



# **CI4402**

# **GEOMECANICA**

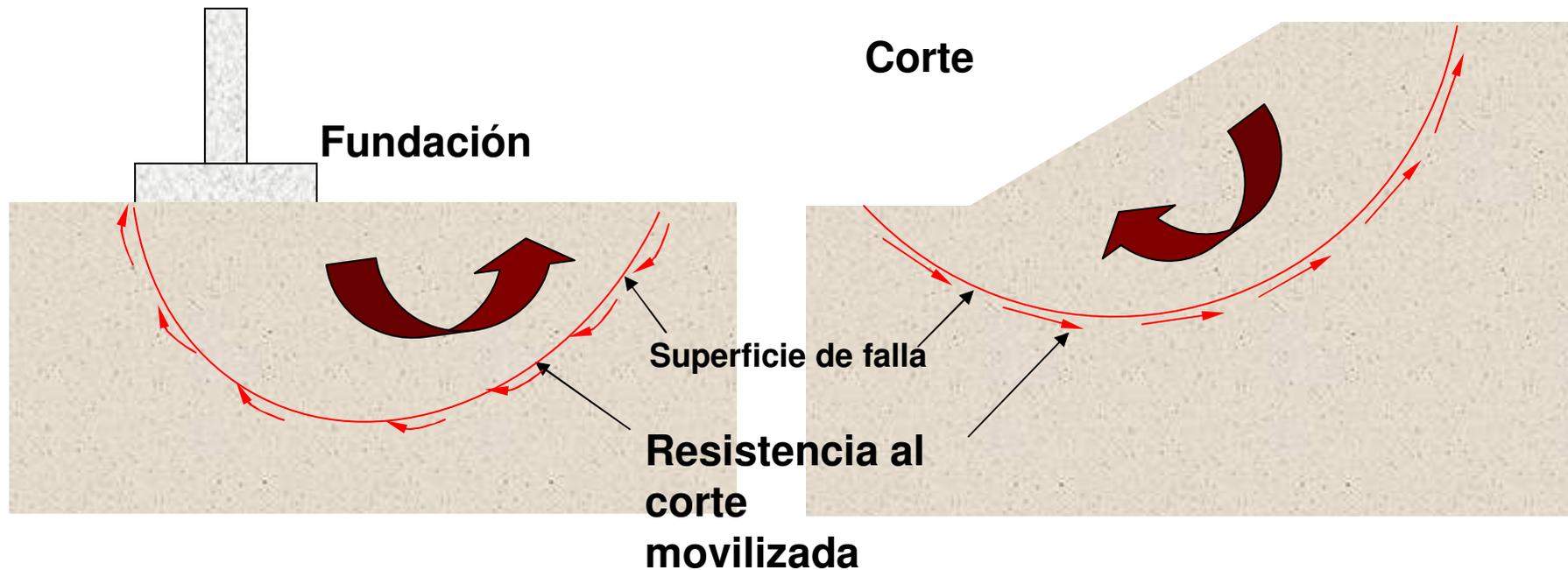
UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y  
MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

Prof. Luis Paredes

AGOSTO 2010

# Falla por corte en suelos

Los suelos suelen fallar por corte



En la falla, la tensión de corte a lo largo de la superficie de falla (resistencia al corte movilizada) alcanza la resistencia al corte.

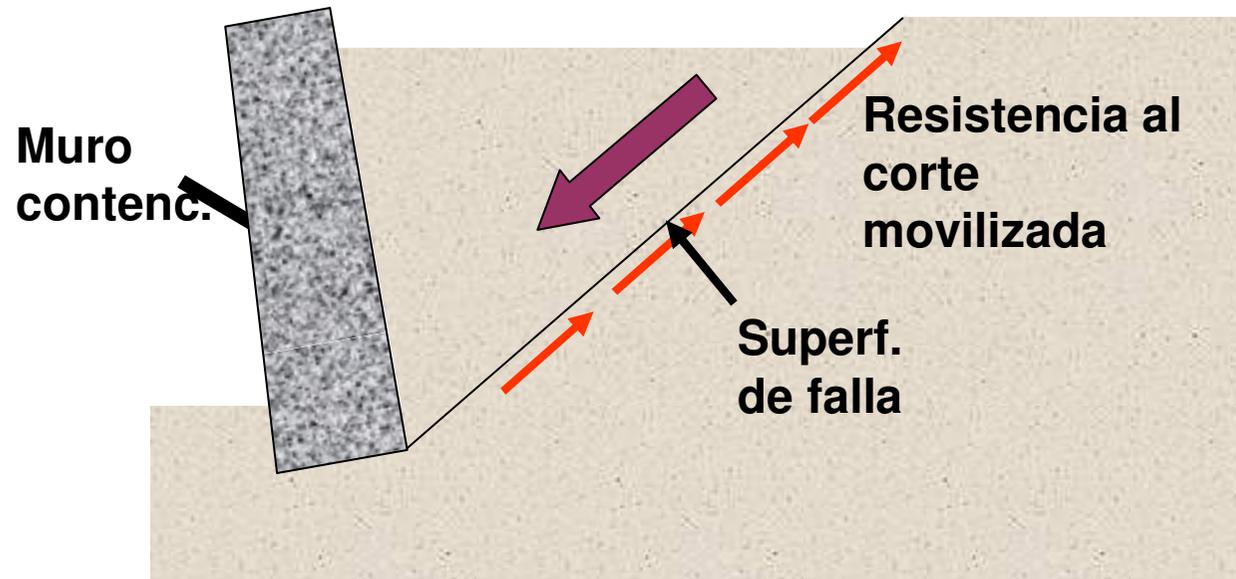
# Falla por corte en suelos

Suelos suelen fallar por corte



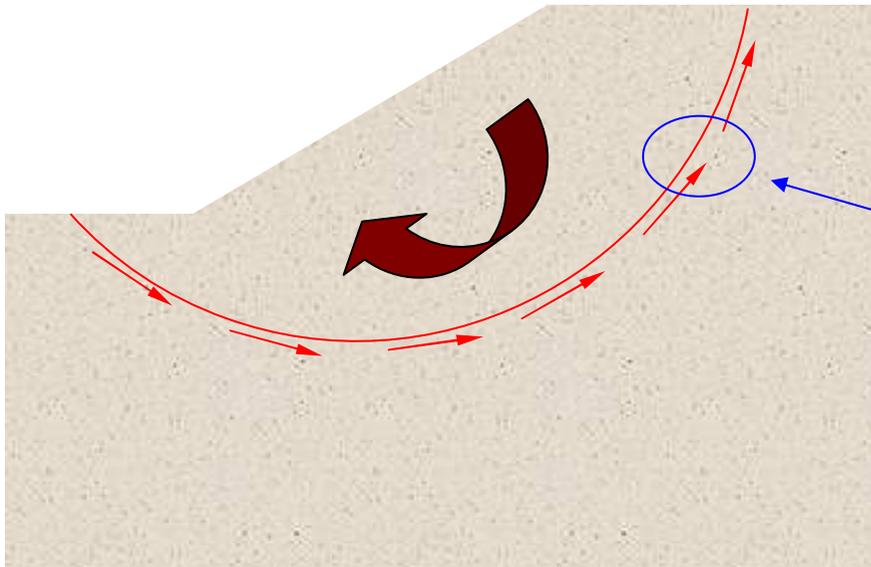
# Falla por corte en suelos

Suelos suelen fallar por corte



En la falla, la resistencia al corte a lo largo de la superficie de falla (resistencia al corte movilizada) alcanza la resistencia al corte.

# Mecanismo de falla por corte



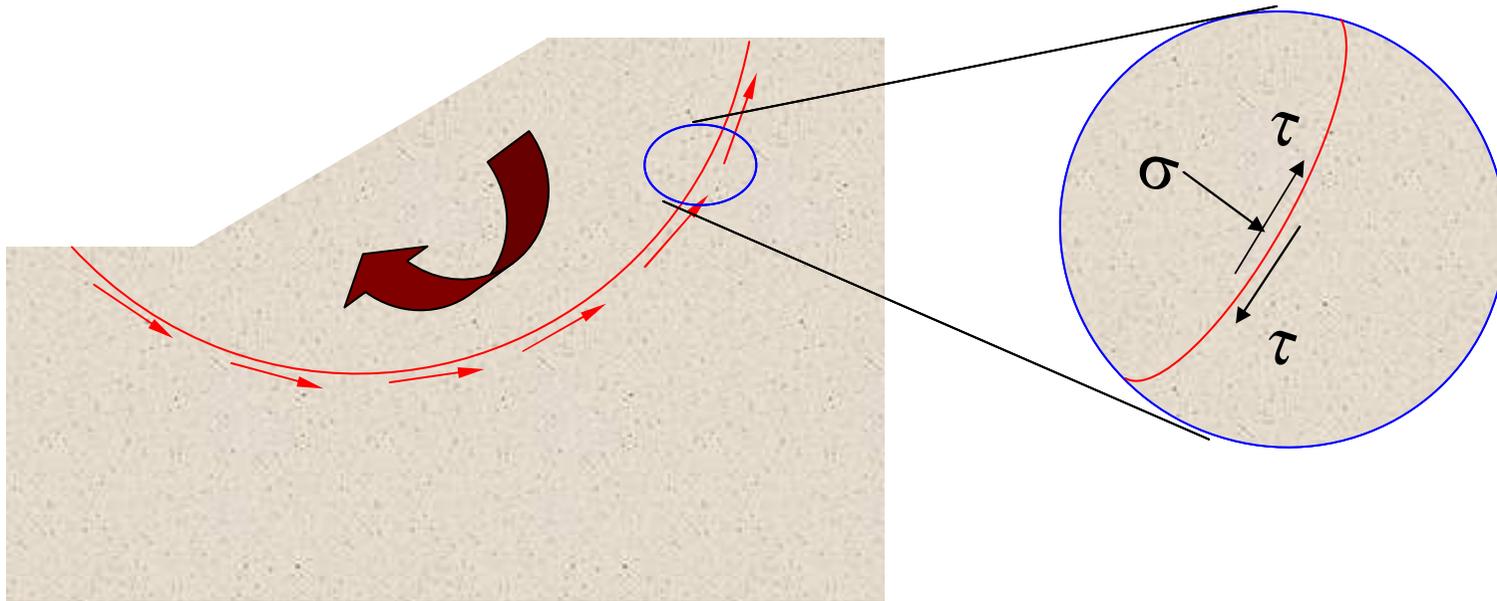
Superficie de  
falla

Las partículas de suelo deslizan unas sobre otras a lo largo de la superficie de falla.

Las partículas individuales no se fragmentan.

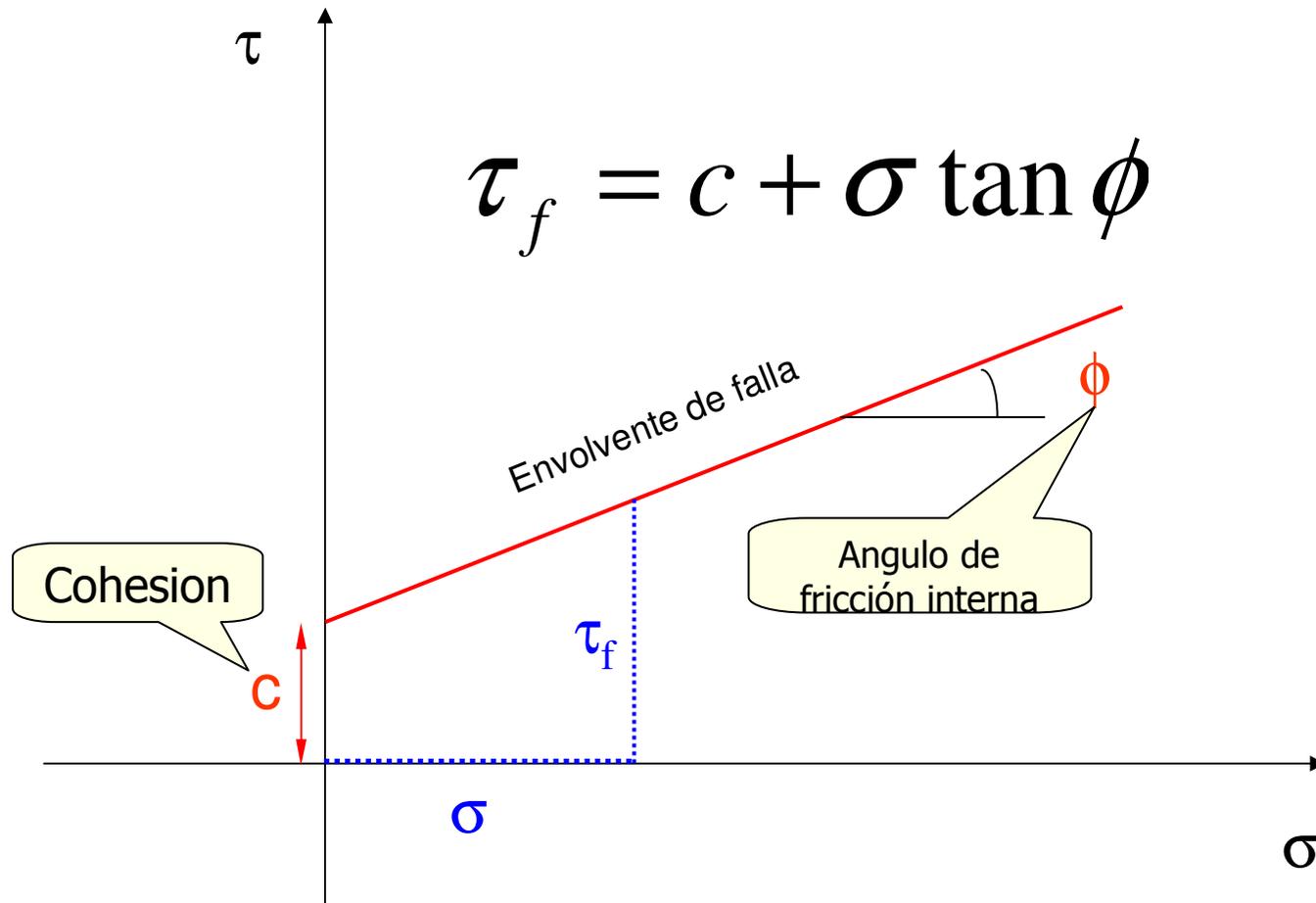


# Mecanismo de falla por corte



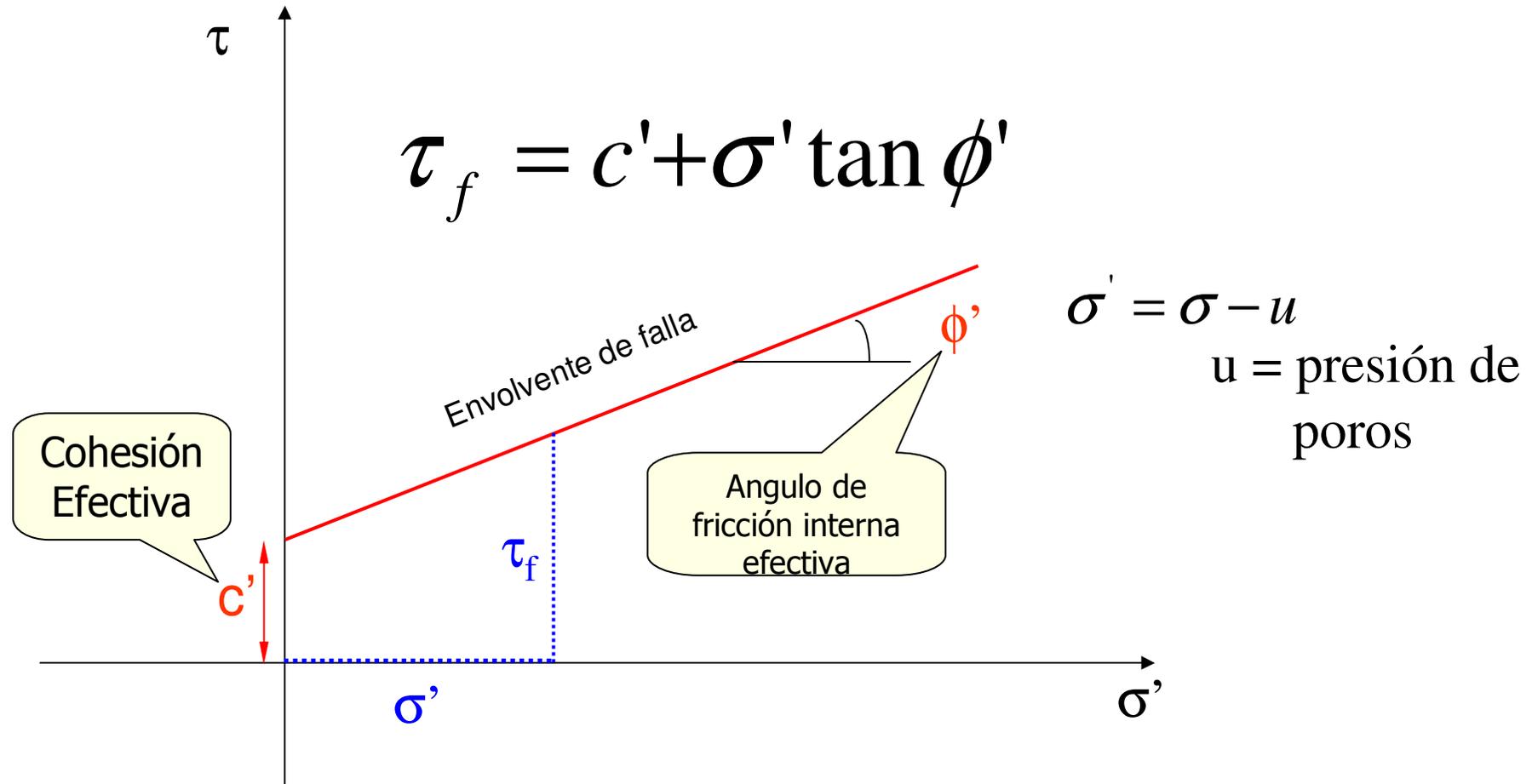
En la falla, las tensiones de corte a lo largo de la superficie de falla ( $\tau$ ) alcanzan la resistencia al corte ( $\tau_f$ ).

# Criterio de falla de Mohr-Coulomb (en términos de **tensiones totales**)



$\tau_f$  es la tensión máxima de corte que el suelo puede asumir antes de la falla, bajo la tensión normal  $\sigma$ .

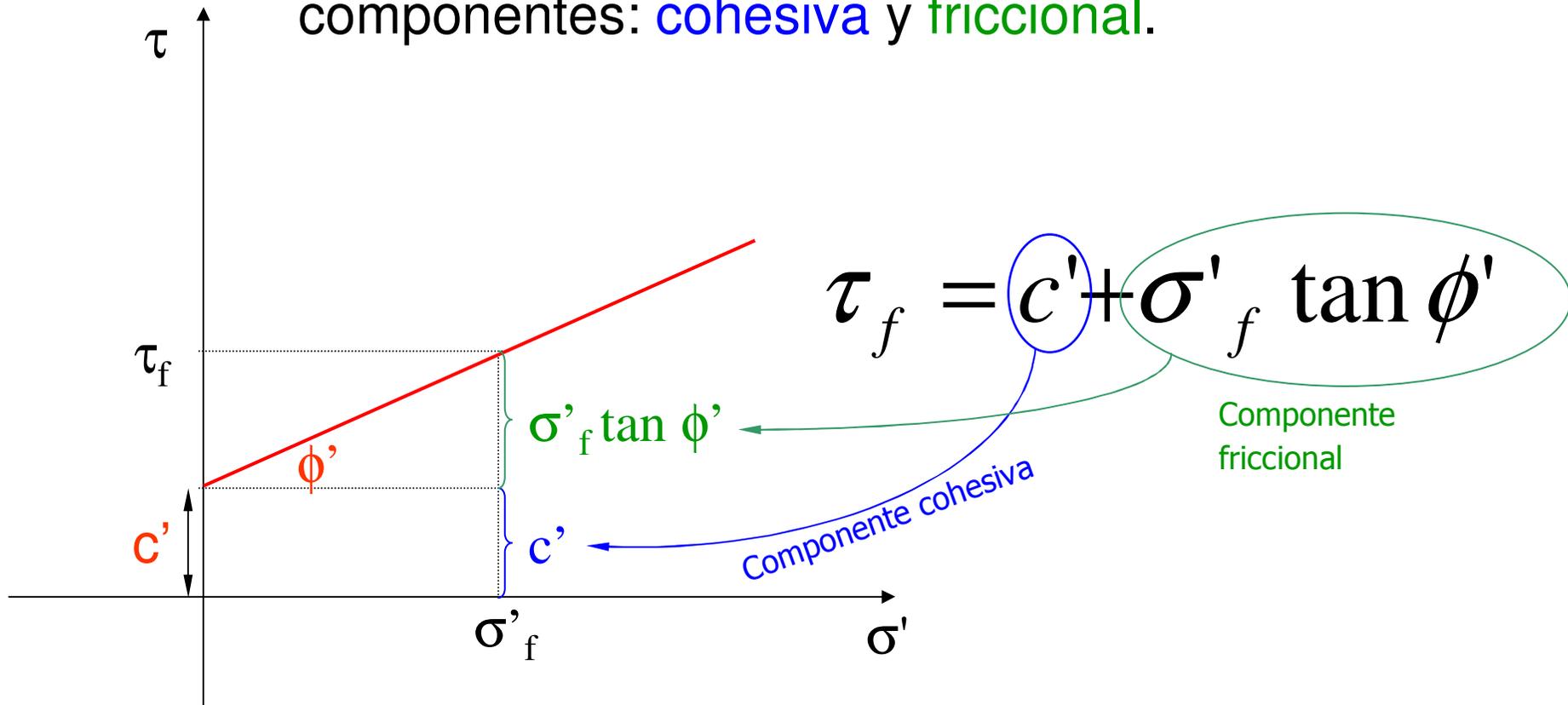
# Criterio de falla de Mohr-Coulomb (en términos de **tensiones efectivas**)



$\tau_f$  es la máxima tensión de corte que el suelo puede tomar sin fallar, bajo la tensión efectiva normal  $\sigma'$ .

# Criterio de Falla de Mohr-Coulomb

La Resistencia al Corte consta de dos componentes: **cohesiva** y **friccional**.



$c$  y  $\phi$  son los parámetros de resistencia al corte

A mayores valores, más alta es la resistencia al corte

Es la envolvente de ruptura de un suelo.

