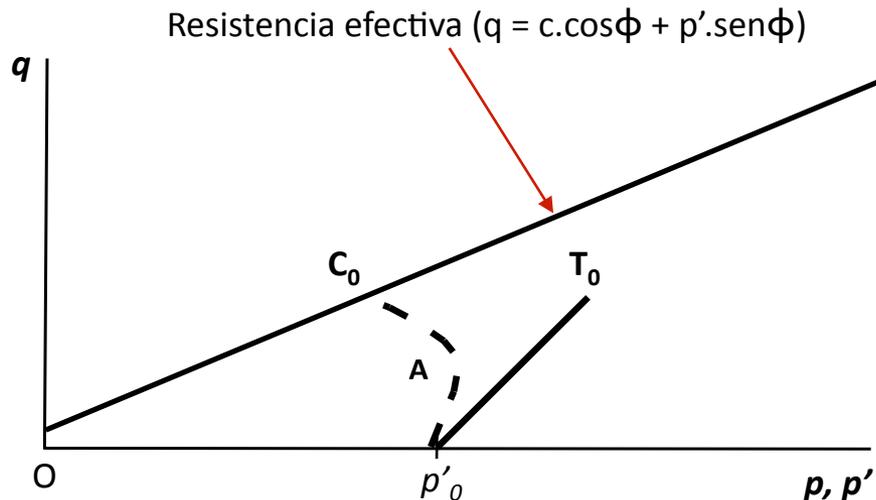
- Probeta consolidada a una tensión p'_0 . Se cierra drenaje. Con drenaje cerrado se somete a $\Delta\sigma_1$ y $\Delta\sigma_3$.
- En un triaxial convencional (trayectoria totales T_0) $\Delta\sigma_3 = 0$.



6.7. ENSAYO TRIAXIAL

Resistencia al corte sin drenaje

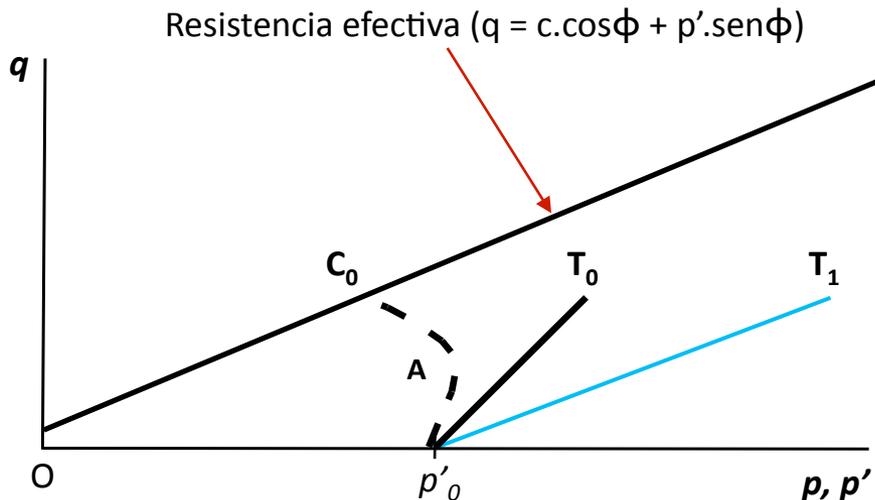
- Probeta consolidada a una tensión p'_0 . Se cierra drenaje. Con drenaje cerrado se somete a $\Delta\sigma_1$ y $\Delta\sigma_3$.
- En un triaxial convencional (trayectoria totales T_0) $\Delta\sigma_3 = 0$.
- Si $\Delta\sigma_3 \neq 0$ aparecen otras trayectorias en totales (T_1, T_2, T_3 , etc.).