Se ha determinado que la envolvente y los parámetros dependen fuertemente de los siguientes factores:

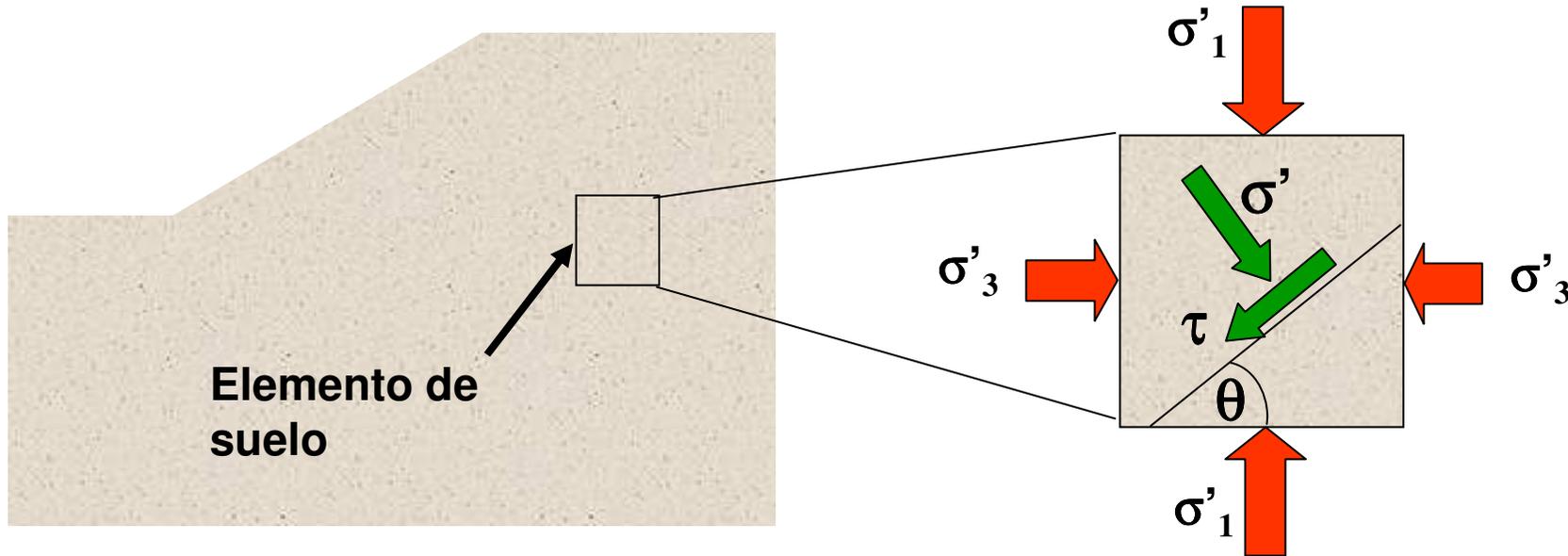
# Cohesión

- ★ Contenido de humedad
- ★ Metodo de ensayo (para  $\phi=0$  y cohesión máxima, para  $c=0$  en un ensaye CD)
- ★ Historial de esfuerzos previos (en arcillas preconsolidadas,  $c$  diferente de cero en todos los ensayos CD)
- ★ Composición mineralógica

## Angulo de fricción interna

- \* Metodo de ensayo (UU, CU, CD)
- \* Historial de esfuerzos previos (incremento de preconsolidación reduce  $\phi$ )
- \* Presión de celda o normal (incremento tiende a reducir  $\phi$ )
- \* Tamaño de particulas y forma (mayores tamaños y aumento de angularidad tiende a incrementar  $\phi$ )
- \* Densidad (aumento de densidad en el orden de solo 0,05 gr/cm<sup>3</sup> incrementa  $\phi$  en dos a tres grados)
- \* Contenido de humedad (dependiendo del ensayo y contenido de humedad,  $\phi$  puede variar de 0 al valor correcto)
- \* Composición mineral (efectos inciertos)

# Círculo de Mohr de tensiones



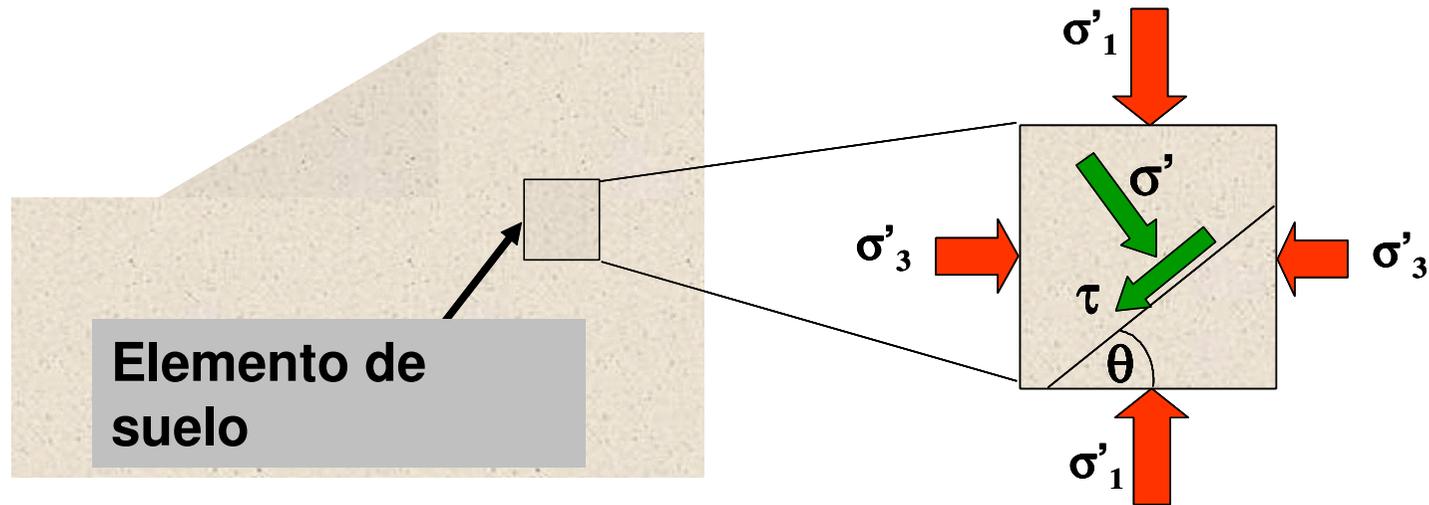
Resolviendo fuerzas en direcciones  $\sigma$  y  $\tau$ ,

$$\tau = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \sin 2\theta$$

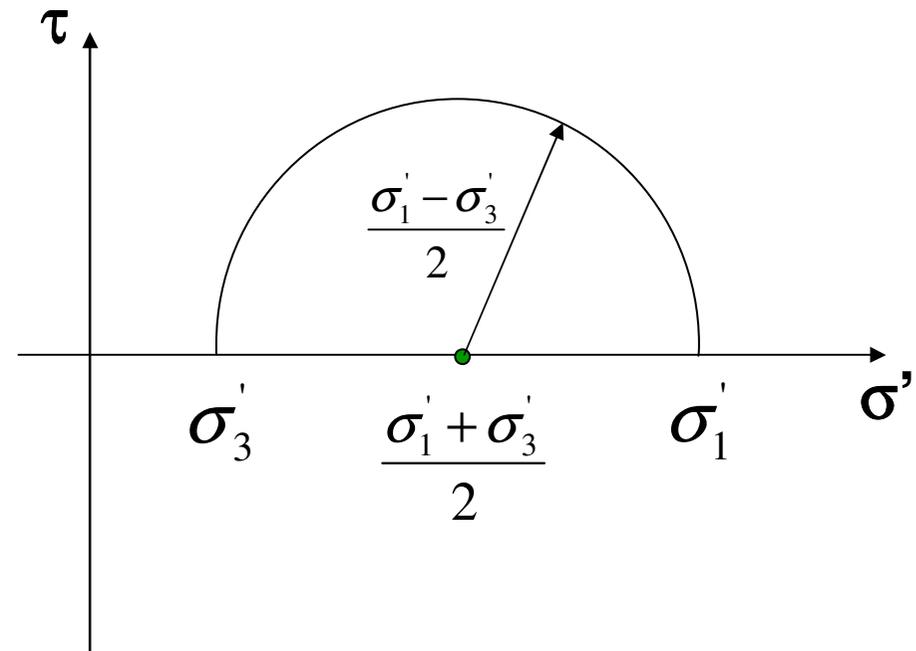
$$\sigma' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} + \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \cos 2\theta$$

$$\tau^2 + \left( \sigma' - \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \right)^2 = \left( \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \right)^2$$

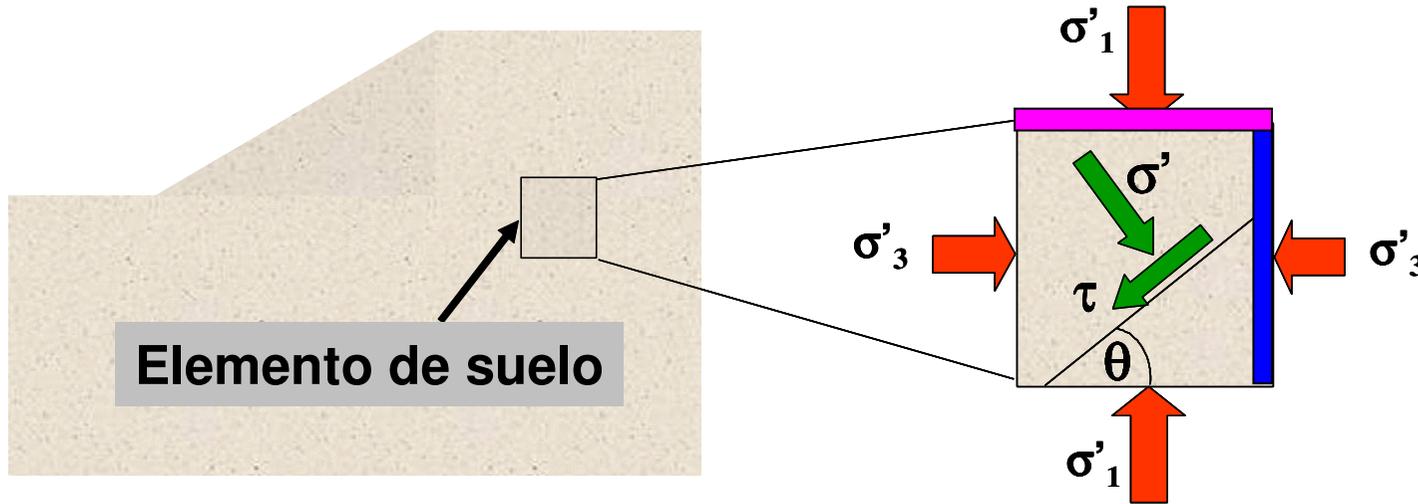
# Círculo de Mohr de tensiones



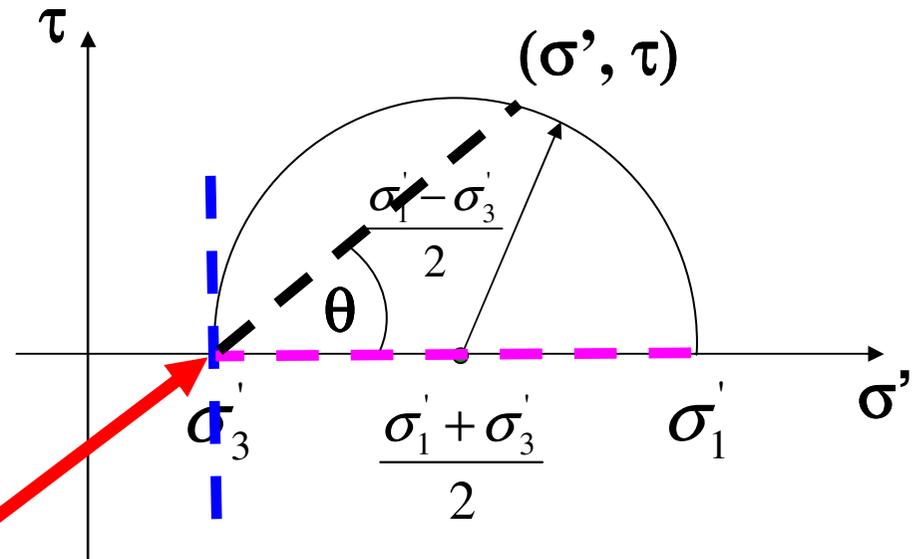
$$\tau^2 + \left( \sigma' - \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \right)^2 = \left( \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \right)^2$$



# Circulo de Mohr de tensiones

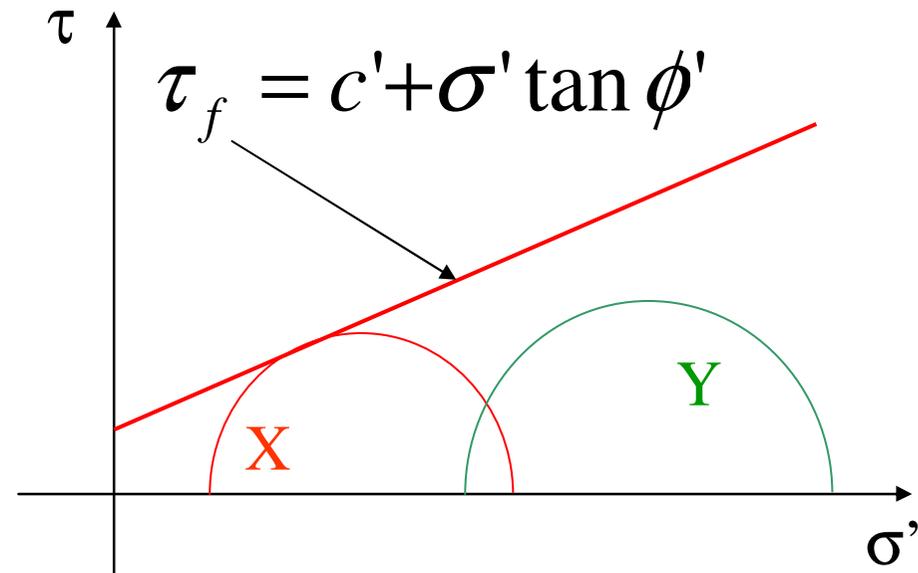
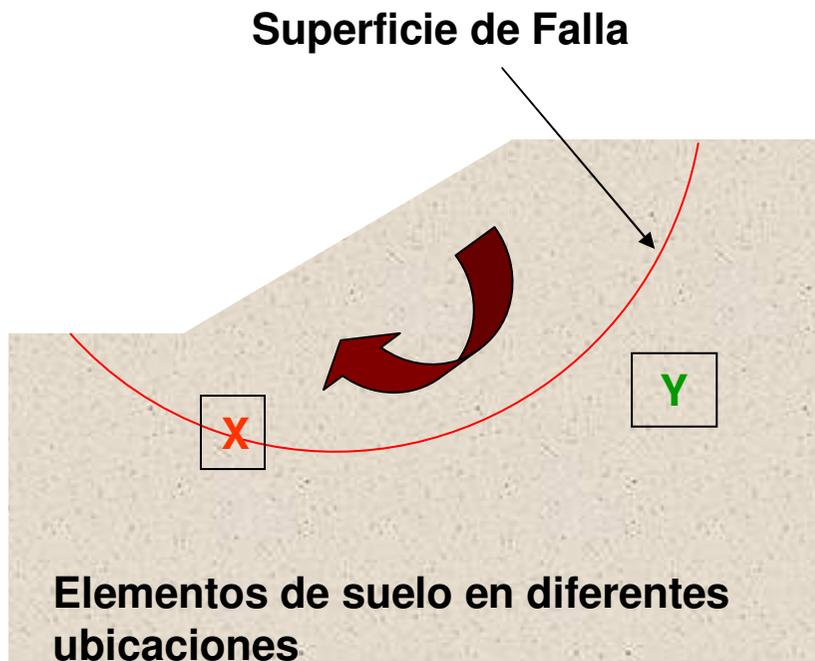


$$\tau^2 + \left( \sigma' - \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \right)^2 = \left( \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \right)^2$$



$P_D = \text{Polo c/r al plano}$

# Circuitos de Mohr & Envoltente de falla

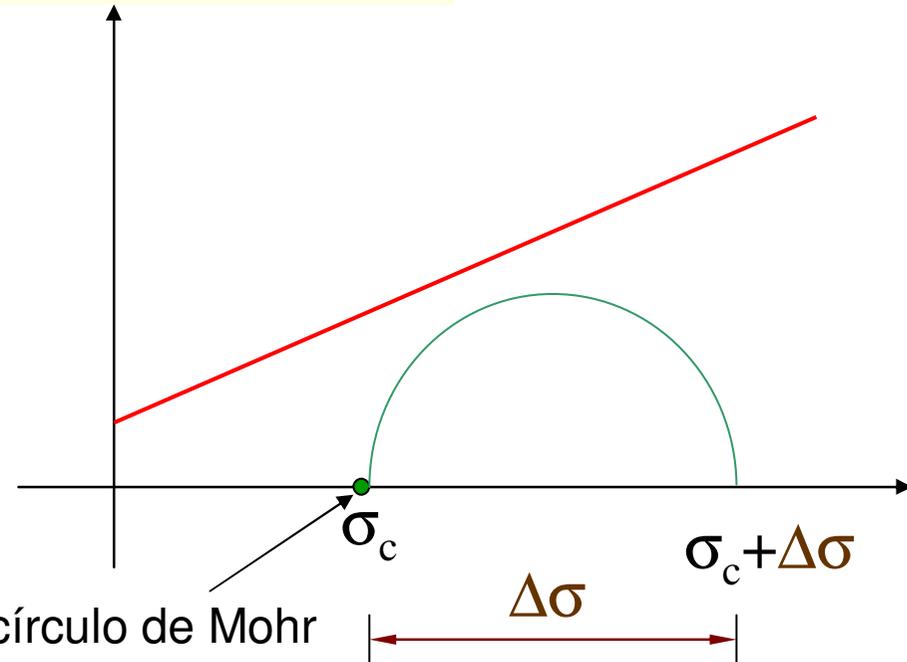
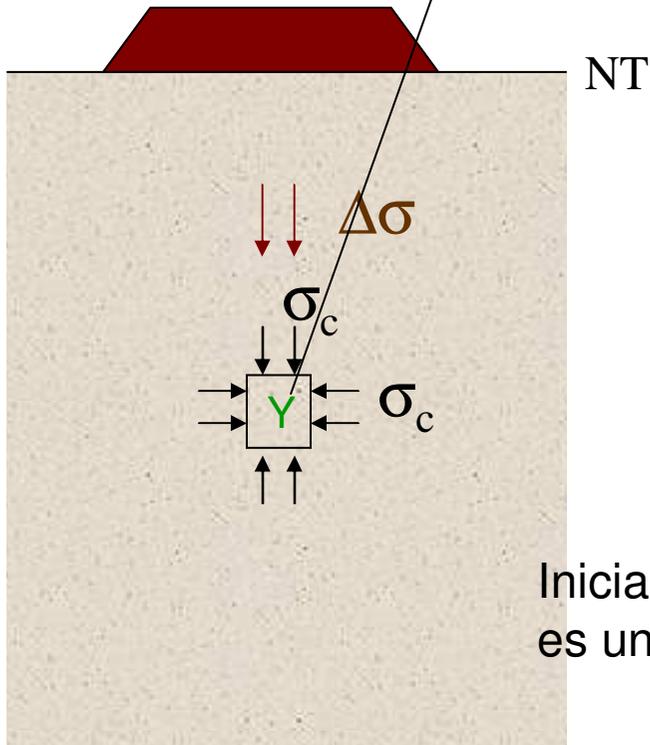


Y ~ estable

X ~ falla

# Círculos de Mohr & Envolventes de Falla

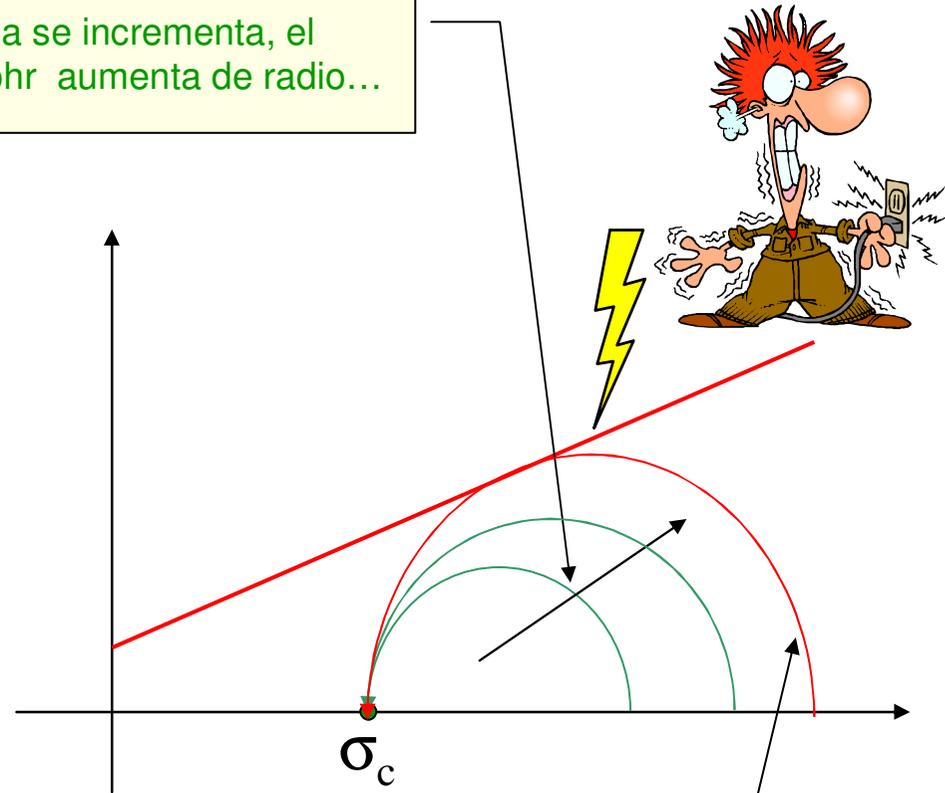
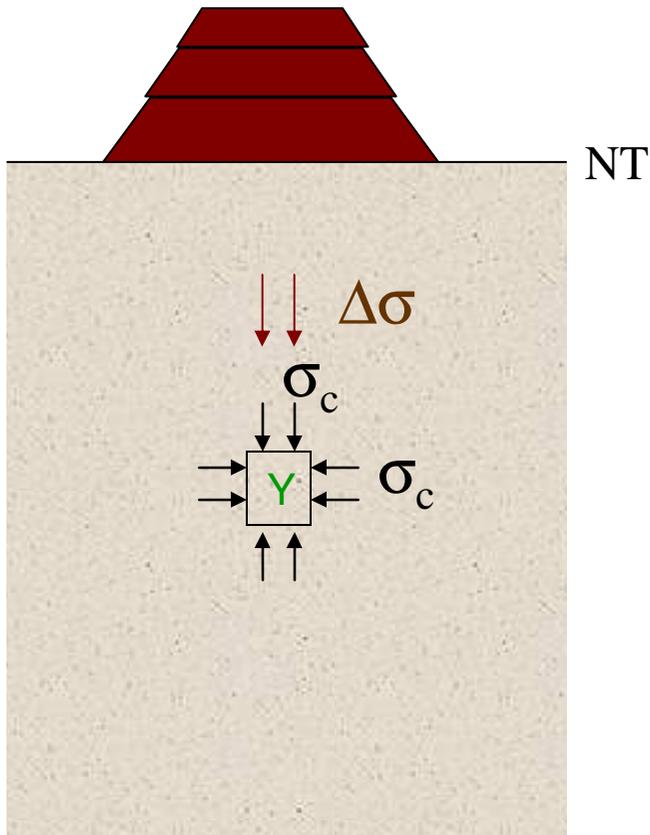
El elemento de suelo no falla si el círculo de Mohr es contenido dentro de la envolvente



Inicialmente, el círculo de Mohr es un punto

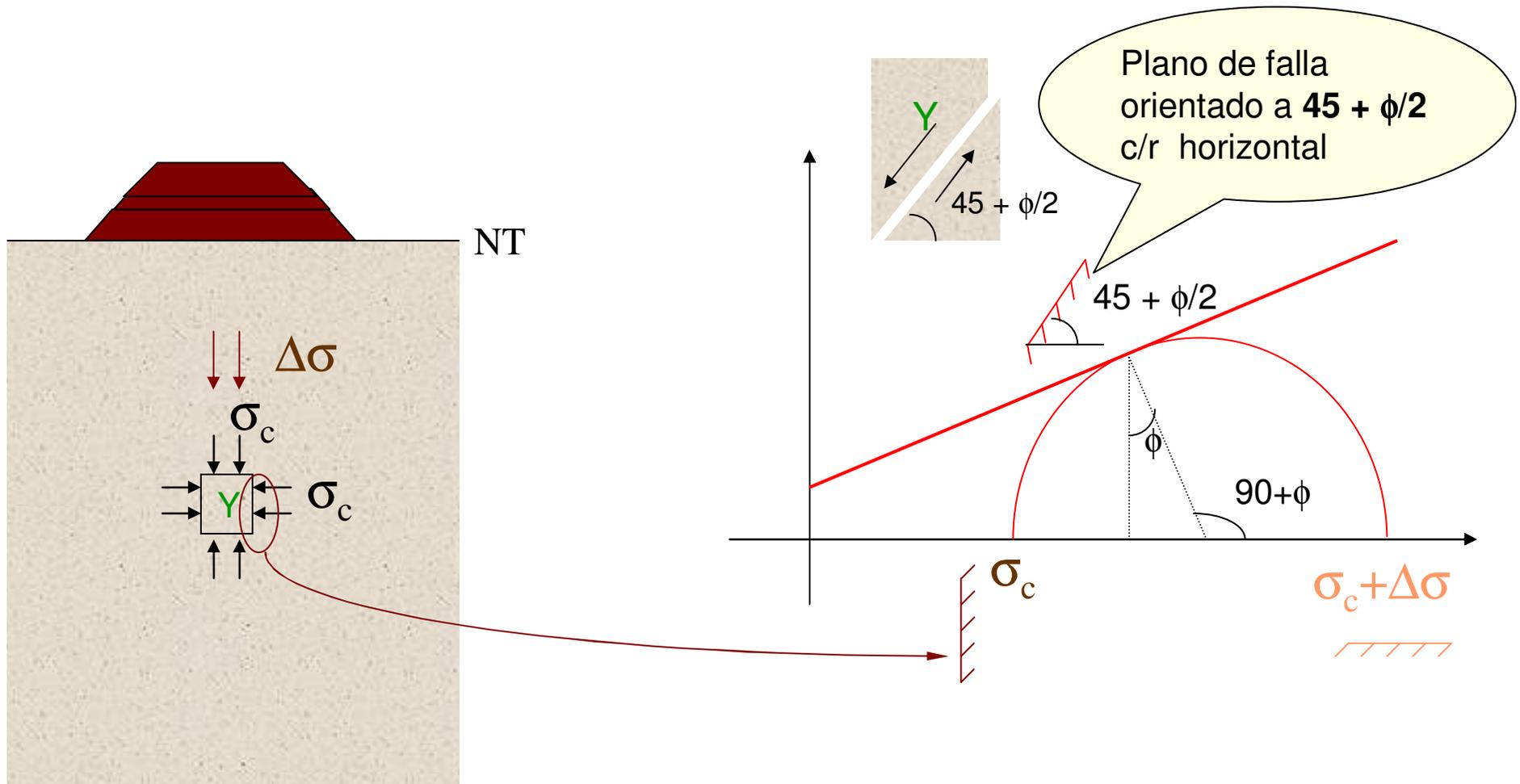
# Círculos de Mohr & Envolventes de Falla

Como la carga se incrementa, el círculo de Mohr aumenta de radio...

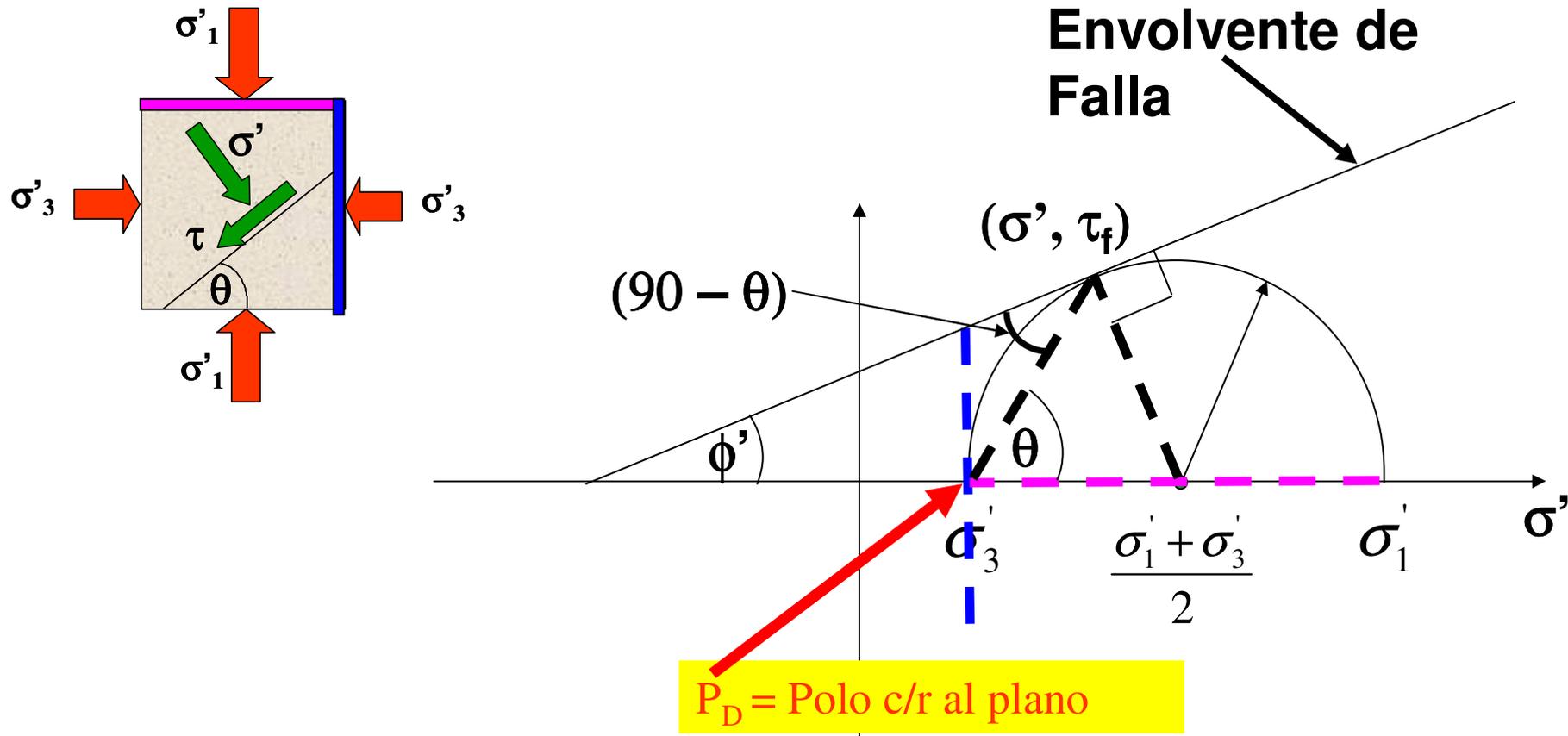


.. Y finalmente la falla se produce cuando el círculo de Mohr toca la envolvente

# Orientación del Plano de Falla



# Orientación del plano de Falla

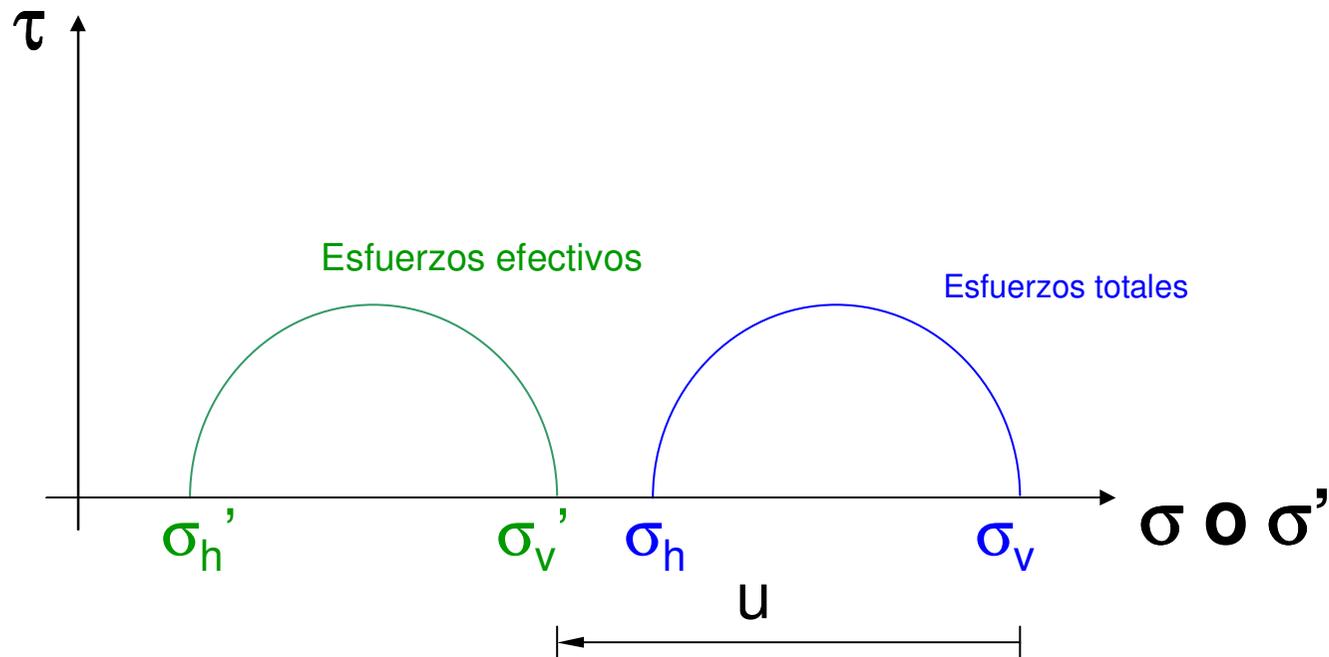
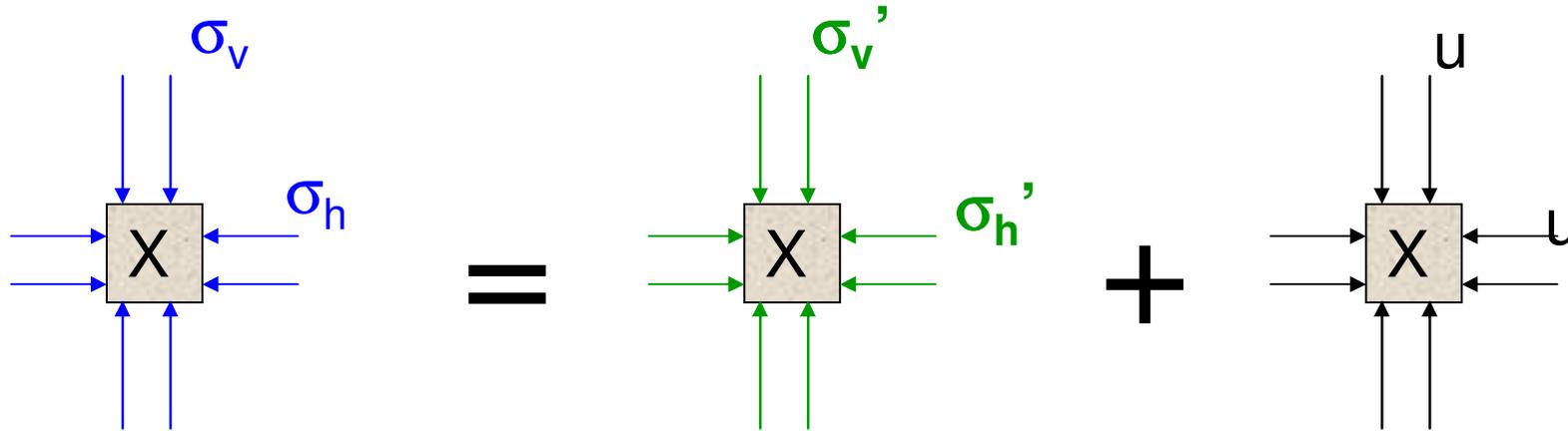


De allí,

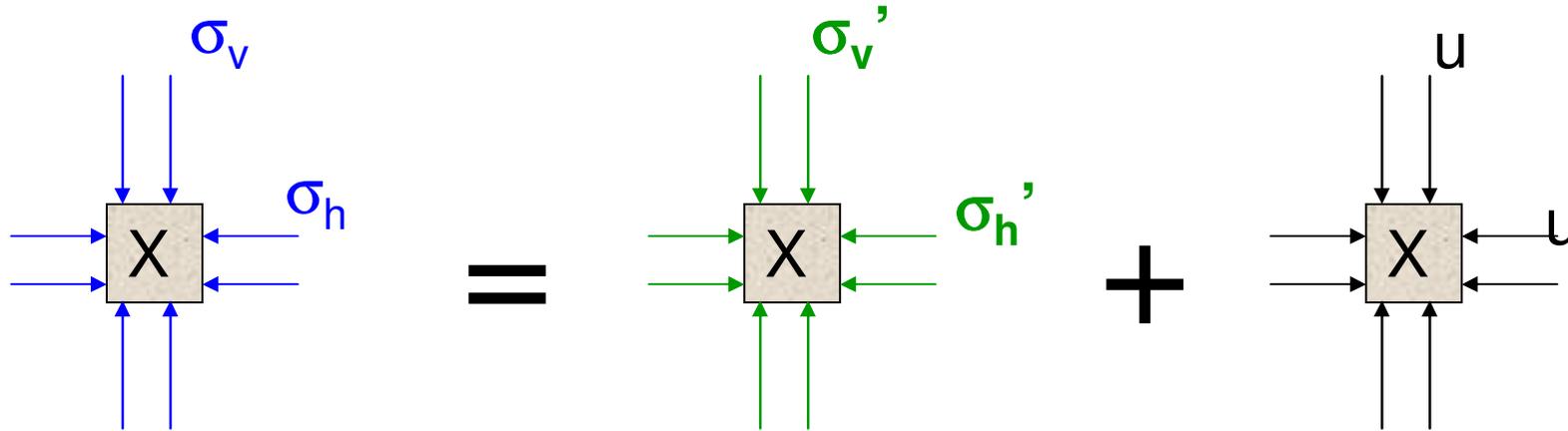
$$90 - \theta + \phi' = \theta$$

$$\theta = 45 + \phi'/2$$

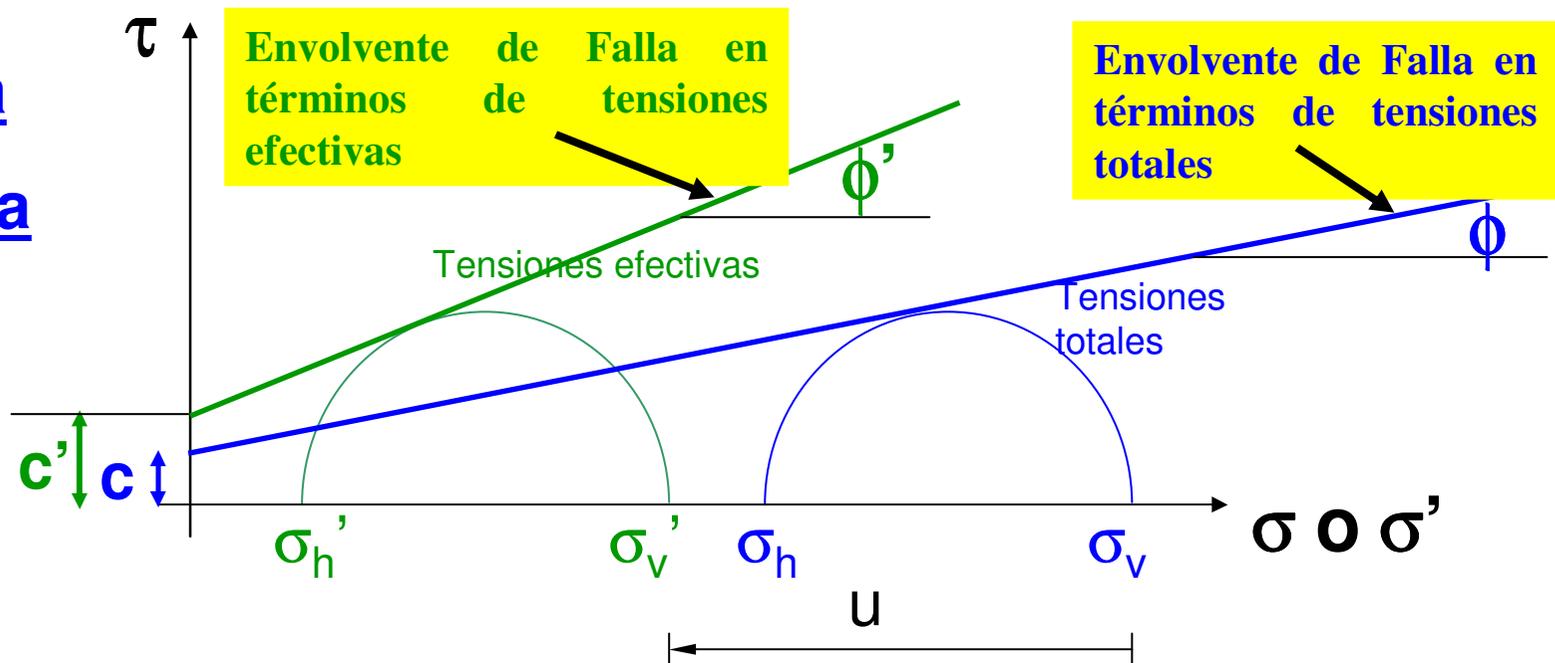
# Círculos de Mohr en terminos de esfuerzos **totales** & **efectivos**



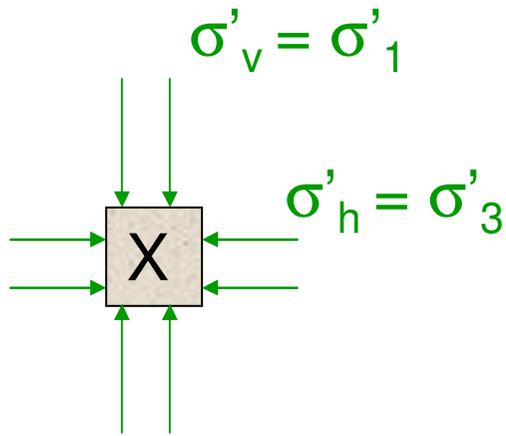
# Círculos de Mohr en terminos de esfuerzos **totales** & efectivos



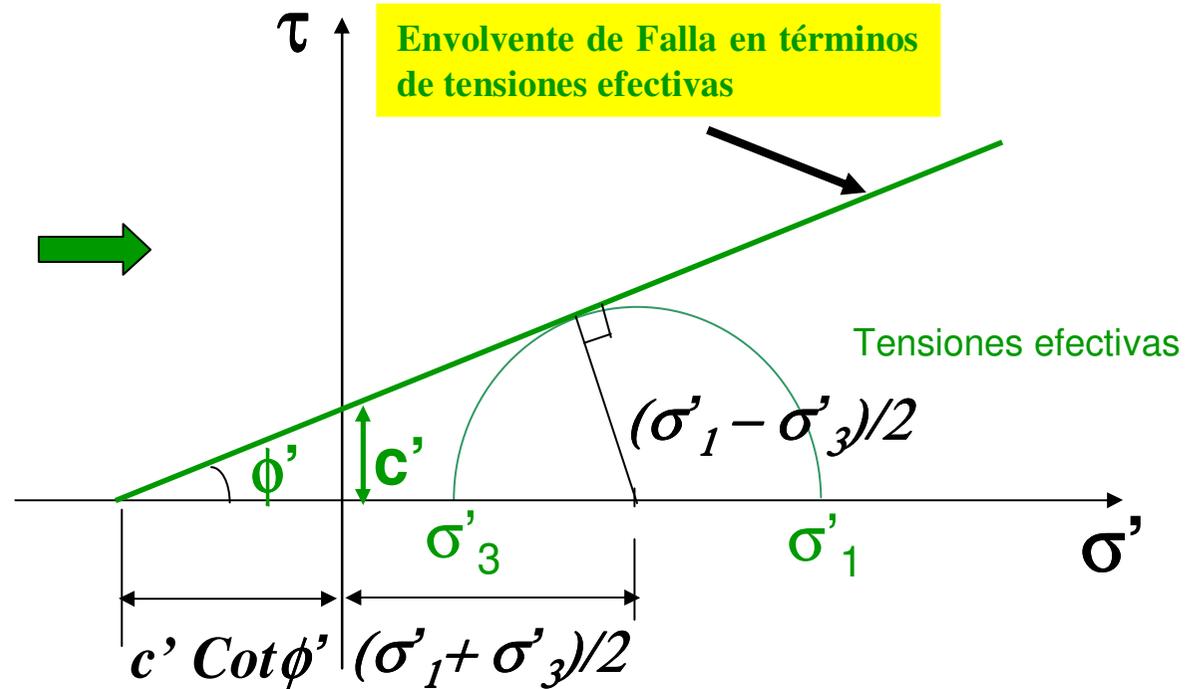
Si X está en la falla



# Criterio de Falla de Mohr Coulomb con círculo de tensiones de Mohr



X esta en la falla



De allí,

$$\left[ c' \cot \phi' + \left( \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \right) \right] \sin \phi' = \left( \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \right)$$

## Criterio de Falla de Mohr Coulomb con círculo de tensiones de Mohr

$$\left[ c' \cot \phi' + \left( \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \right) \right] \sin \phi' = \left( \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \right)$$

$$(\sigma'_1 - \sigma'_3) = (\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin \phi' + 2c' \cos \phi'$$

$$\sigma'_1 (1 - \sin \phi') = \sigma'_3 (1 + \sin \phi') + 2c' \cos \phi'$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \frac{(1 + \sin \phi')}{(1 - \sin \phi')} + 2c' \frac{\cos \phi'}{(1 - \sin \phi')}$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right) + 2c' \tan \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right)$$

# Determinación de parámetros de resistencia al corte de suelos ( $c$ , $\phi$ o $c'$ , $\phi'$ )

Ensayos de laboratorio en probetas obtenidas de muestras representativas no perturbadas

Los ensayos de laboratorio más empleados son,

1. Corte directo
2. Compresión Triaxial

Otros ensayos de laboratorio, Corte directo simple, anillo torsional, triaxial plano, veleta de laboratorio, cono de laboratorio

Ensayos in situ

1. Veleta manual
2. Veleta
3. Penetrometro manual
4. Cono dinámico
5. Presiometro Menard
6. Penetrometro de cono estatico
7. Ensayo SPT penetración standard
8. Corte directo

# Ensayos de Laboratorio

Paso previo:

obtención de muestras =>

Campaña de exploración Geotecnica



# Ensayos de Laboratorio

## Paso previo:

Obtención de muestras =>

Campaña de exploración Geotecnica =>

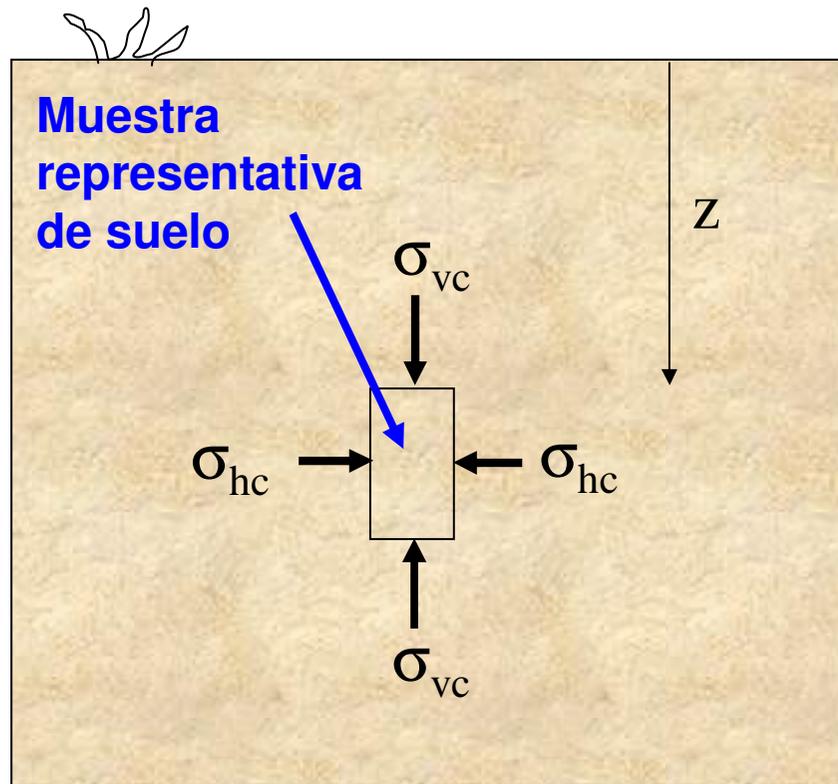
Programación de Ensayos – Estudio de Antecedentes, antes de definir campaña

Ensayos previos, Caracterización de suelos y propiedades Índice

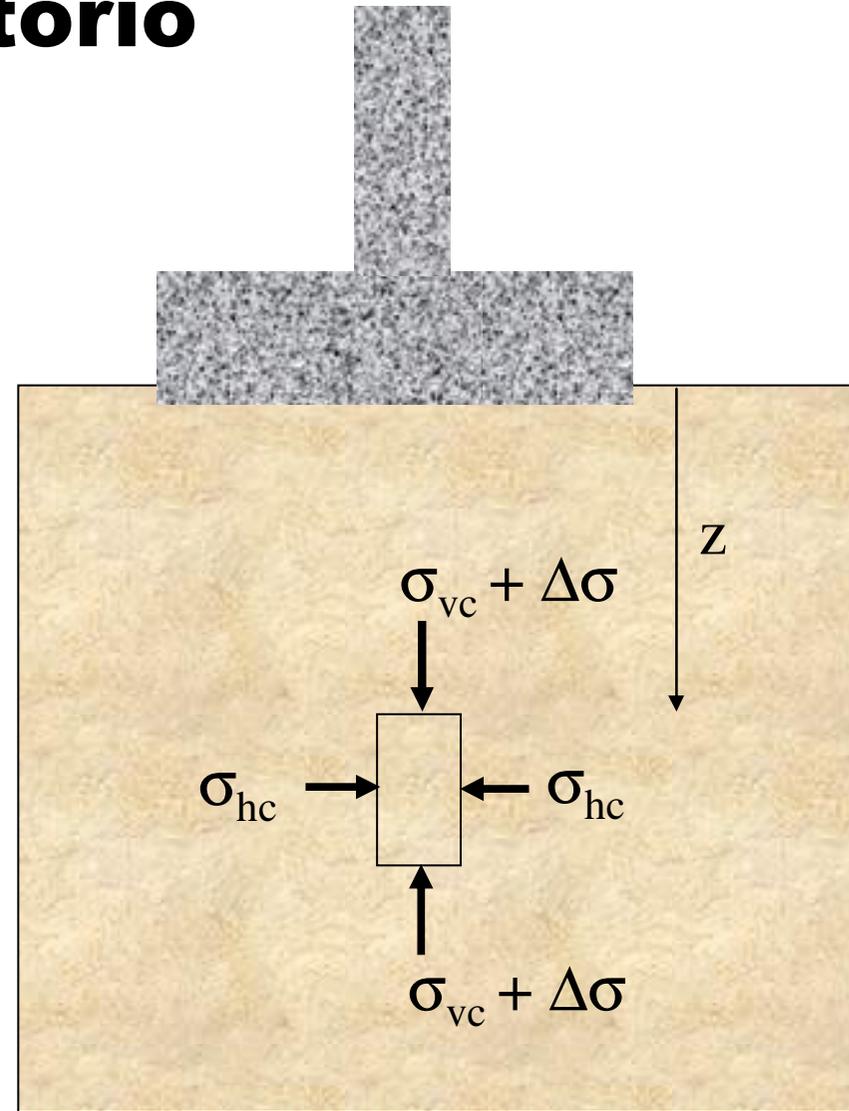
Antes de muestreo: Inspección de calicatas y descripción estratigráfica ( revisión registros sondajes)