6.7. ENSAYO TRIAXIAL

Resistencia al corte sin drenaje

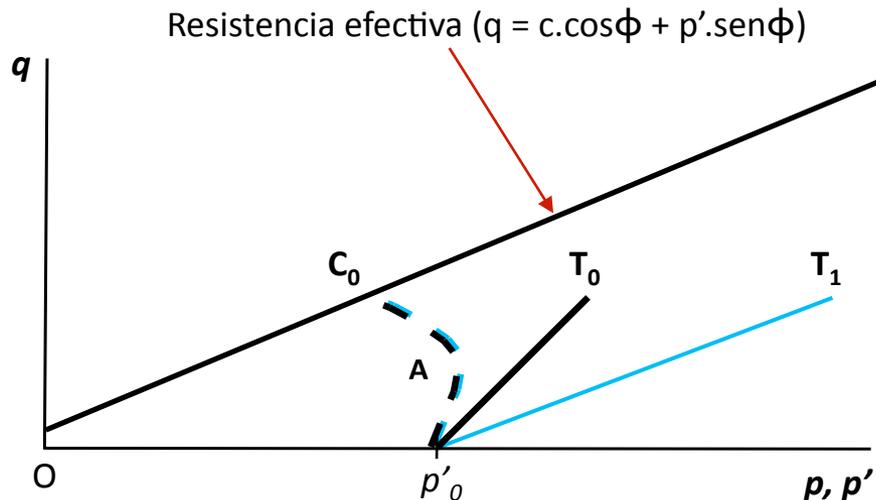
- Probeta consolidada a una tensión p'_0 . Se cierra drenaje. Con drenaje cerrado se somete a $\Delta\sigma_1$ y $\Delta\sigma_3$.
- En un triaxial convencional (trayectoria totales T_0) $\Delta\sigma_3 = 0$.
- Si $\Delta\sigma_3 \neq 0$ aparecen otras trayectorias en totales (T_1, T_2, T_3 , etc.).



6.7. ENSAYO TRIAXIAL

Resistencia al corte sin drenaje

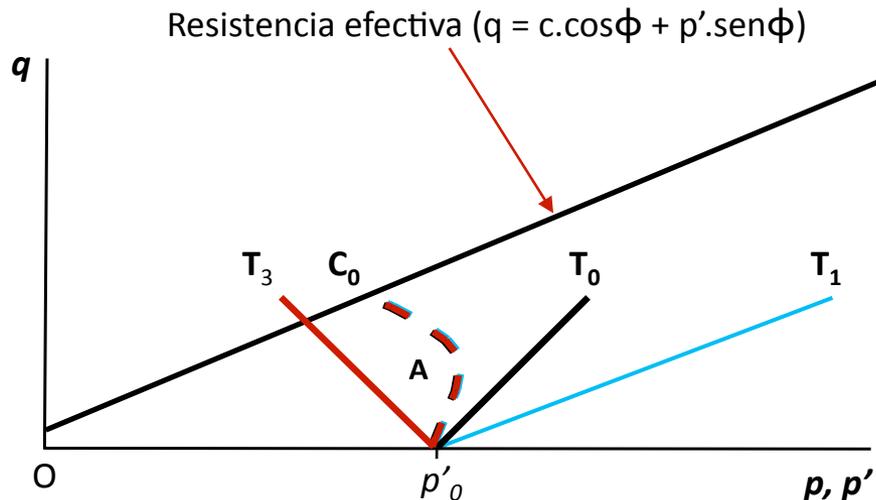
- Probeta consolidada a una tensión p'_0 . Se cierra drenaje. Con drenaje cerrado se somete a $\Delta\sigma_1$ y $\Delta\sigma_3$.
- En un triaxial convencional (trayectoria totales T_0) $\Delta\sigma_3 = 0$.
- Si $\Delta\sigma_3 \neq 0$ aparecen otras trayectorias en totales (T_1, T_2, T_3 , etc.).