# Ensayos de Laboratorio

## Condiciones de terreno



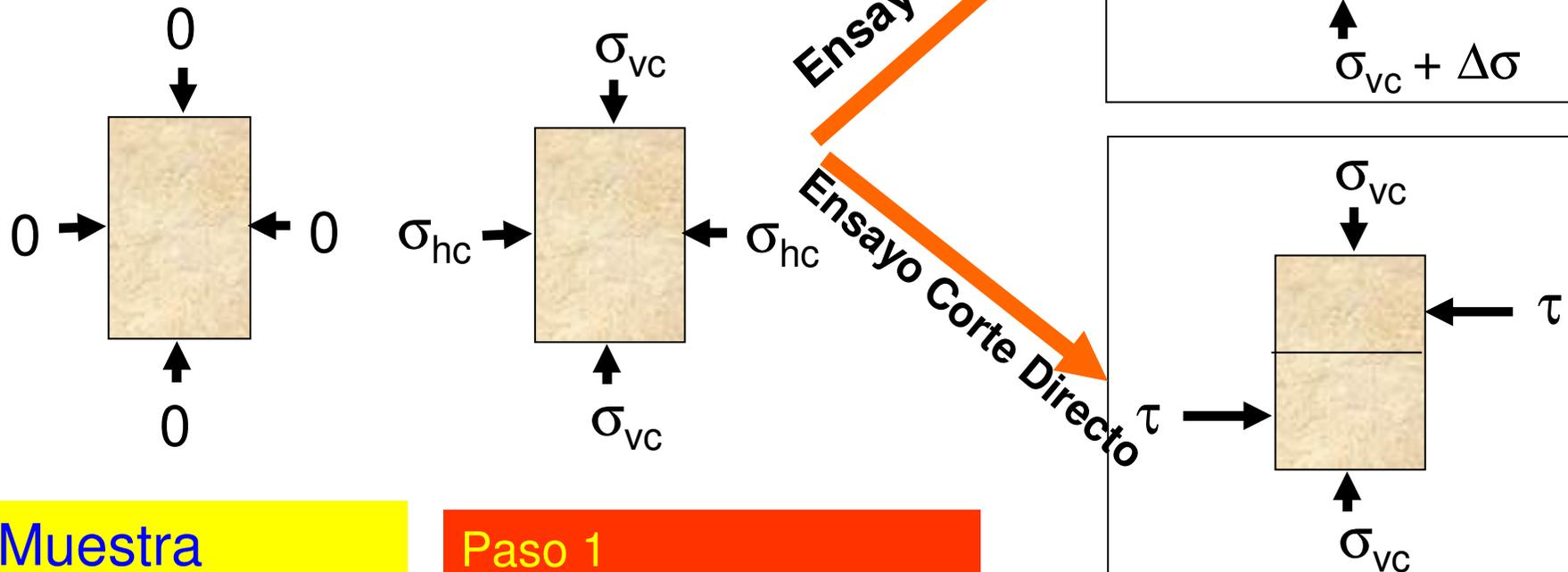
Antes de construcción



Despues y durante construction

# Ensayos Laboratorio

Simulan condiciones de terreno en el laboratorio



Muestra Representativa de suelo extraída del sitio

Paso 1

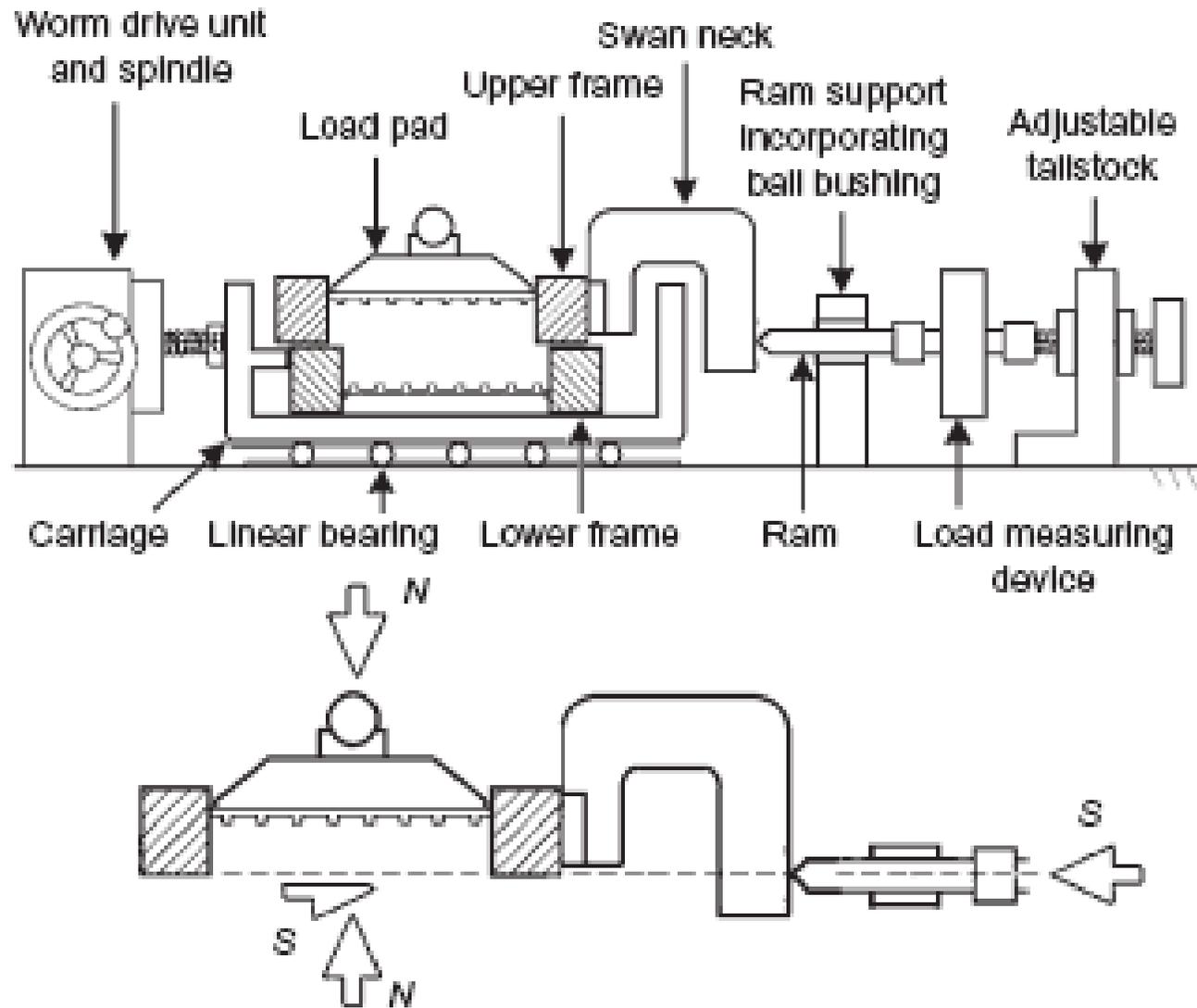
Colocar la probeta en la celda y aplicar las condiciones de esfuerzos iniciales

Paso 2

Aplicar el campo correspondiente de esfuerzos previstos

# Ensayo de Corte Directo

## Caja de corte directo



# Ensayo de corte Directo

Es el más aplicado para ensayos consolidados drenados, especialmente en suelos granulares como arenas o arcillas rígidas

## Preparación de muestra de arena



Componentes equipo

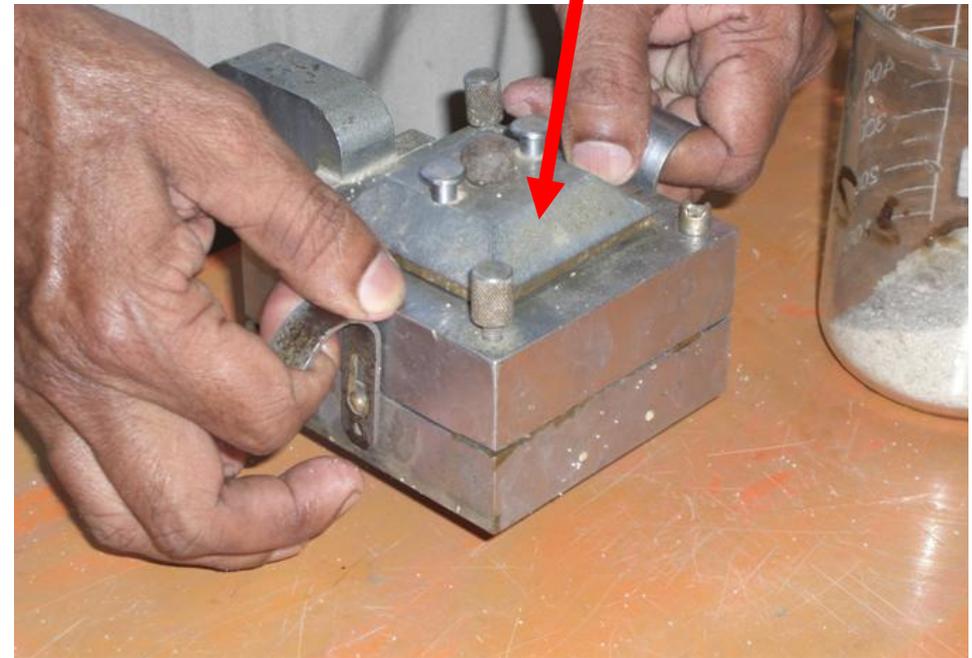


Preparacion de probeta de arena

# Corte directo

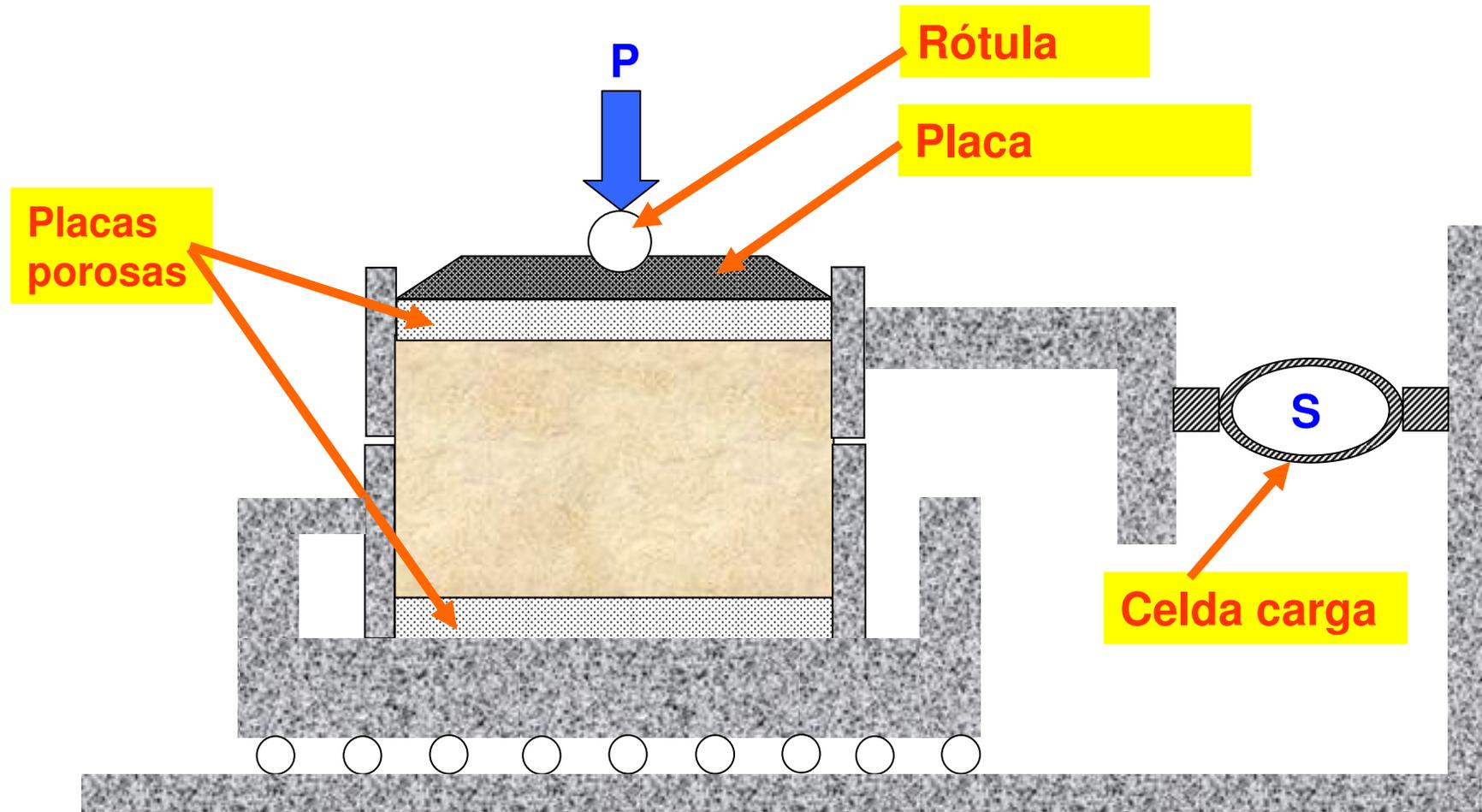


**Enrasado**



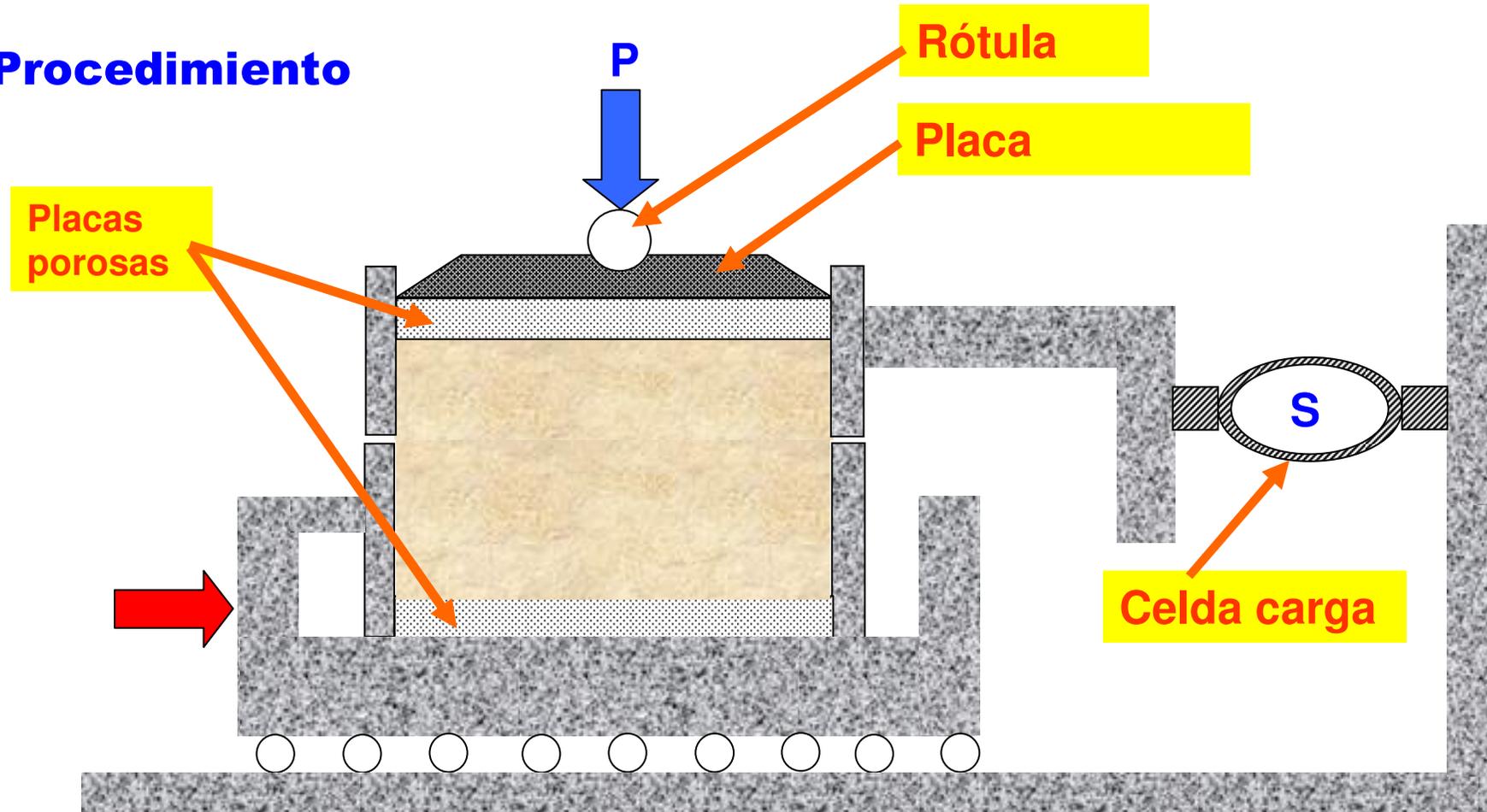
**Montaje placa**

# Corte directo



Paso 1 : Carga vertical y consolidación

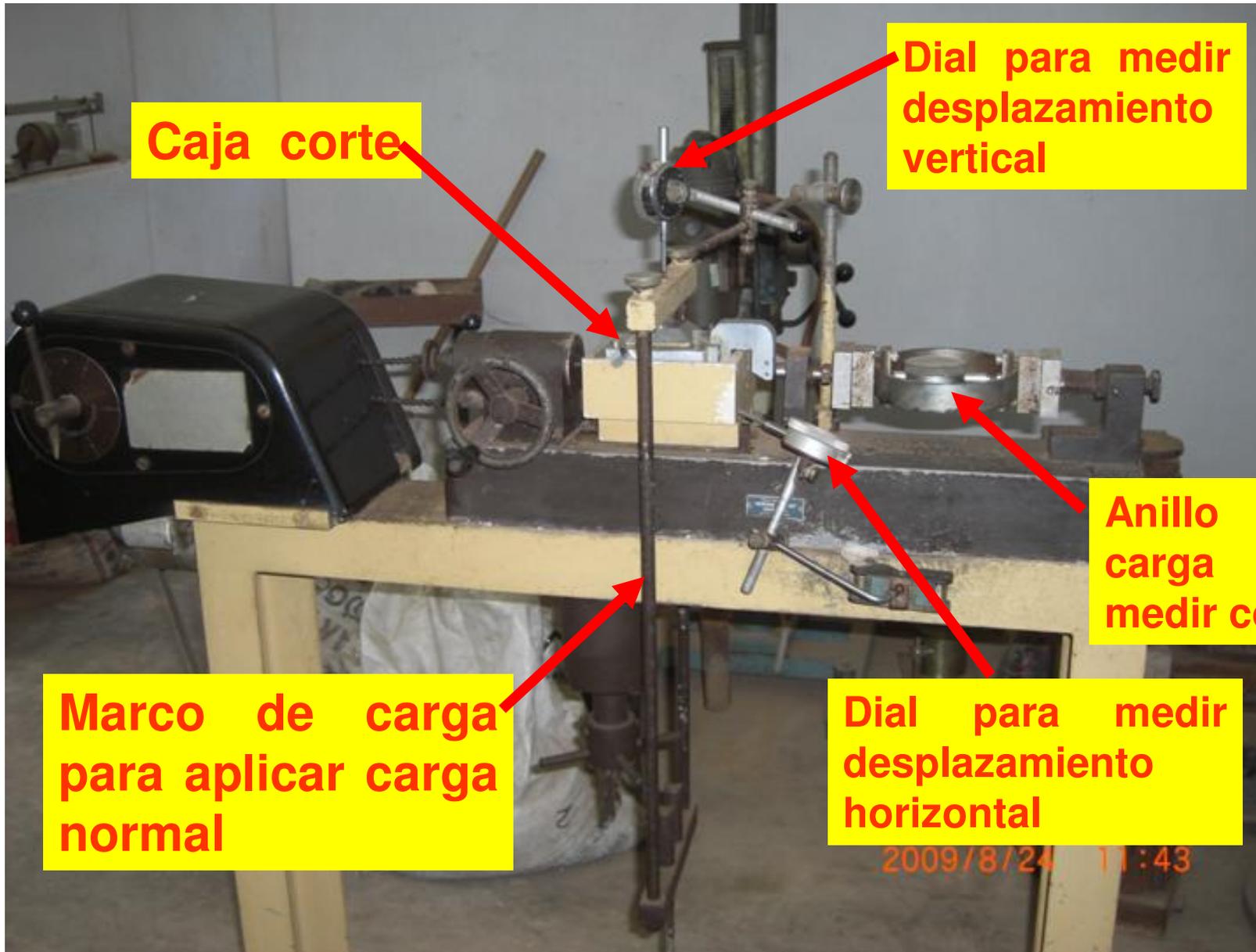
## Procedimiento



**Paso 2: Desplazamiento de caja a velocidad constante**



# Corte Directo



# Corte Directo

## Analisis de resultados de ensayos

Carga normal (P)

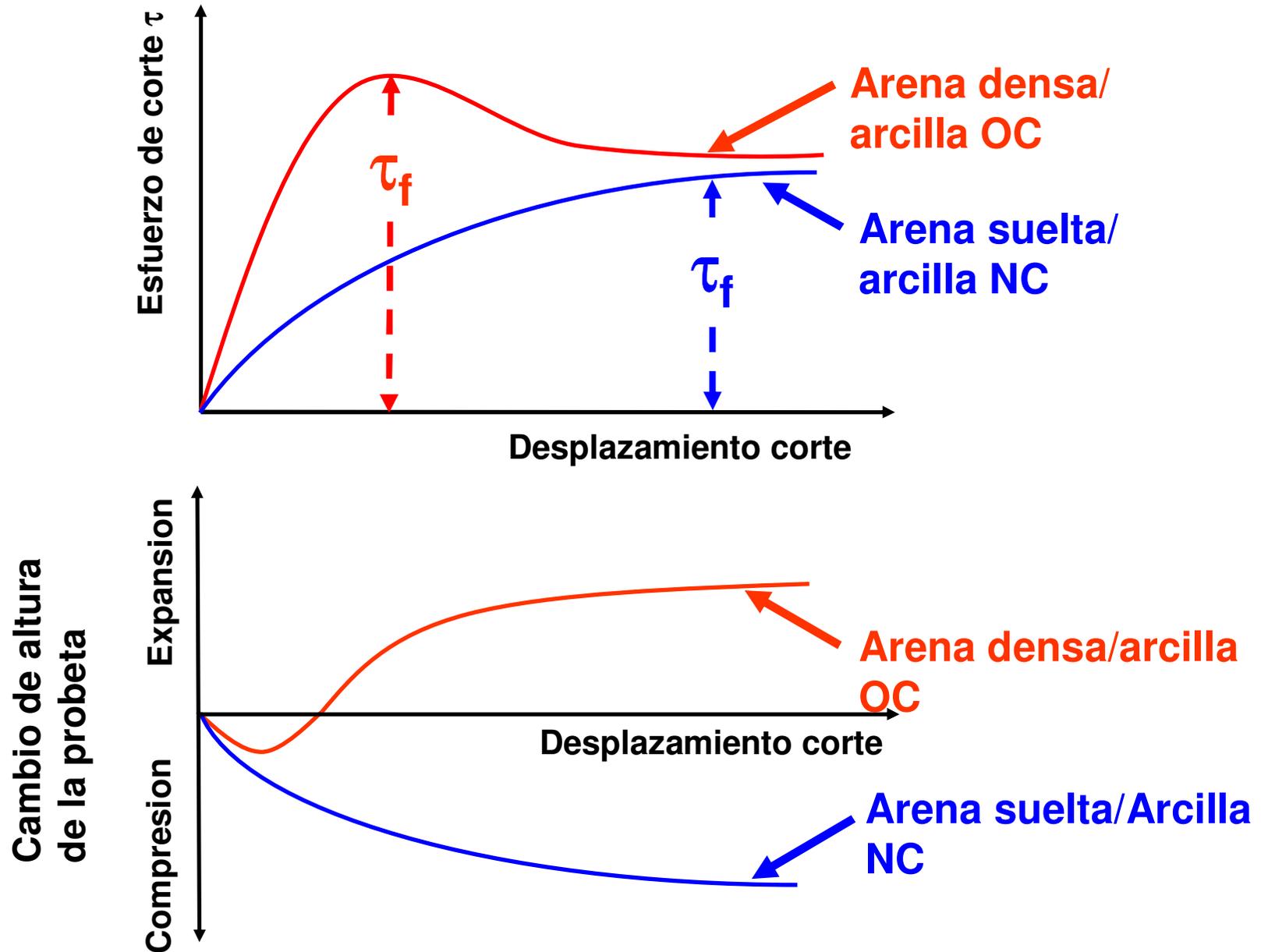
$$\sigma = \text{Presion normal} = \frac{\text{Carga normal (P)}}{\text{Area de seccion transversal de probeta}}$$

Carga para producir el corte

$$\tau = \text{Esfuerzo de corte} = \frac{\text{Carga para producir el corte}}{\text{Area de seccion transversal de probeta}}$$

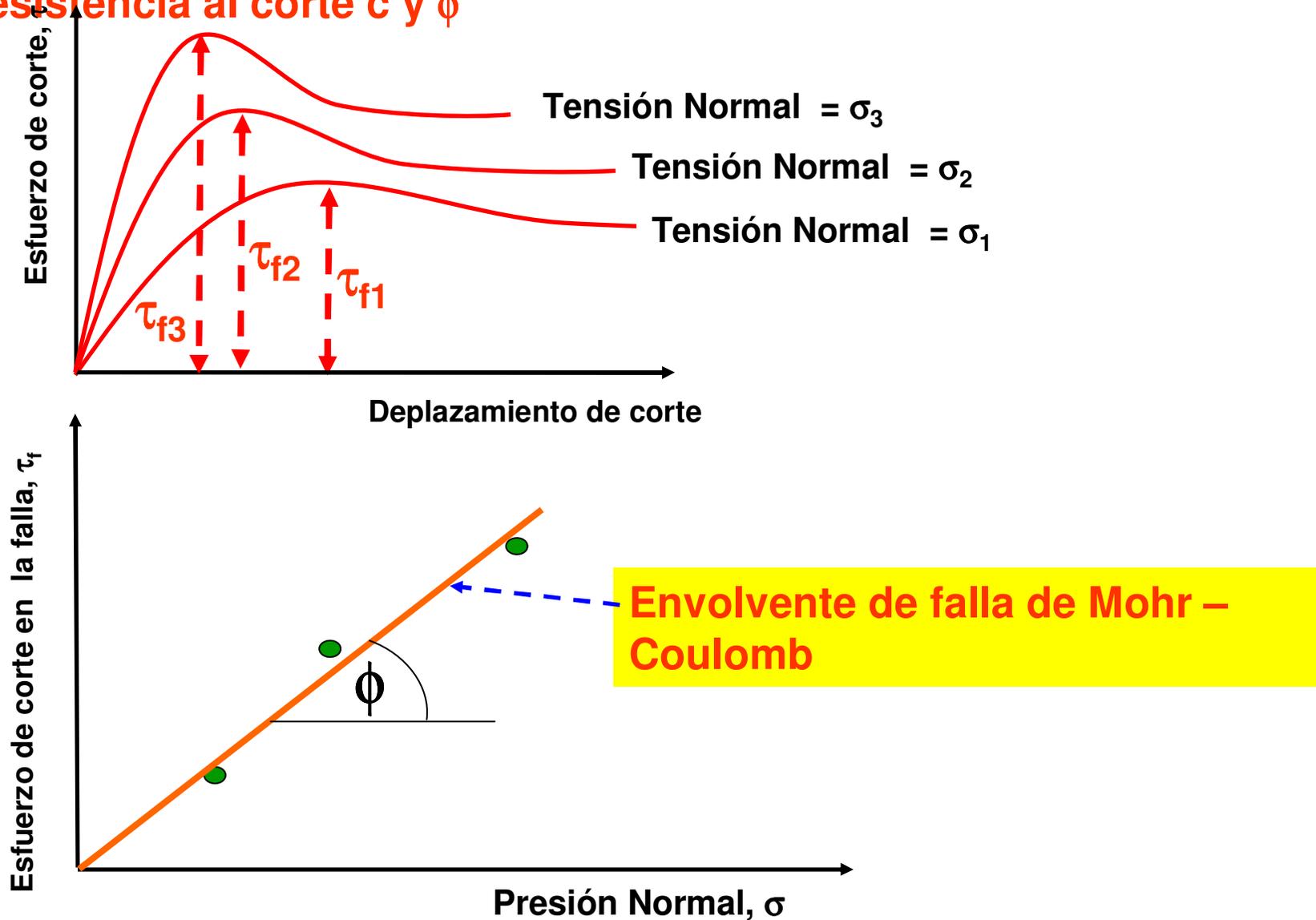
# Corte Directo en arenas

## Relación tensión-deformación



# Corte Directo en Arenas

Como determinar los parametros de resistencia al corte  $c$  y  $\phi$



# Ensayos corte directo en arenas

La arena es no cohesiva, de allí  $c = 0$

Los ensayos de corte directo son drenados y la presión de poros disipada, de allí  $u = 0$

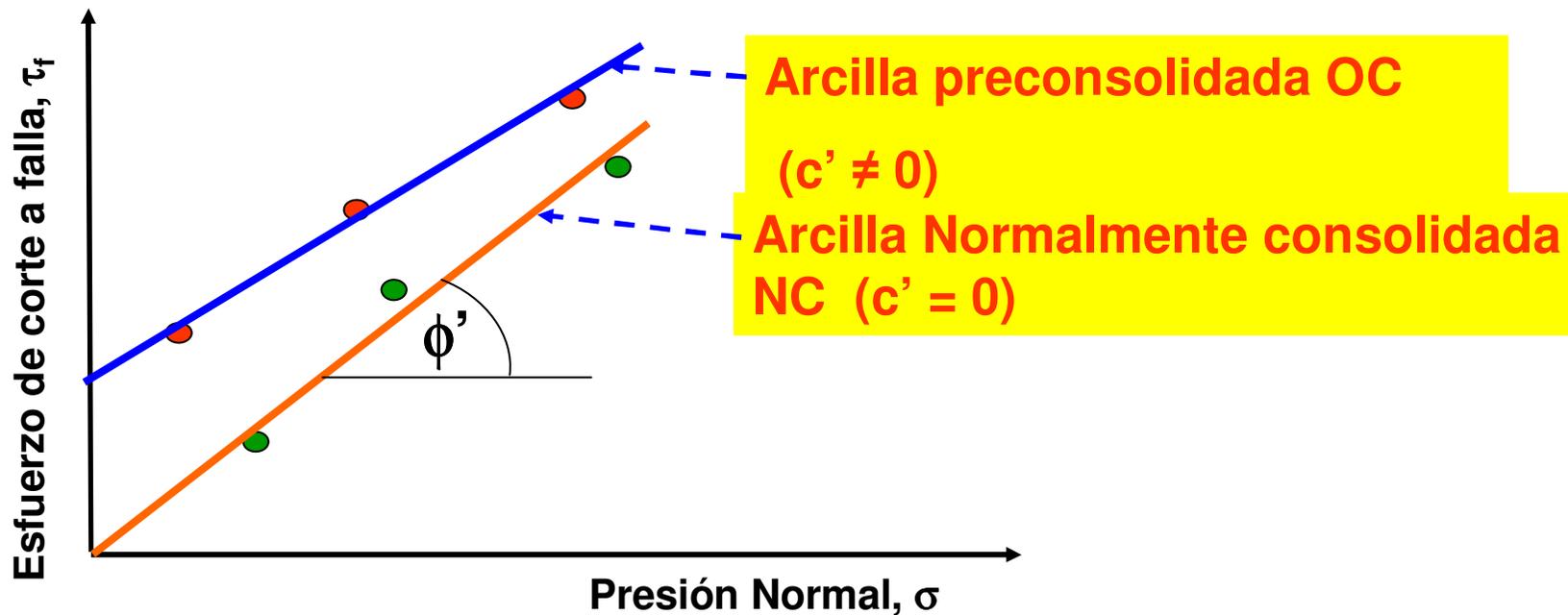
Por lo tanto,

$$\phi' = \phi \quad \text{y} \quad c' = c = 0$$

# Corte Directo en arcillas

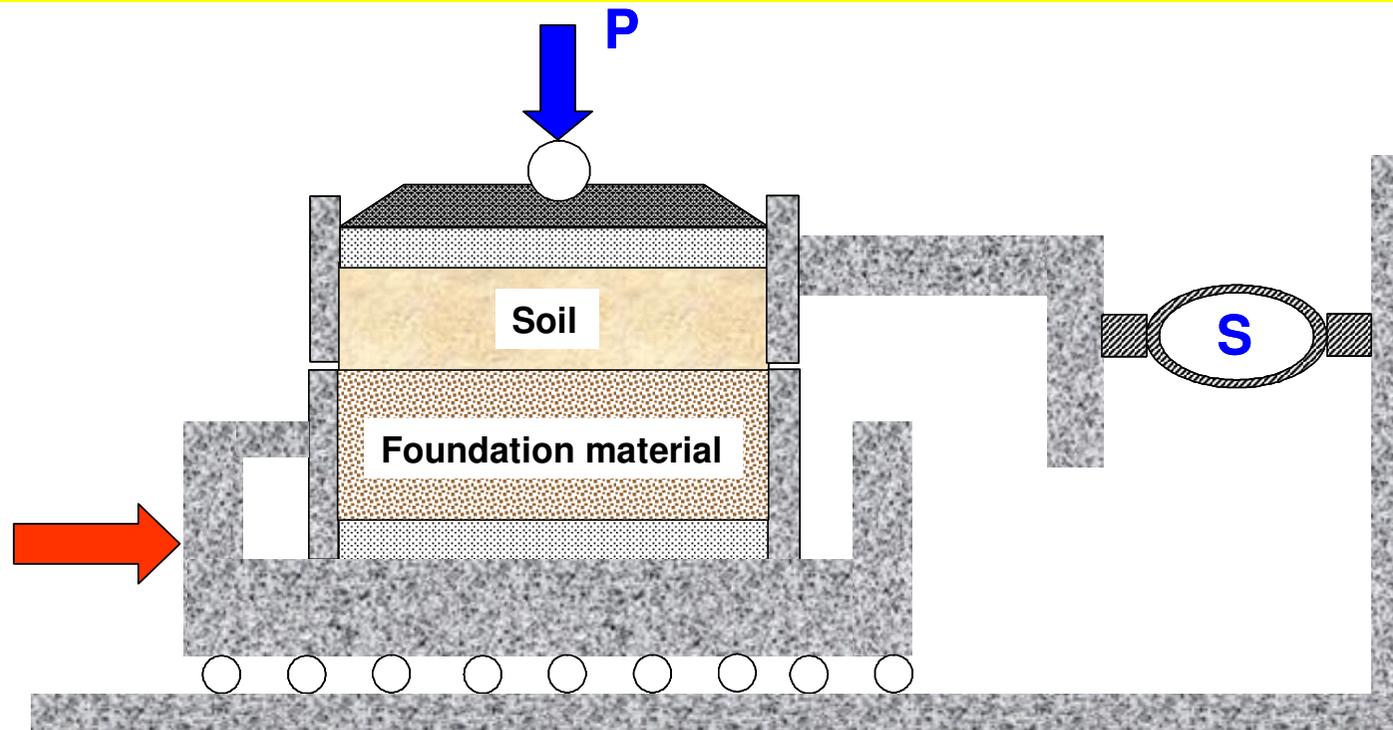
En el caso de arcillas, el desplazamiento horizontal debe ser aplicado a una velocidad muy baja para permitir la disipación de la presión de poros (de allí, un ensaye puede tomar varios días)

## Envolvente de falla para arcilla de ensaye de corte directo drenado



# Interacción suelo – estructura y corte directo

En muchos casos de diseño de fundaciones y estructuras de retención, se necesita determinar el ángulo de fricción interna suelo-estructura (hormigón, acero o madera)



$$\tau_f = c_a + \sigma' \tan \delta$$

Siendo,

$c_a$  = adhesión,

$\delta$  = ángulo de fricción interna

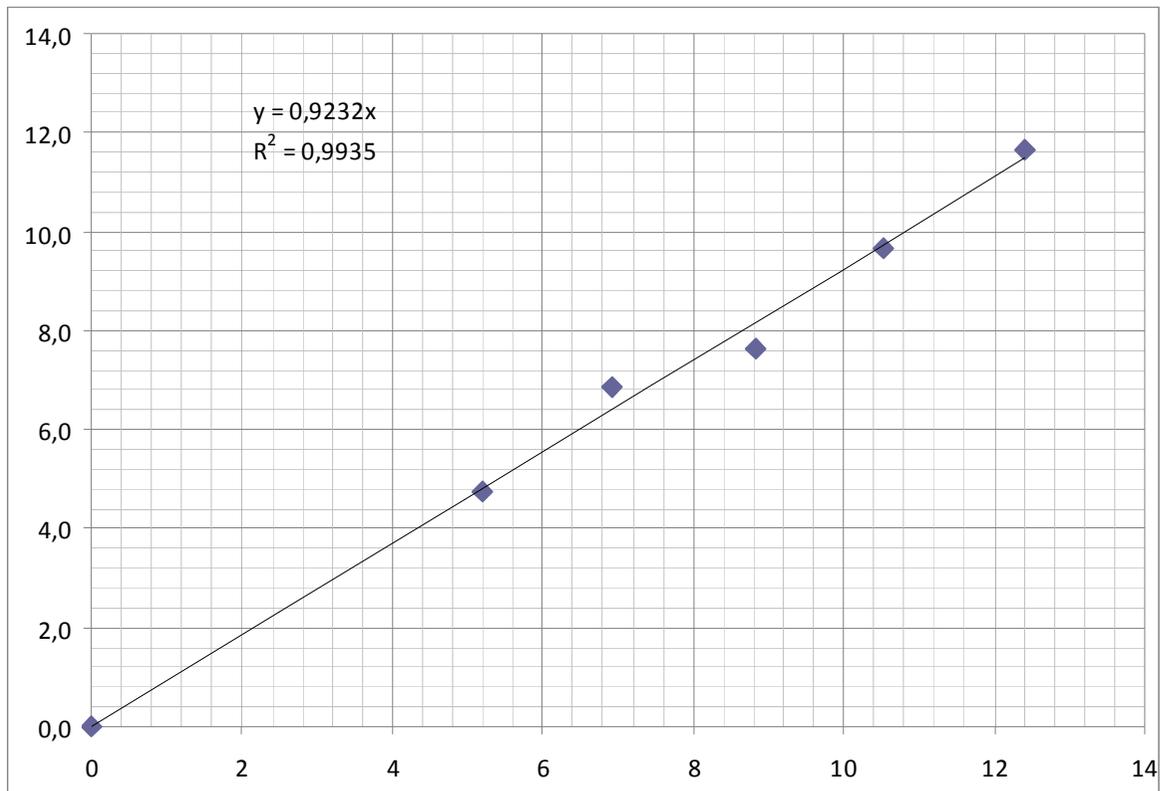
## Ventajas de equipo de Corte Directo

- ❑ Debido al reducido espesor de la probeta, se puede drenar rápidamente
- ❑ Puede ser empleado para determinar parametros de interfaces
- ❑ Probetas de arcilla pueden ser orientadas a lo largo de su plano de debilidad o un plano de falla identificado

## Desventajas de equipo de corte directo

- ❑ Falla ocurre a lo largo de un plano de falla predeterminado
- ❑ Area de la superficie de deslizamiento cambia a medida que transcurre el ensaye
- ❑ Distribución del esfuerzo de corte no uniforme a lo largo de la superficie de falla

# Resultado típico corte directo Probeta 60 x 60



# Equipos de corte directo



# Equipos corte directo

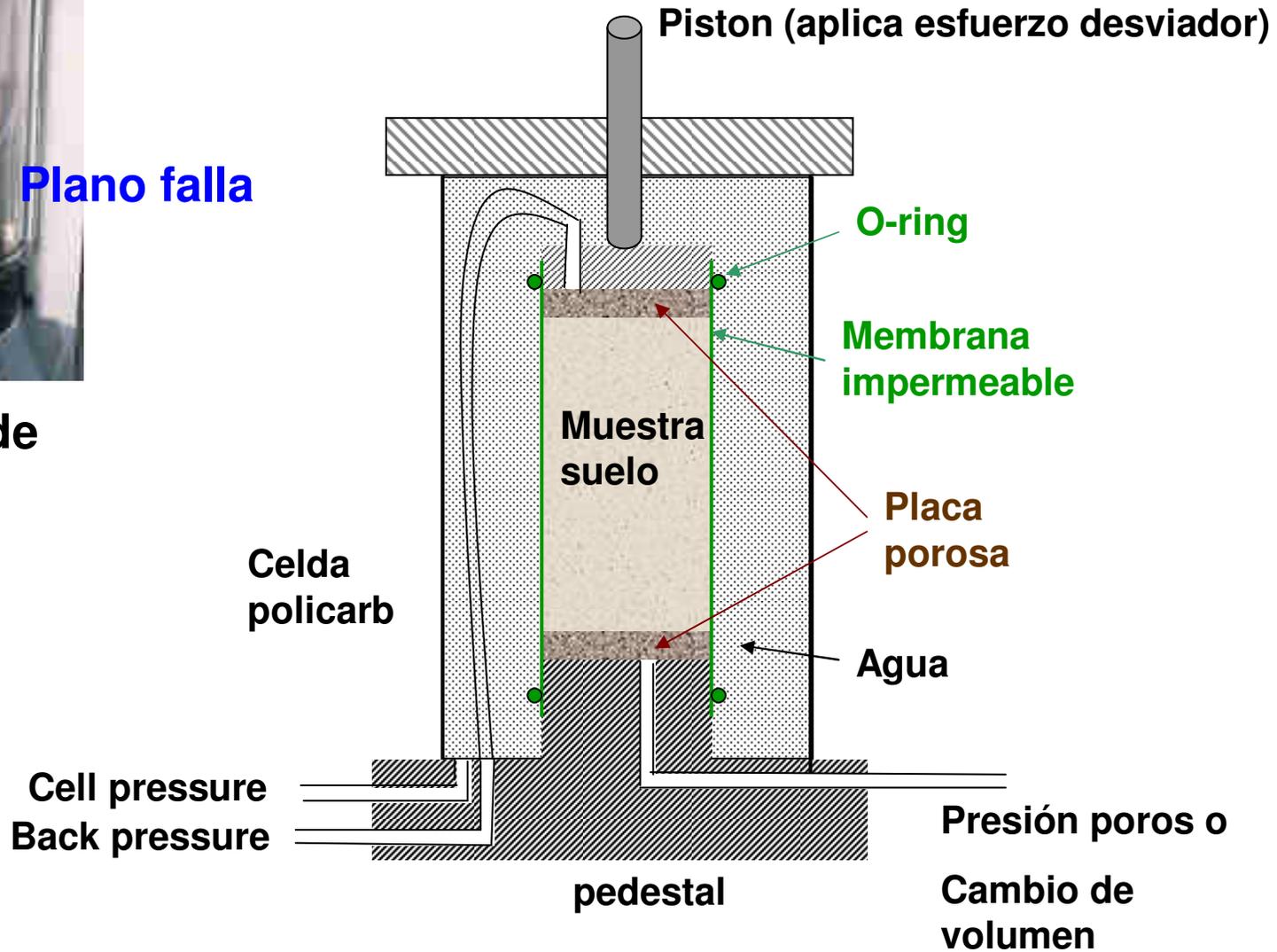


# Compresión Triaxial



Plano falla

Probeta de suelo en falla



# Ensaye Compresión Triaxial

Preparación probeta (muestra no perturbada)



**Tubo  
muestreador**



**Extractor muestras**

# Compresión Triaxial

Preparación probeta (muestra no perturbada)



Extremos son cortados y afinados



Colocación de la probeta en celda triaxial

# Compresión triaxial

## Preparación probeta (muestra no perturbada)



Probeta es cubierta con membrana de latex y sellada



La celda es llenada completamente de agua

# Compresión triaxial

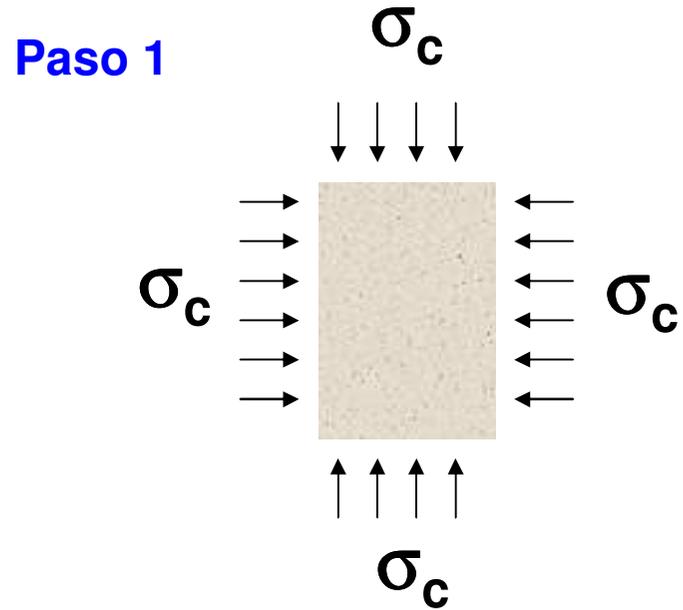
Preparación probeta (muestra no perturbada)



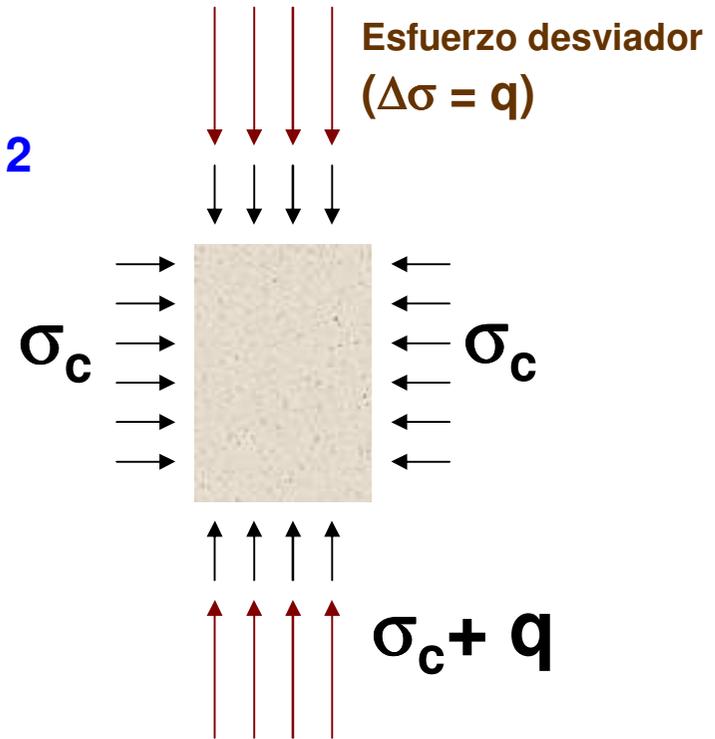
Anillo de carga para medir la carga desviadora

Dial deformaciones para medir desplazamiento vertical en algunos ensayos

# Tipos de Ensaye Triaxial



**Paso 2**



En toda la probeta presión de cámara  $\sigma_c$

Corte (carga)

¿Esta la válvula de drenaje abierta?

si

no

Probeta consolidada  
**C**onsolidated

Probeta No consolidada  
**U**nconsolidated

¿Esta la válvula de drenaje abierta?

si

no

Carga drenada  
**D**rained

Carga No drenada  
**U**ndrained

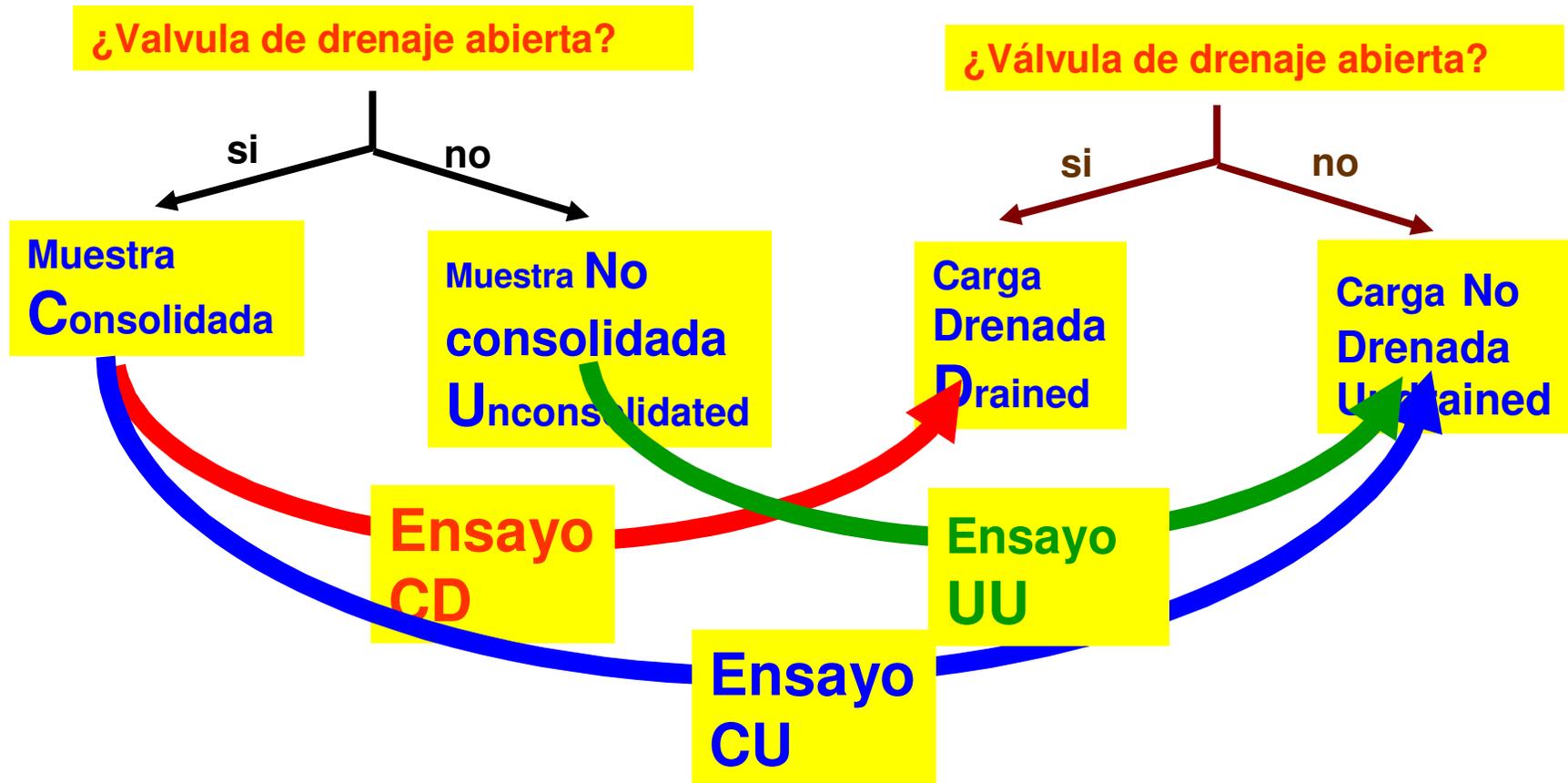
# Tipos de Ensayos Triaxiales

Paso 1

Paso 2

Presión cámara  $\sigma_c$

Corte (carga)



# Ensayo Consolidado- drenado (CD)

**Total,  $\sigma$**

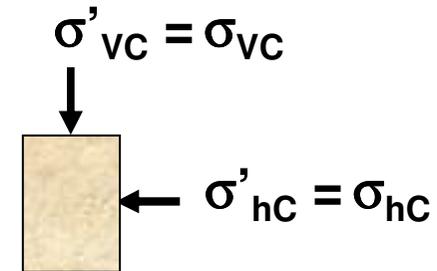
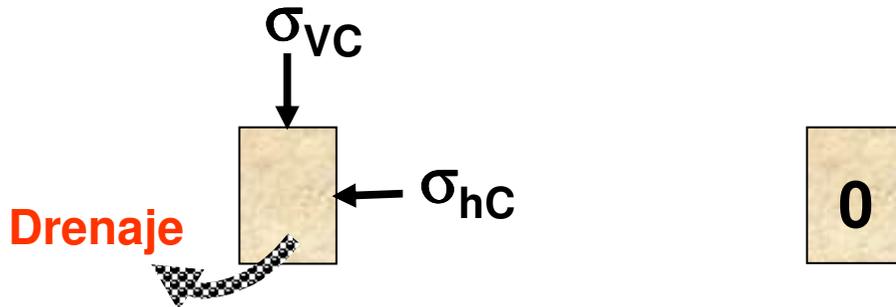
**=**