6.7. ENSAYO TRIAXIAL

Resistencia al corte sin drenaje

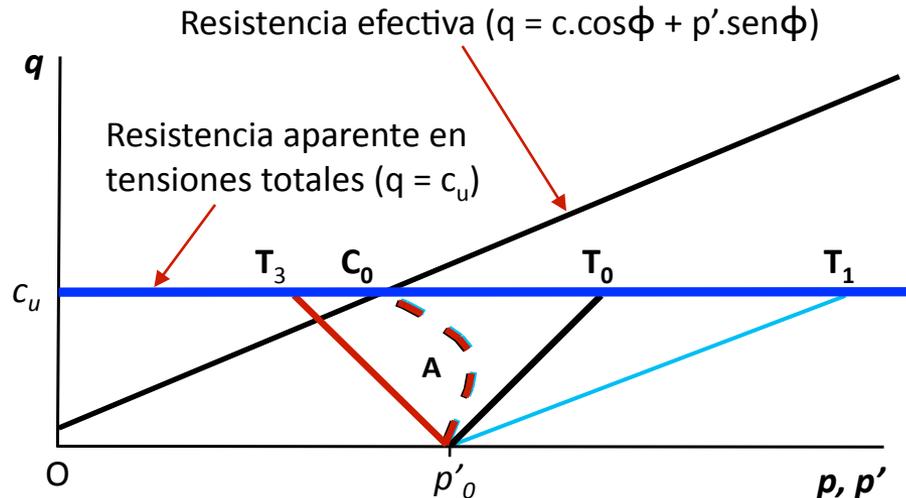
- Probeta consolidada a una tensión p'_0 . Se cierra drenaje. Con drenaje cerrado se somete a $\Delta\sigma_1$ y $\Delta\sigma_3$.
- En un triaxial convencional (trayectoria totales T_0) $\Delta\sigma_3 = 0$.
- Si $\Delta\sigma_3 \neq 0$ aparecen otras trayectorias en totales (T_1, T_2, T_3 , etc.).



6.7. ENSAYO TRIAXIAL

Resistencia al corte sin drenaje

- Probeta consolidada a una tensión p'_0 . Se cierra drenaje. Con drenaje cerrado se somete a $\Delta\sigma_1$ y $\Delta\sigma_3$.
- En un triaxial convencional (trayectoria totales T_0) $\Delta\sigma_3 = 0$.
- Si $\Delta\sigma_3 \neq 0$ aparecen otras trayectorias en totales (T_1, T_2, T_3 , etc.).



– Para cualquier trayectoria en totales, la trayectoria en efectivas es la misma. Y el punto de rotura en efectivas es el mismo, y en totales tiene la misma ordenada q .

– Es equivalente a lo que se ha visto en el corte directo.

– Si se habla de una resistencia en tensiones totales puede plantearse $q = \text{cte}$. Este parámetro es la resistencia al corte sin drenaje c_u

6.7. ENSAYO TRIAXIAL

Resistencia al corte sin drenaje

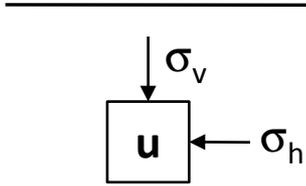
- c_u depende de:
 - Las tensiones iniciales del suelo (p'_0).
 - De la línea de resistencia, por lo tanto, de los parámetros c y ϕ .
 - De la forma de la trayectoria de tensiones efectivas, esto es, de la razón de sobreconsolidación RSC.
- c_u no es un parámetro intrínseco del terreno (ya que depende de p'_0 y de RSC).
 - Los parámetros c y ϕ si son intrínsecos, pues son independientes de la tensión efectiva inicial y de las condiciones de preconsolidación.
- Ladd y Eggers (1972), Schofield y Wroth (1968), proponen la siguiente relación:

$$\frac{c_u}{p'_0} = k \cdot RSC^\alpha \quad (\alpha = 0,7 - 0,9)$$

$$(k = 0,2 - 0,4)$$

6.7. ENSAYO TRIAXIAL

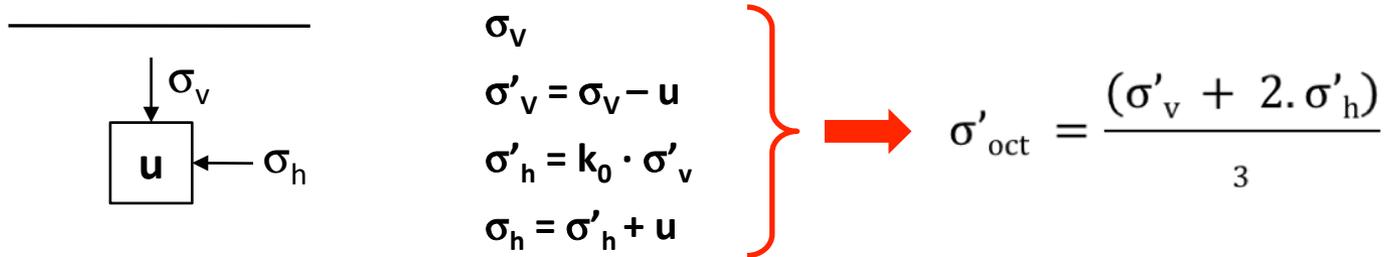
6.7.1. ESTADO DE TENSIONES EN LA MUESTRA EXTRAÍDA



$$\left. \begin{aligned}
 &\sigma_v \\
 &\sigma'_v = \sigma_v - u \\
 &\sigma'_h = k_0 \cdot \sigma'_v \\
 &\sigma_h = \sigma'_h + u
 \end{aligned} \right\} \rightarrow \sigma'_{\text{oct}} = \frac{(\sigma'_v + 2 \cdot \sigma'_h)}{3}$$

6.7. ENSAYO TRIAXIAL

6.7.1. ESTADO DE TENSIONES EN LA MUESTRA EXTRAÍDA



• Suelo saturado.

• Extracción sin pérdida de humedad.

$\Delta \text{Volumen} = 0$

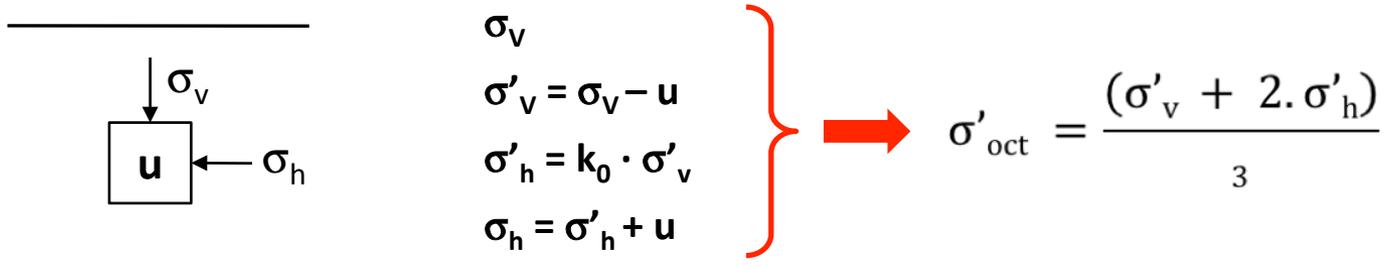
$\Delta \sigma'_{oct} = E_{vol} \cdot \frac{\Delta \text{Volumen}}{\text{Volumen inicial}} = 0$

• La muestra extraída mantiene la σ'_{oct} que tenía en el terreno.

$(\sigma'_{oct})_{muestra} = (\sigma'_{oct})_{terreno}$

6.7. ENSAYO TRIAXIAL

6.7.1. ESTADO DE TENSIONES EN LA MUESTRA EXTRAÍDA



• Suelo saturado.

• Extracción sin pérdida de humedad.