**Neutra,  $u$**

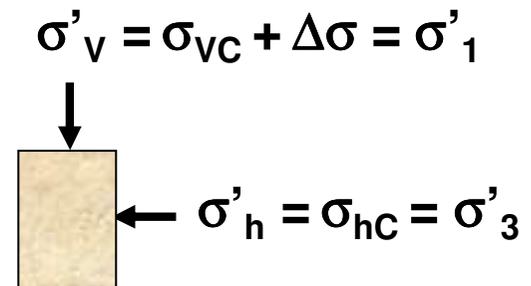
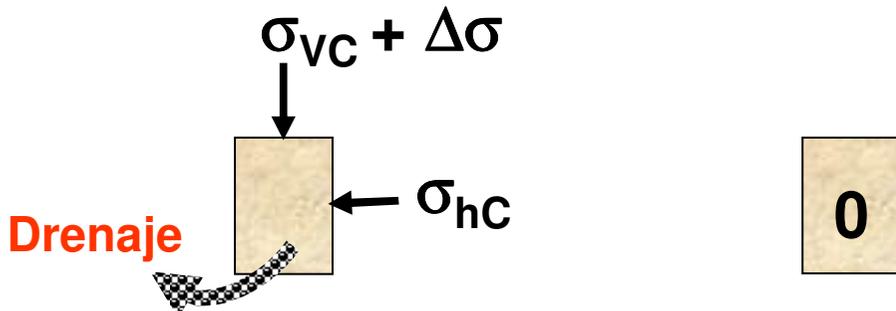
**+**

**Efectiva,  $\sigma'$**

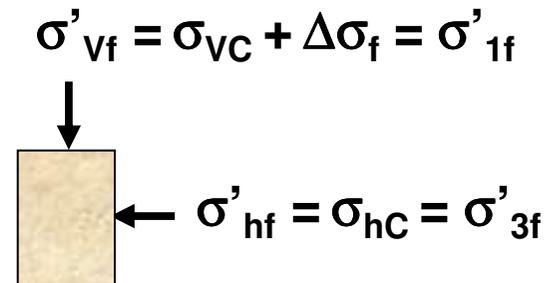
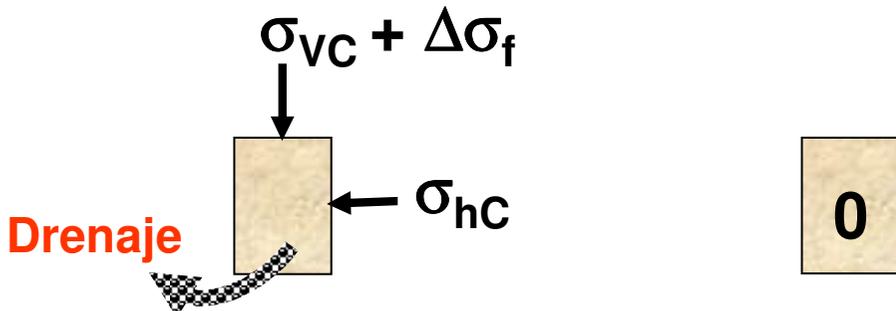
**Paso 1: Al termino de la consolidación**



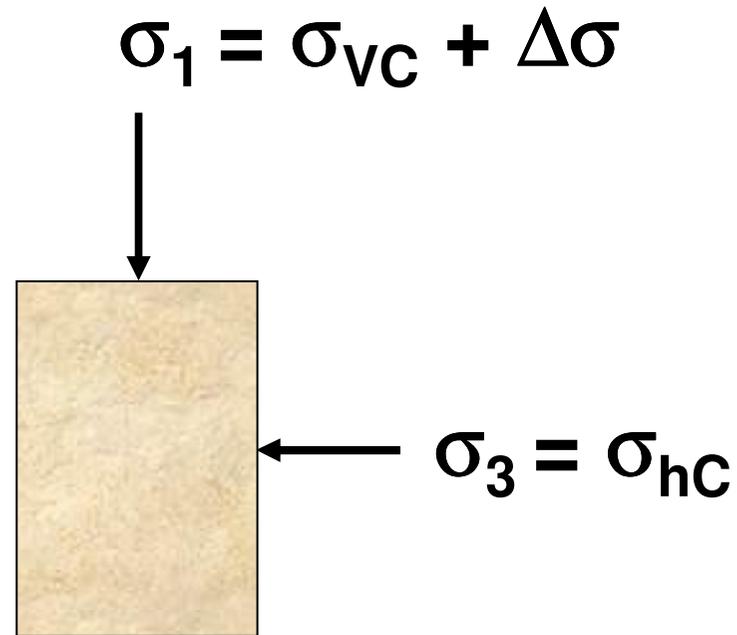
**Paso 2: Durante incremento esfuerzo axial**



**Paso 3: En falla**



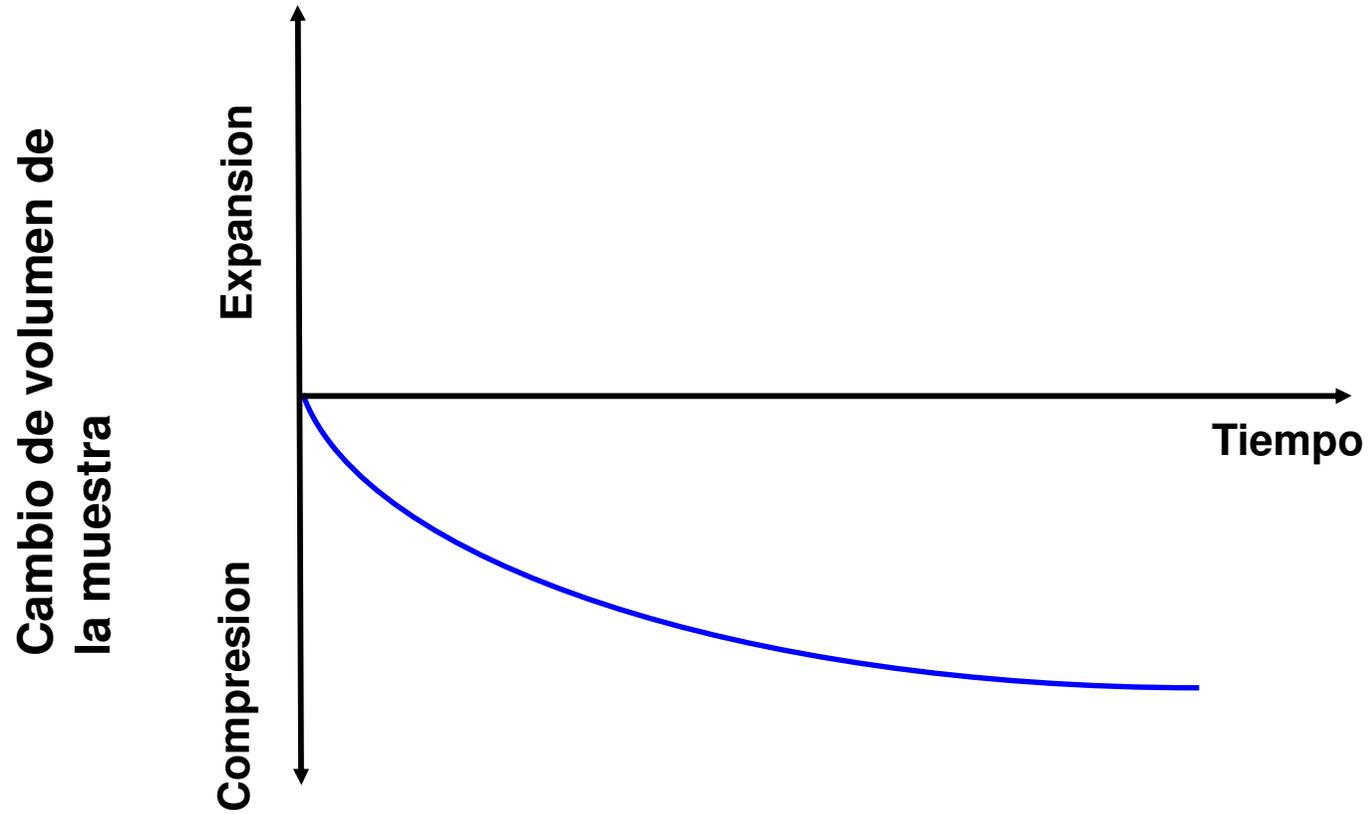
## Ensayo Consolidado - drenado(CD)



**Tensión Desviadora (q or  $\Delta\sigma_d$ ) =  $\sigma_1 - \sigma_3$**

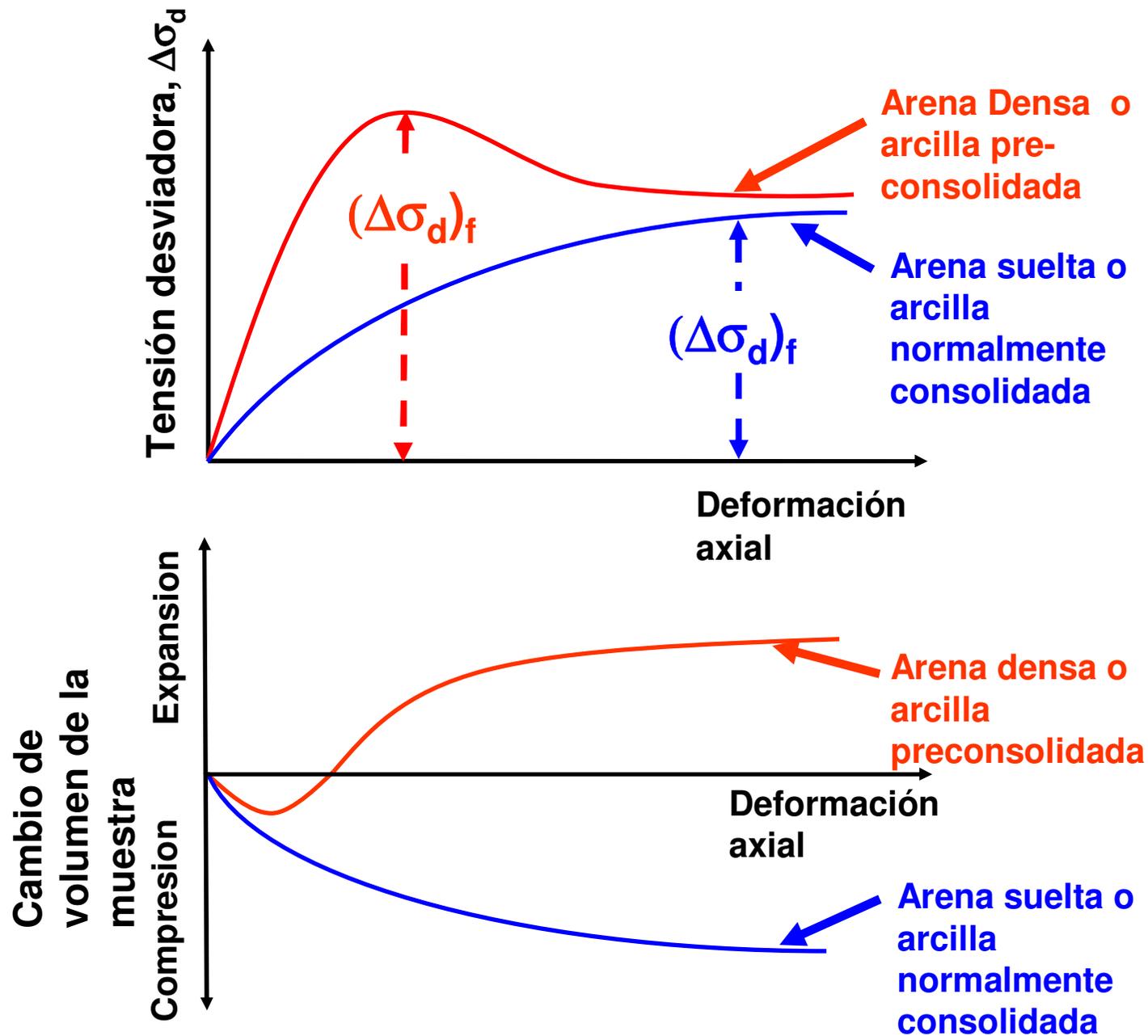
# Ensayo Consolidado - drenado (Ensayo CD)

Cambio de Volumen de muestra durante consolidación



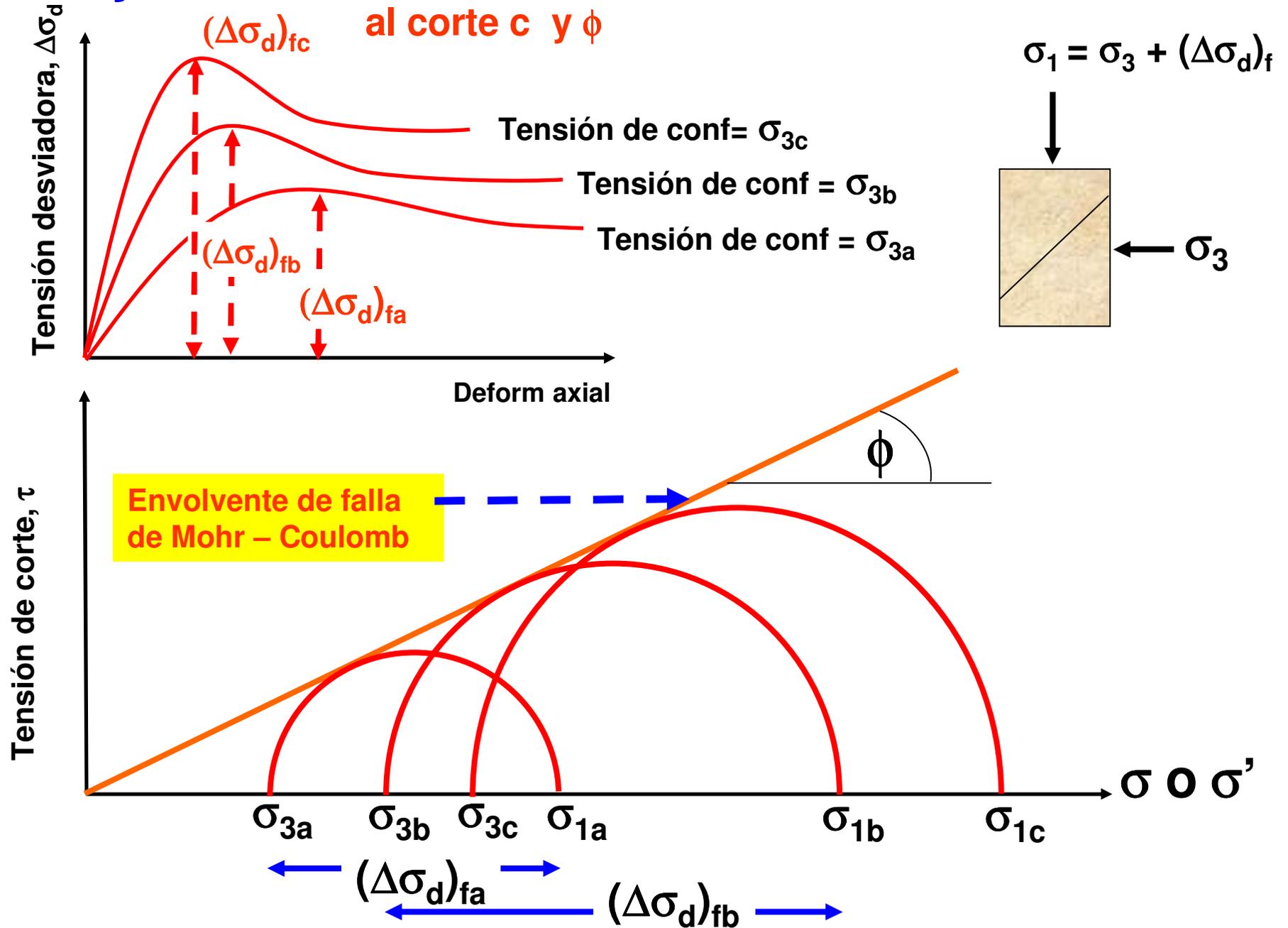
# Ensayo Consolidado- drenado (Ensayo CD)

## Relaciones tensión-deformación durante el corte



# Ensayos CD

Como determinar los parámetros de resistencia al corte  $c$  y  $\phi$



# Ensayos CD

Como  $u = 0$   $\Rightarrow$   $\sigma = \sigma'$

Luego  $c = c'$   $\Rightarrow$   $\phi = \phi'$

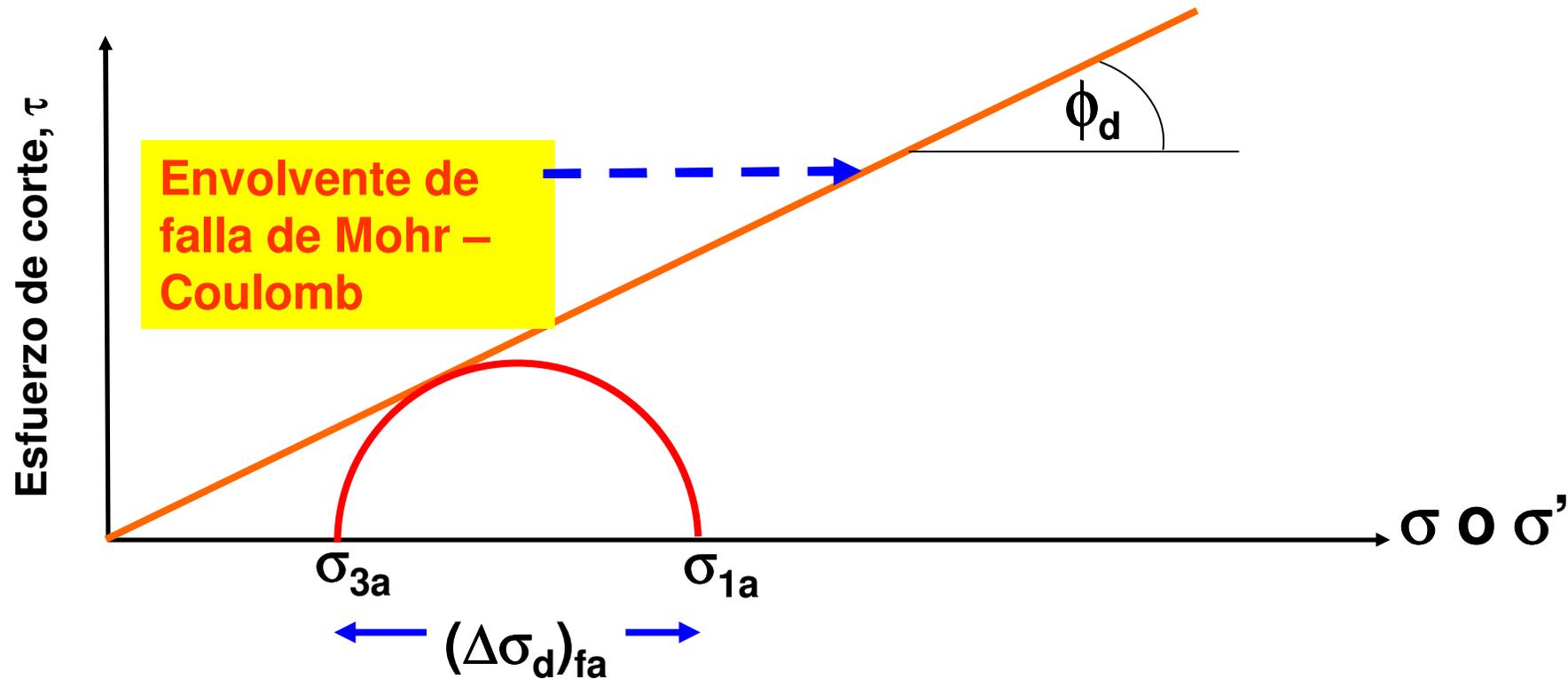
Se suelen denotar como  $c_d$  y  $\phi_d$

Arcillas Normalmente consolidadas se suelen denotar NC  
y las arcillas pre-consolidadas OC

# Ensayos CD

## Envolventes de falla

Para arenas y arcillas NC,  $c_d = 0$

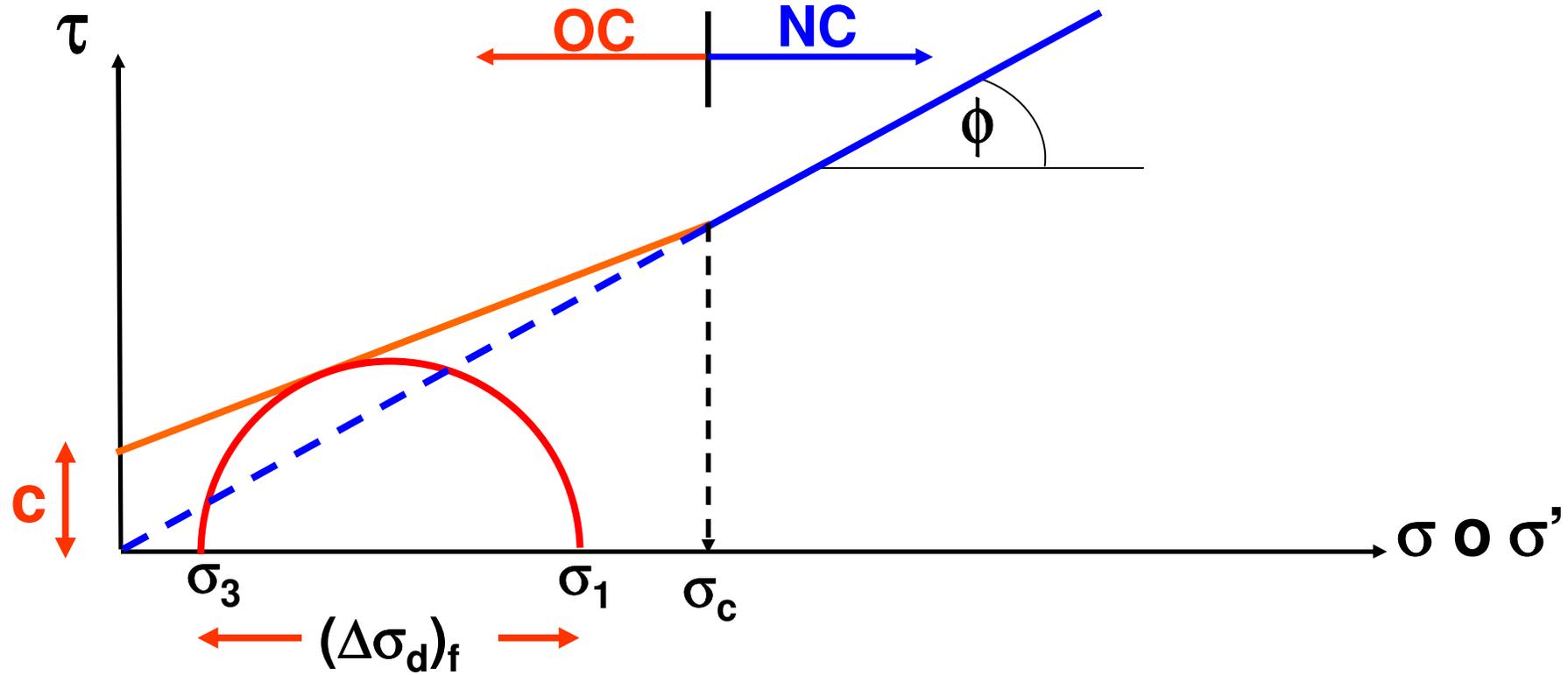


De allí, un ensayo CD podría ser suficiente para determinar  $\phi_d$  para arenas o arcillas NC

# Ensayos CD

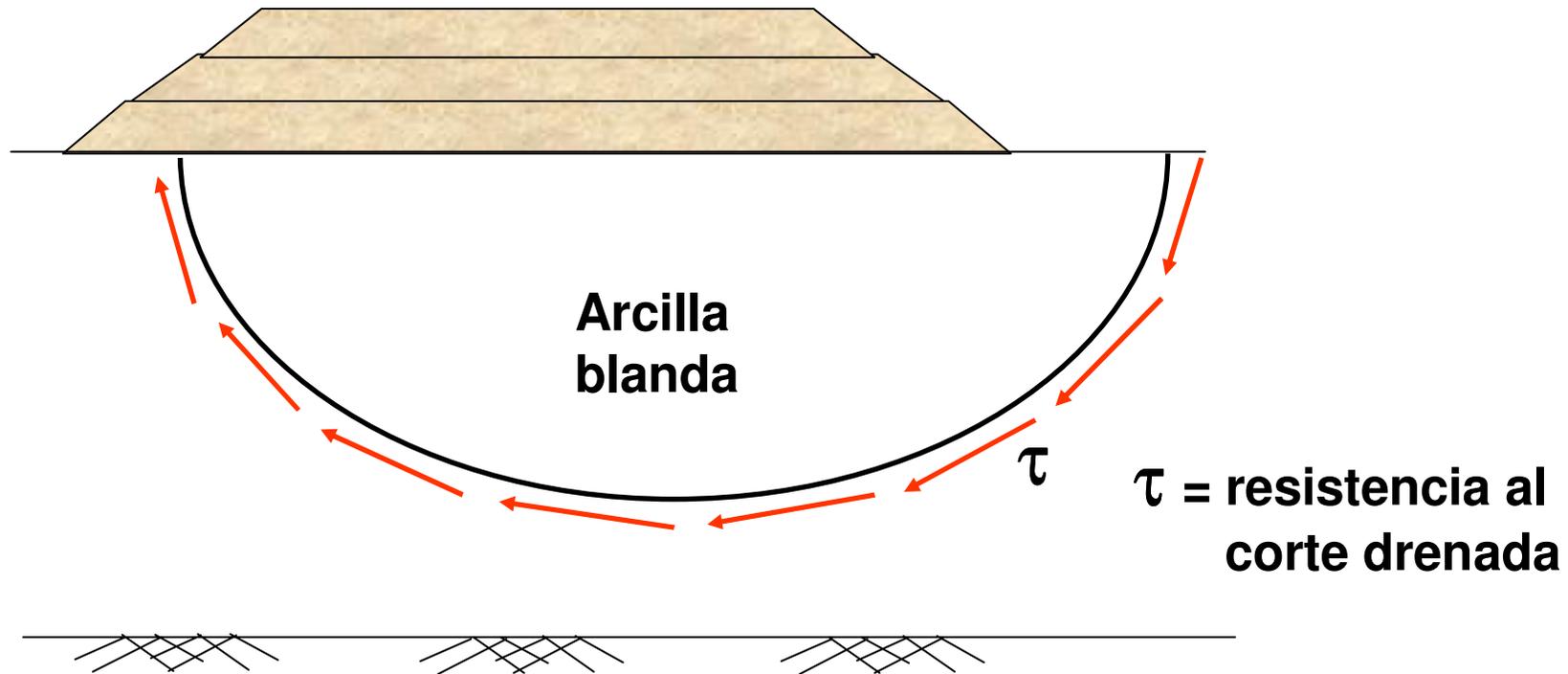
## Envolventes de falla

Para arcillas OC,  $c_d \neq 0$

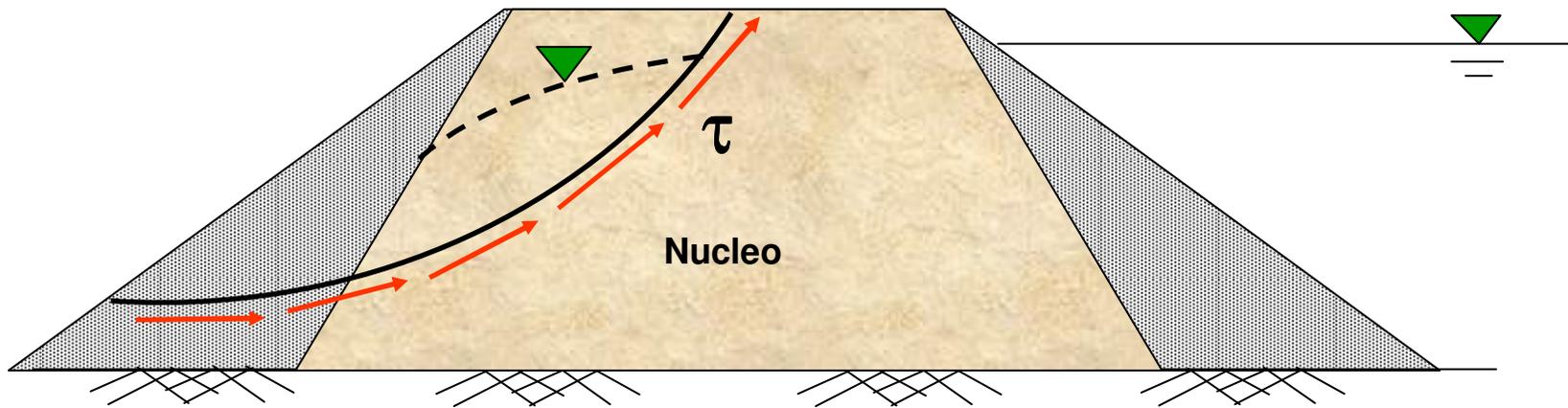


# Algunas aplicaciones practicas de análisis CD para arcillas

1. Terraplén construido muy lentamente, en niveles sobre una arcilla muy blanda

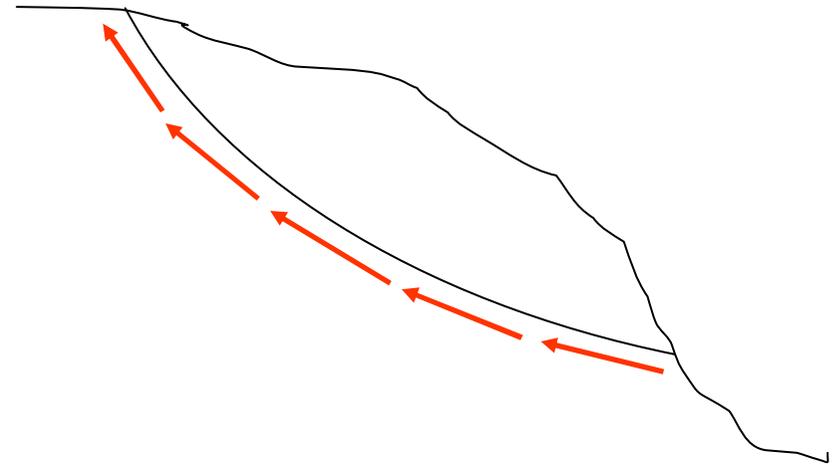
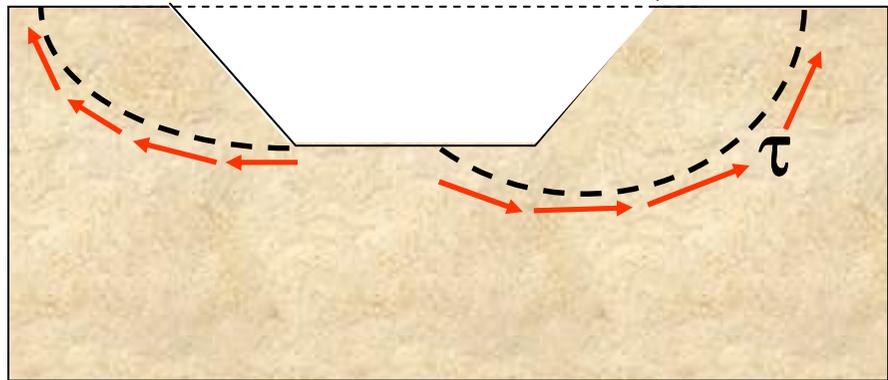


## 2. Presa de tierra con infiltración en régimen



$\tau$  = Resistencia al corte  
drenada de nucleo de  
arcilla

### 3. Excavación o talud natural en arcilla



$\tau$  = resistencia al corte drenada

Nota: ensayo CD simula la condición de largo plazo in situ. Así,  $c_d$  y  $\phi_d$  deben ser usadas para evaluar el comportamiento en el largo plazo del suelo

# Ensayo Consolidado- No drenado (Ensayo CU)

Total,  $\sigma$

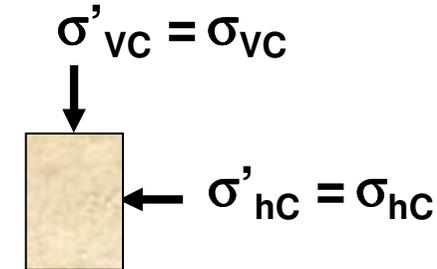
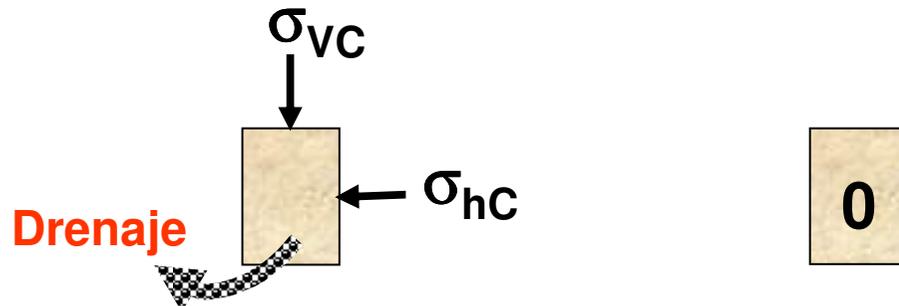
=

Neutra,  $u$

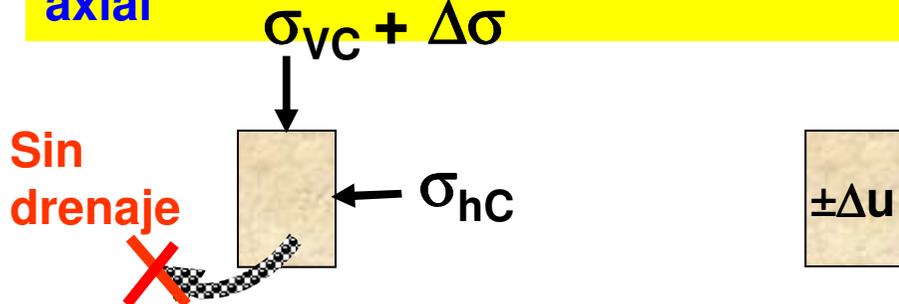
+

Efectiva,  $\sigma'$

Paso 1: Al final de consolidación



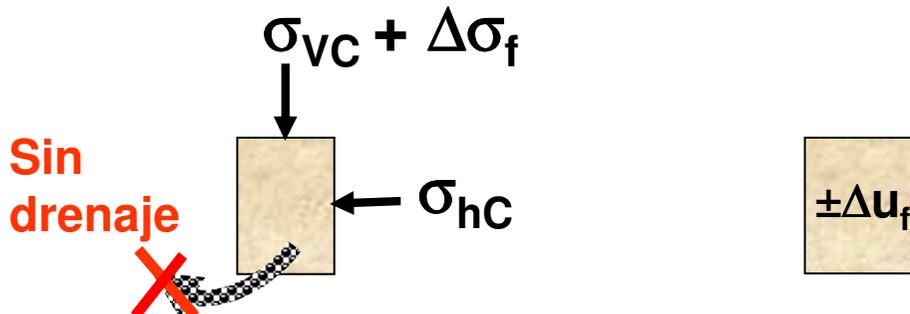
Paso 2: Durante incremento esfuerzo axial



$\sigma$   
 $\sigma'$   
 $u$

=

Paso 3: En la falla

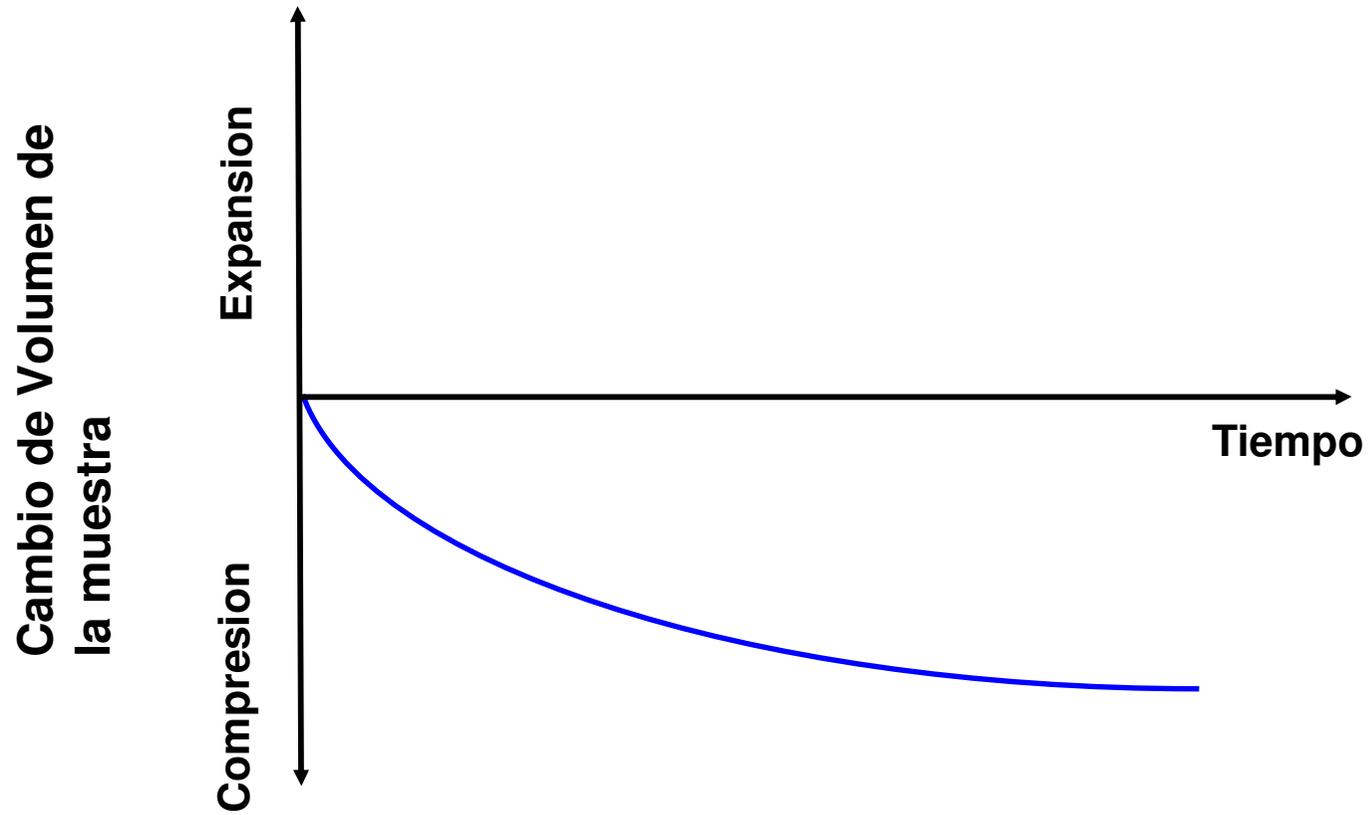


$\sigma$   
 $\sigma'$   
 $u$   
 $u_f$

=

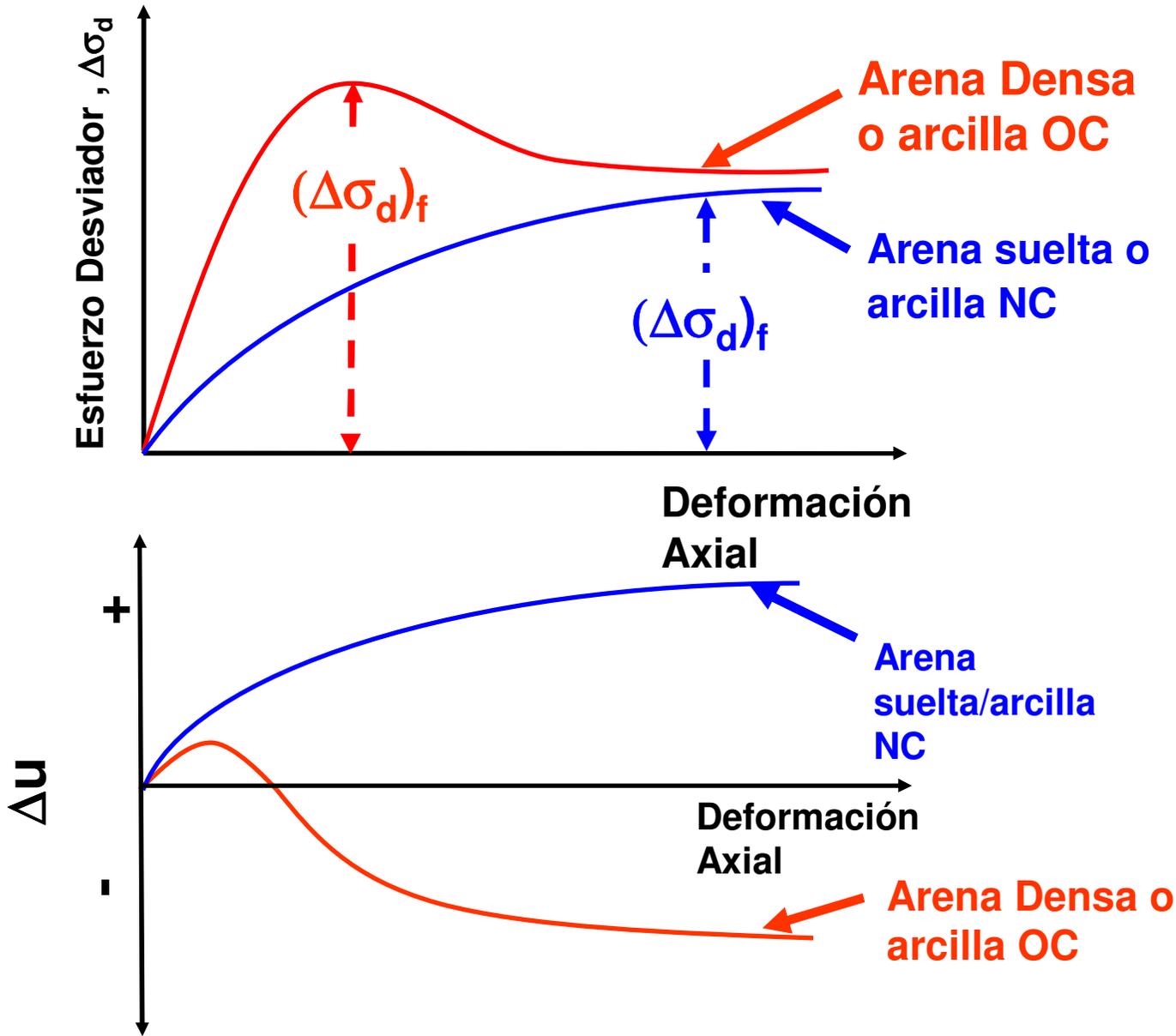
# Ensaye Consolidado – No Drenado (CU)

Cambia el Volumen de la muestra durante la consolidación



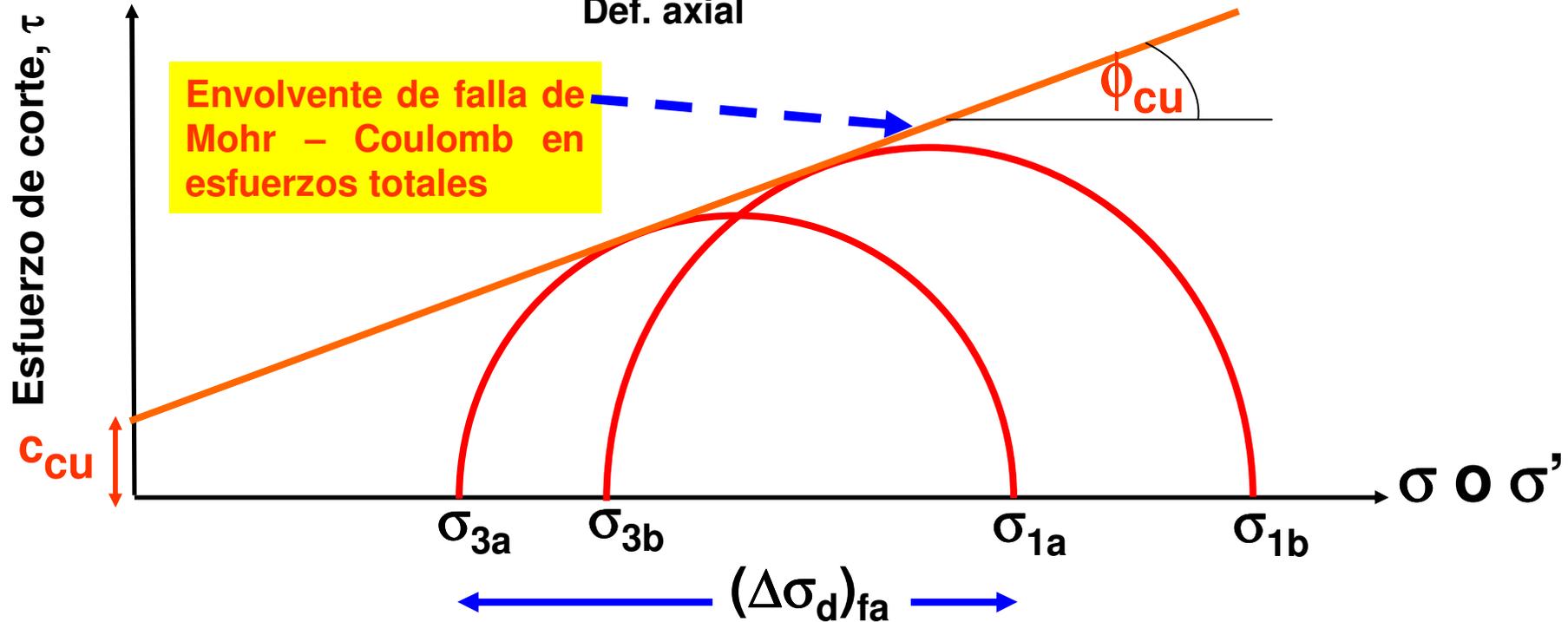
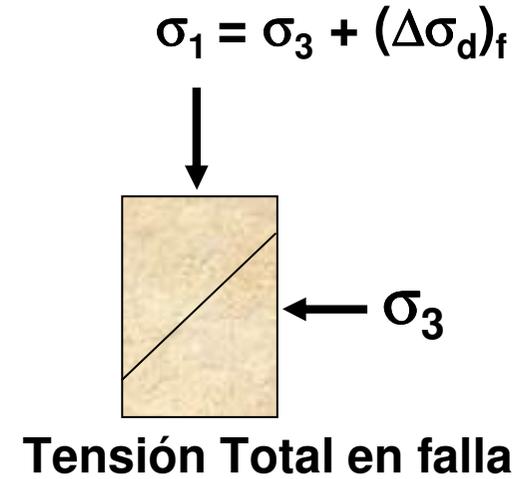
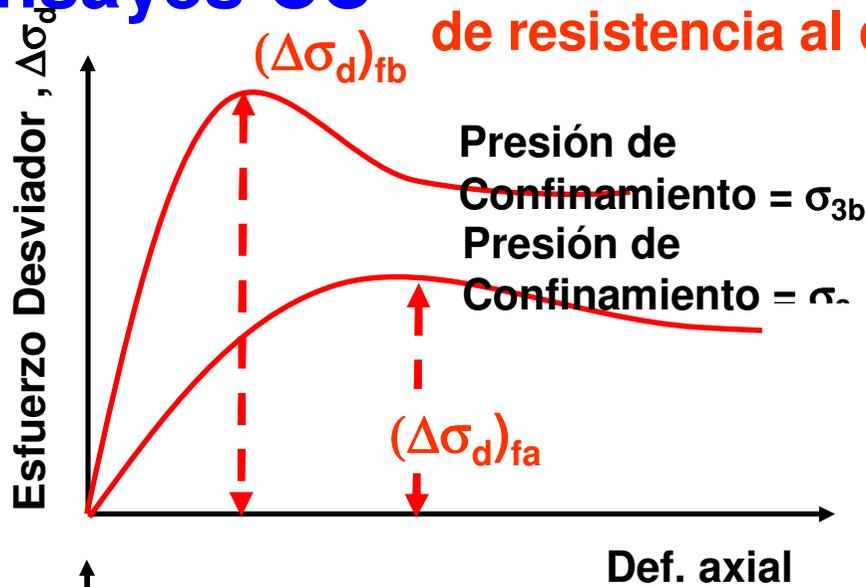
# Ensaye Consolidado- No drenado (CU)