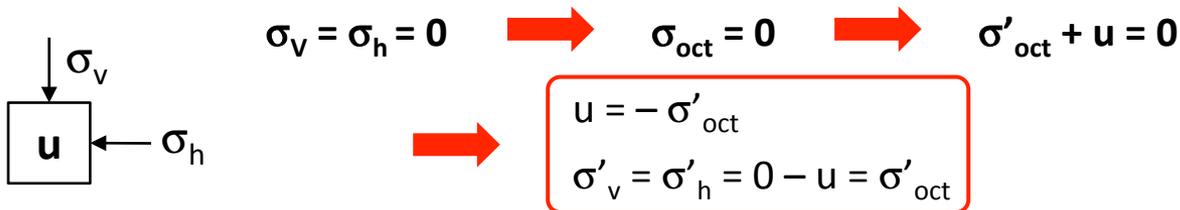
$\Delta \text{Volumen} = 0$

$\Delta \sigma'_{oct} = E_{vol} \cdot \frac{\Delta \text{Volumen}}{\text{Volumen inicial}} = 0$

• La muestra extraída mantiene la σ'_{oct} que tenía en el terreno.

$(\sigma'_{oct})_{muestra} = (\sigma'_{oct})_{terreno}$

• ESTADO TENSIONAL DE LA MUESTRA EXTRAÍDA

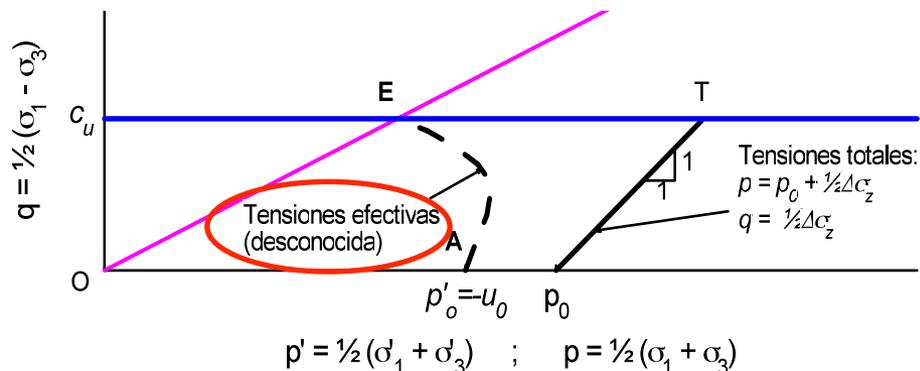


6.7. ENSAYO TRIAXIAL

Interpretación ensayos sin drenaje (U)

- Trayectoria de tensiones:

- Interpretación: c_u



- Se coloca la probeta y no se abre la llave de drenaje en ningún momento por lo que se mantiene la succión capilar.
- Al dar la presión de célula p_0 y estar cerrada la llave de drenaje, la tensión efectiva de la probeta se mantiene, y sigue siendo la correspondiente a la succión inicial.
- No se miden las presiones intersticiales, por lo que se interpreta en tensiones totales (se desconocen las efectivas).
- Con independencia de la presión de célula aplicada, la trayectoria en efectivas ha de ser la misma al tener el mismo punto de inicio ($p'_0 = -u_0$). Por eso, el punto de rotura es también el mismo.
- De esta forma, se obtiene la resistencia al corte sin drenaje c_u .

6.7. ENSAYO TRIAXIAL

6.7.2. ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE

- Es un caso particular del ensayo triaxial U (visto en la anterior transparencia) donde la presión de célula es 0.
- La probeta se mantiene gracias a la succión, que le proporciona la tensión efectiva idéntica a la tensión media p'_o que tenía en el terreno.
- Al ser nula la tensión total inicial sobre la probeta, la trayectoria en totales sale del origen.
- La trayectoria en efectivas (no obtenida en el ensayo) debe partir de p'_o , y su traza debe ser la que seguiría una probeta del suelo consolidada en el triaxial a presión de célula p'_o .
- Así se obtiene c_u que resulta ser igual a la mitad de la resistencia a la compresión simple q_u .

$$c_u = q_{rot.} = \left(\frac{\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3}{2} \right)_{rot.} = \frac{\Delta\sigma_{z,rot} - 0}{2} = \frac{q_u}{2}$$