## Relación tensión-deformación durante el corte



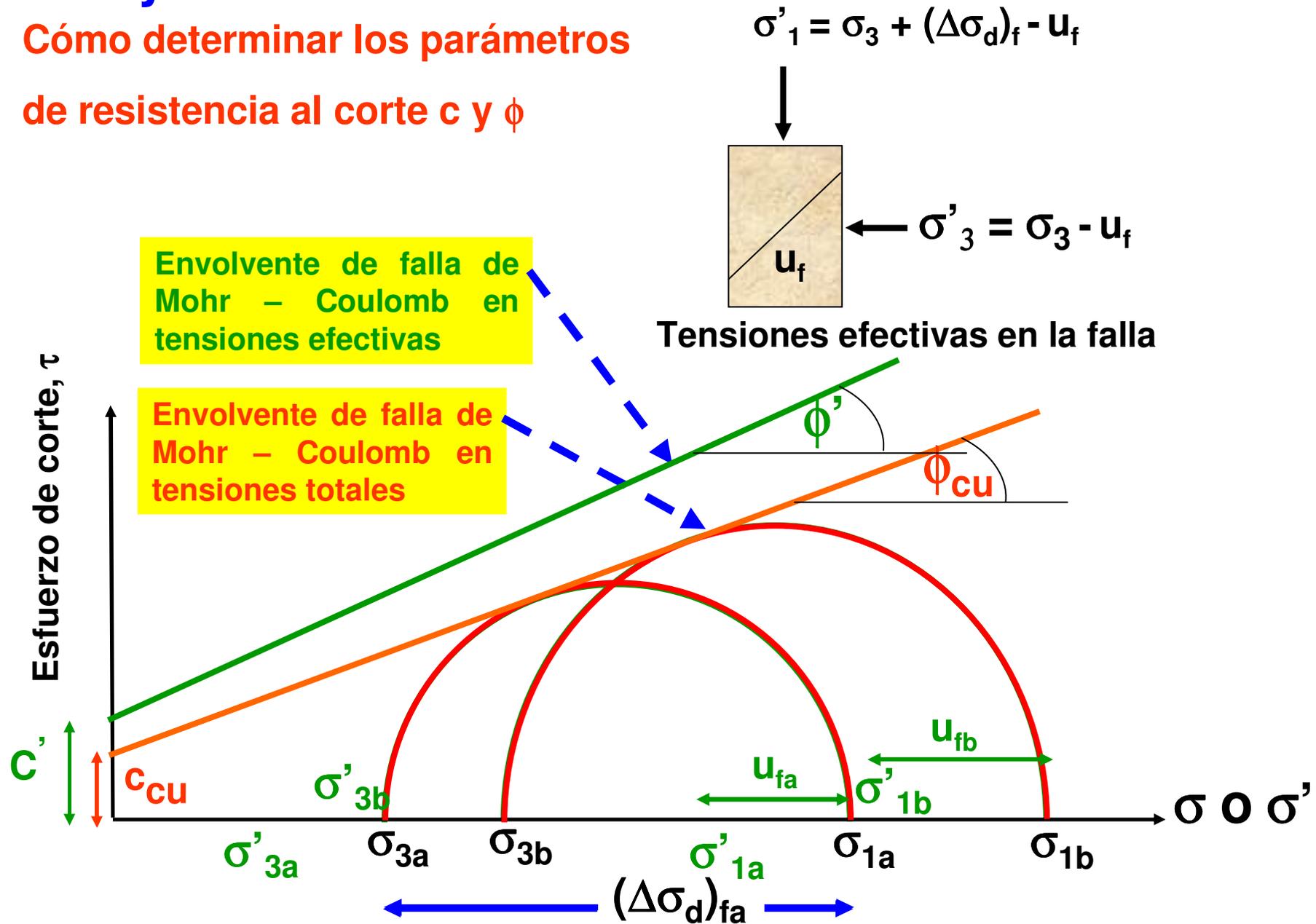
# Ensayes CU

Como determinar los parámetros de resistencia al corte  $c$  y  $\phi$



# Ensayes CU

Cómo determinar los parámetros de resistencia al corte  $c$  y  $\phi$

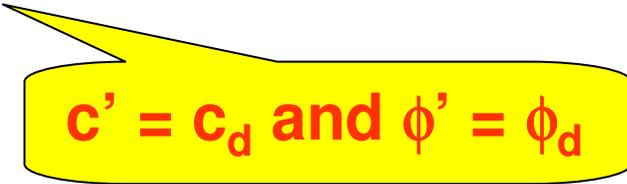


# Ensayes CU

Parámetros de  
resistencia al  
corte en  
terminos de  
tesniones  
totales  $C_{cu}$  y  $\phi_{cu}$

En terminos  
de tensiones  
efectivas  
son  $c'$  y  $\phi'$

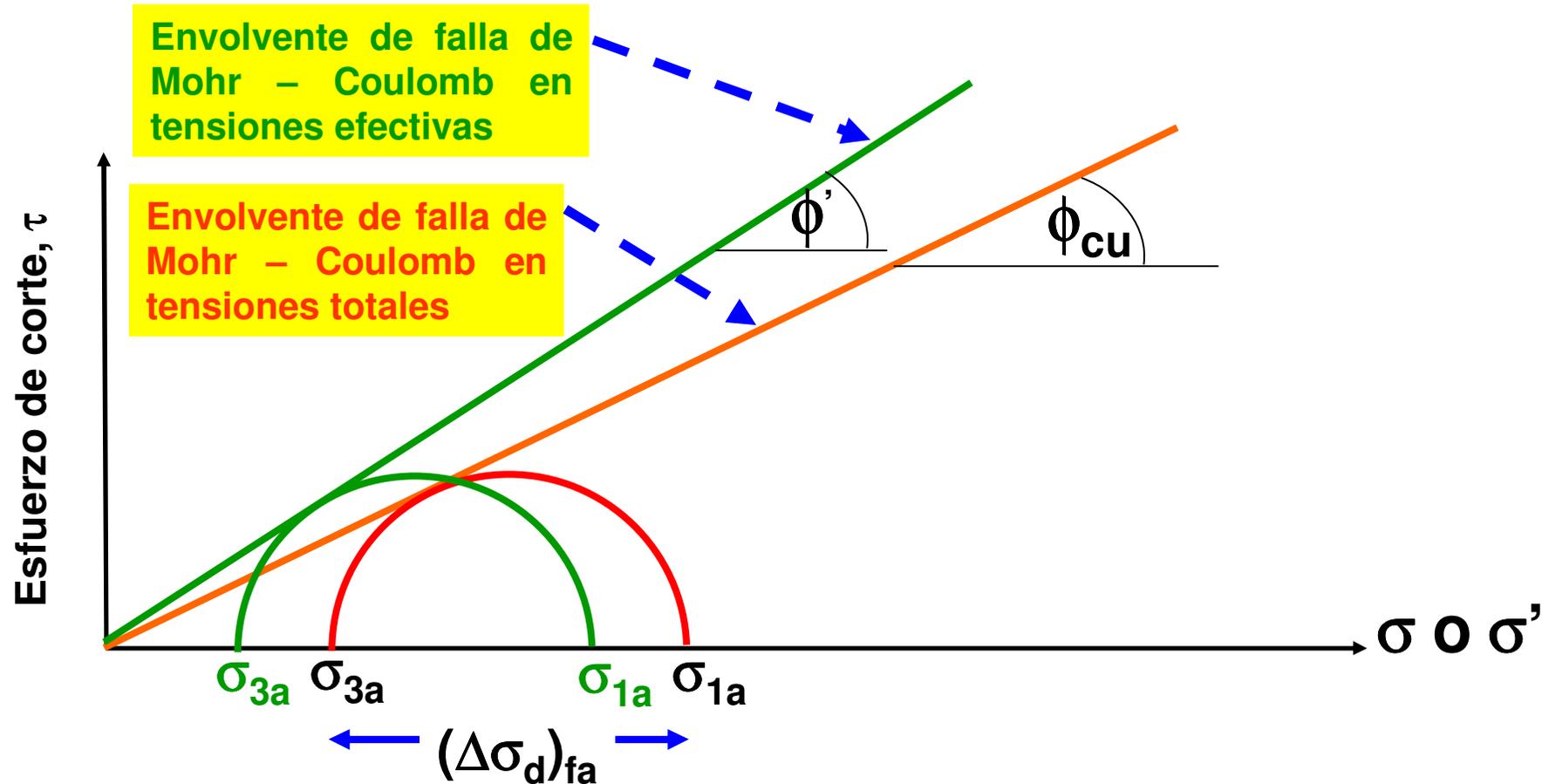
Luego


$$c' = c_d \text{ and } \phi' = \phi_d$$

# Ensayes CU

# Envolventes de falla

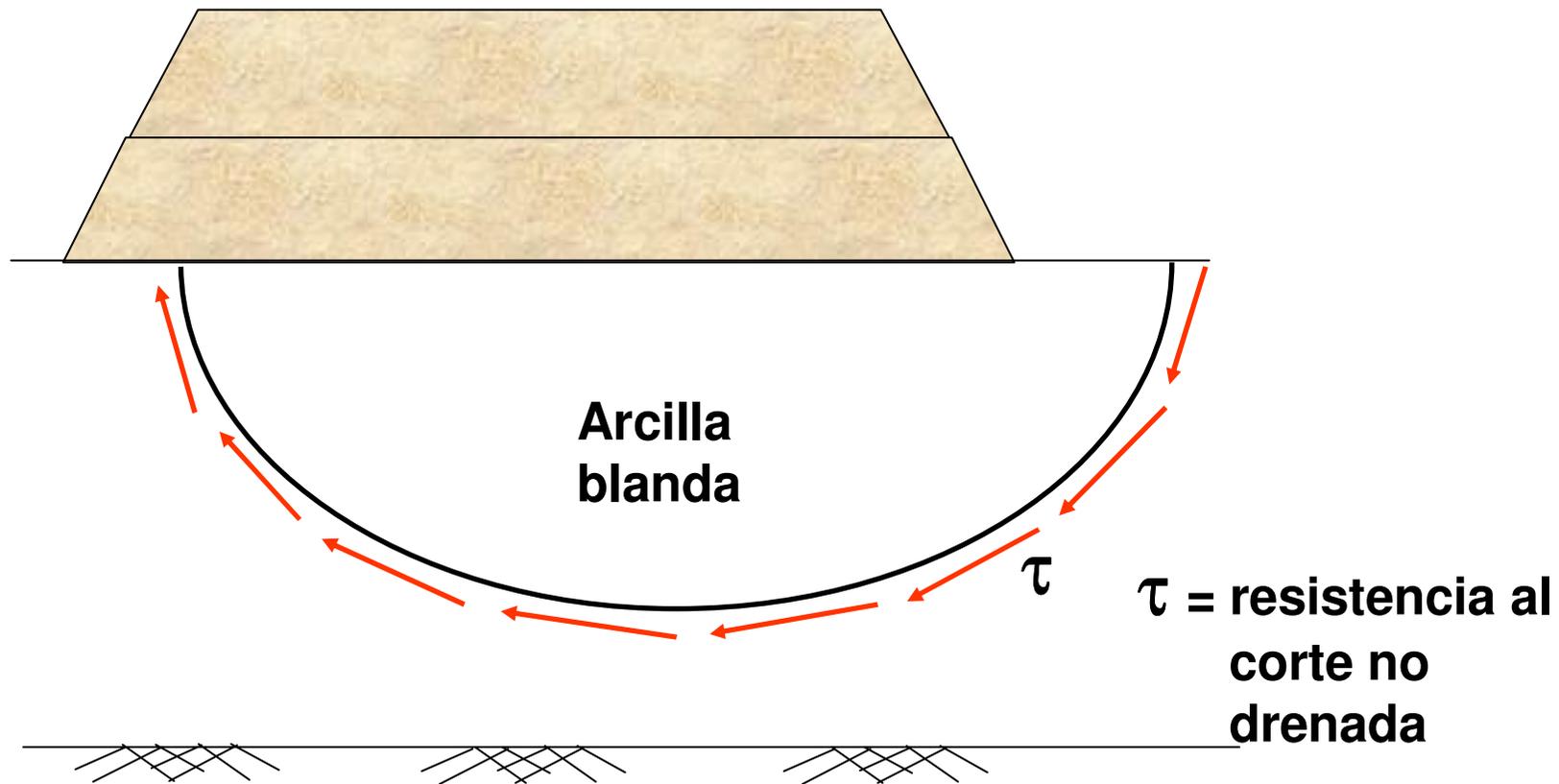
Para arenas y arcillas NC,  $c_{cu}$  y  $c' = 0$



De alli, un ensaye CU podría ser suficiente para determinar  $\phi_{cu}$  y  $\phi' (= \phi_d)$  en arenas o arcillas NC

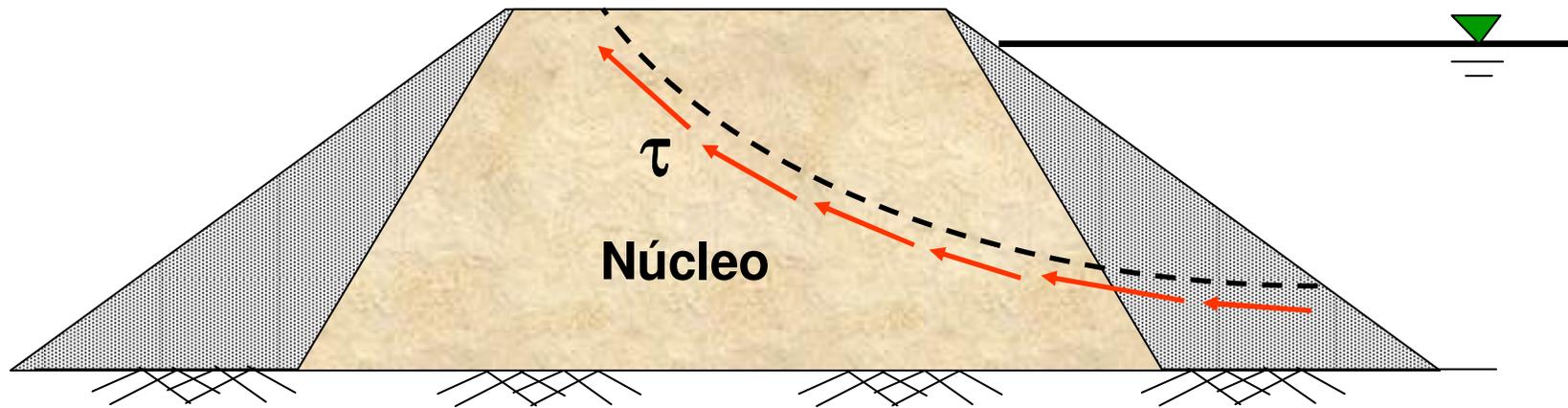
# Algunas aplicaciones prácticas de análisis CU para arcillas

## 1. Terraplen construido rápidamente sobre depósito de arcilla blanda



# Algunas aplicaciones prácticas de análisis CU para arcillas

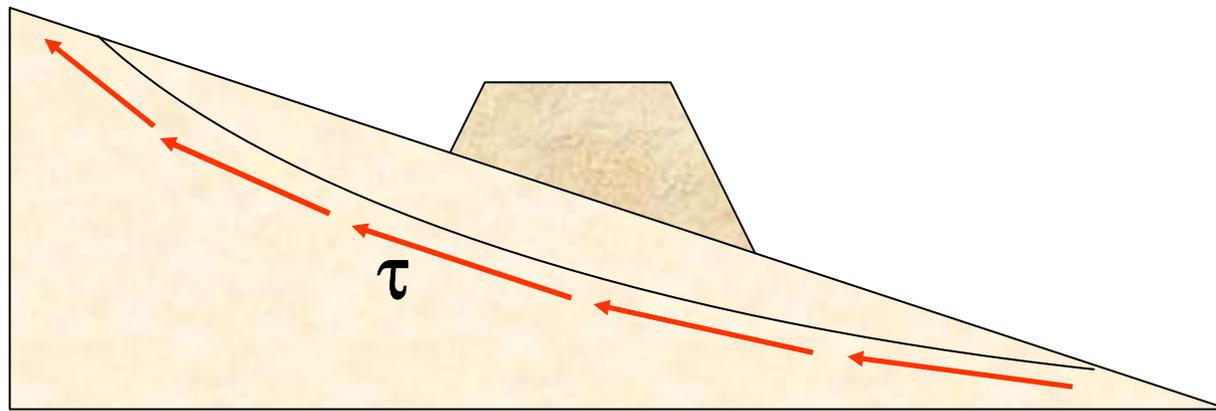
## 2. Vaciado rápido de embalse con presa de tierra



$\tau$  = Resistencia al corte  
no drenada de arcilla  
del núcleo

# Algunas aplicaciones prácticas de análisis CU para arcillas

## 3. Construcción rápida de terraplén sobre ladera natural



$\tau$  = Resistencia al corte no drenada

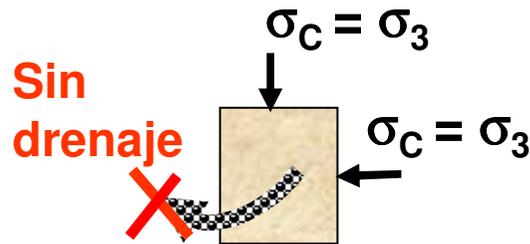
Nota: Parametros en tensiones totales de ensayos CU ( $c_{cu}$  y  $\phi_{cu}$ ) pueden ser usados para problemas de estabilidad, donde

Suelos han llegado a consolidarse y están en equilibrio con el estado de esfuerzos existentes; Luego, por alguna razón se aplican rápidamente esfuerzos adicionales lo que ocurre sin drenaje

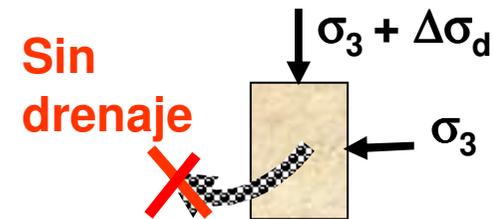
# Ensaye No consolidado No Drenado (ensaye UU)

## Analisis de datos

Condición Inicial probeta



Condición probeta durante corte



Volumen inicial de la probeta =  $A_0 \times H_0$

Volumen de la probeta durante corte =  $A \times H$

Como el ensaye es efectuado bajo condición no drenada,

$$A \times H = A_0 \times H_0$$

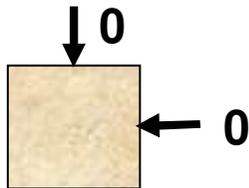
$$A \times (H_0 - \Delta H) = A_0 \times H_0$$

$$A \times (1 - \Delta H/H_0) = A_0$$

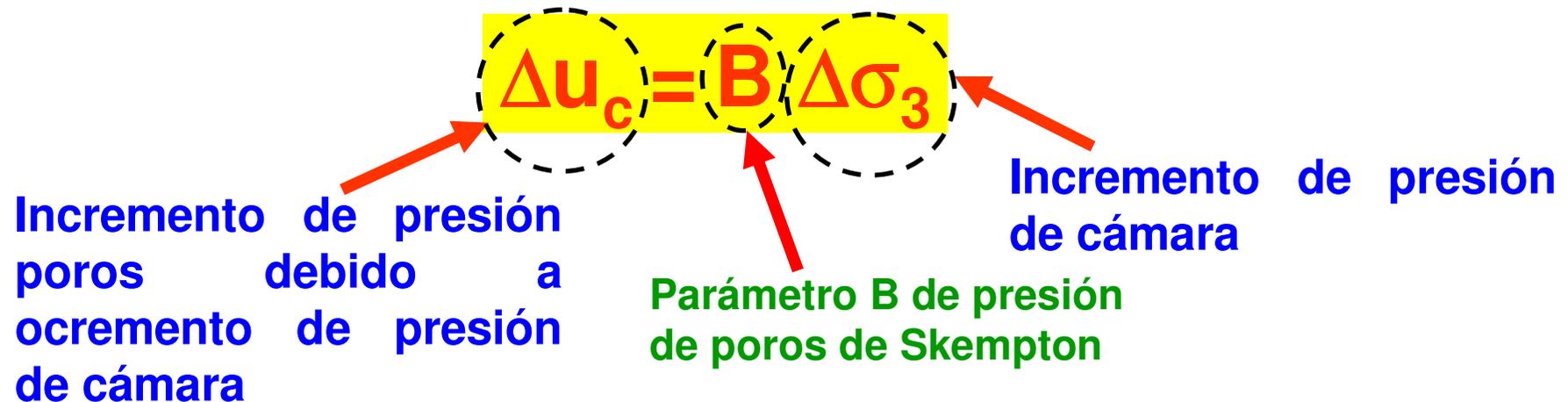
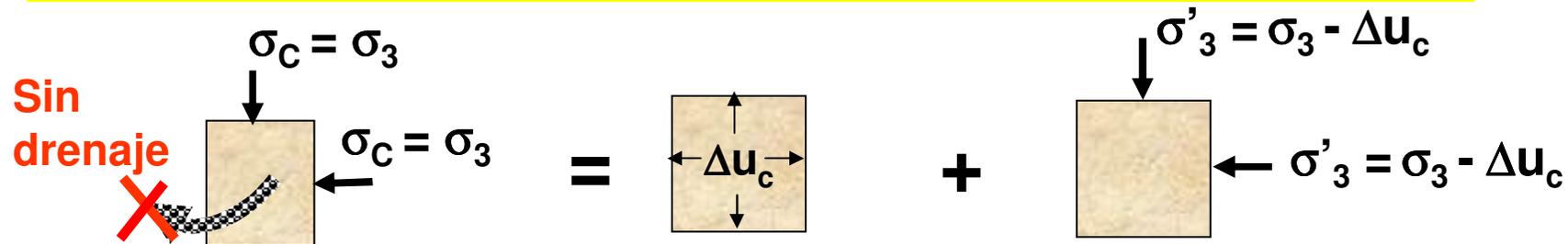
$$A = \frac{A_0}{1 - \varepsilon_z}$$

# Ensayo No Consolidado No Drenado (Ensayo UU)

## Paso 1: Inmediatamente despues del muestreo



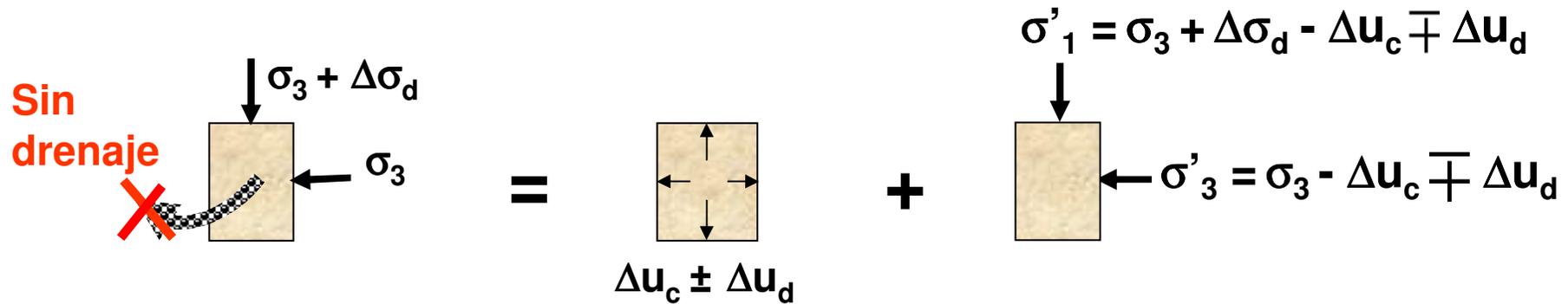
## Paso 2: Despues aplicación presión de cámara hidrostática



**Nota: Si el suelo está completamente saturado , entonces  $B = 1$  (de allí,  $\Delta u_c = \Delta \sigma_3$ )**

# Ensayo No Consolidado No Drenado (Ensayo UU)

## Paso 3: Durante aplicación de carga axial



$$\Delta u_d = AB \Delta \sigma_d$$

Incremento de presión de poros debido a incremento del esfuerzo desviador

Incremento del esfuerzo desviador

Parametro A de presión de poros de Skempton

## Ensayo No Consolidado No Drenado (Ensayo UU)

Combinando pasos 2 y 3,

$$\Delta u_c = B \Delta \sigma_3$$

$$\Delta u_d = AB \Delta \sigma_d$$

Incremento total de presión de poros en cualquier etapa,  $\Delta u$

$$\Delta u = \Delta u_c + \Delta u_d$$

$$\Delta u = B [\Delta \sigma_3 + A \Delta \sigma_d]$$

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

Ecuación de presión de poros de Skempton

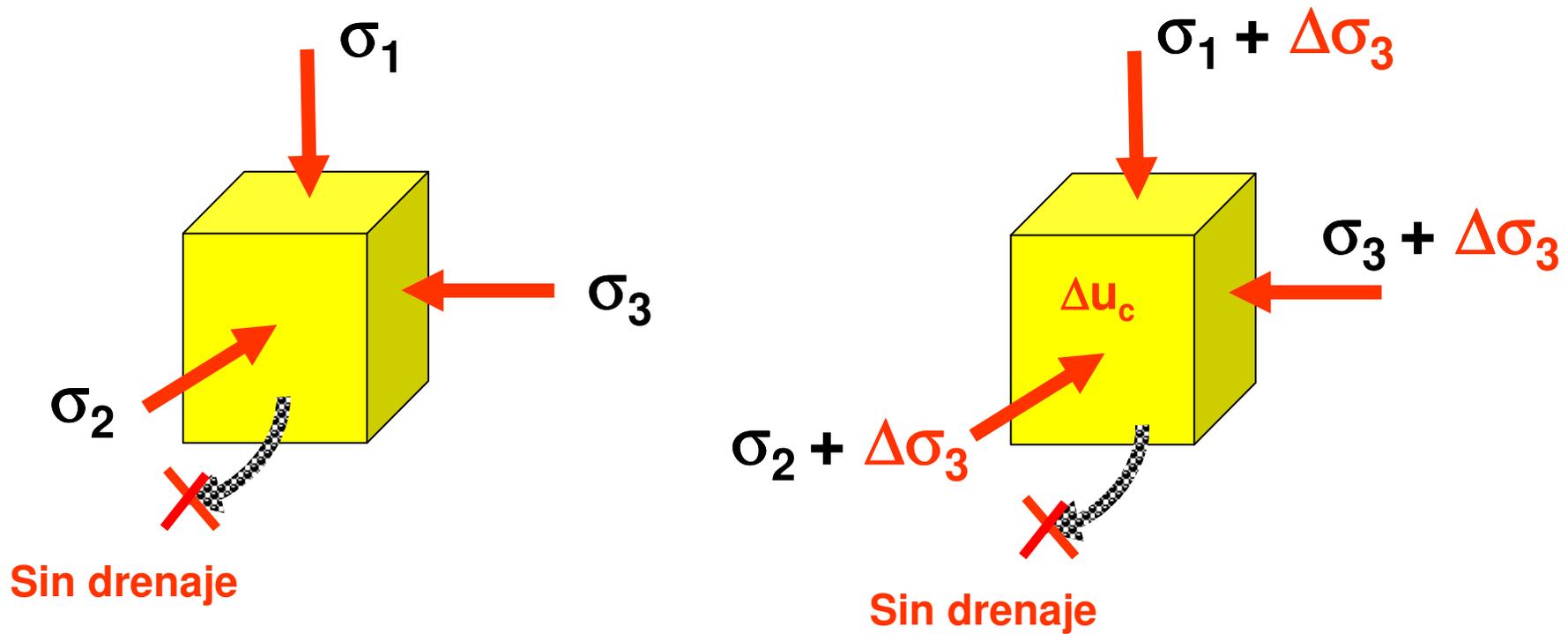
## Ensaye No Consolidado No Drenado (Ensaye UU)

Derivación de ecuación de presión de poros de Skempton



# Derivación de ecuación de presión de poros de Skempton

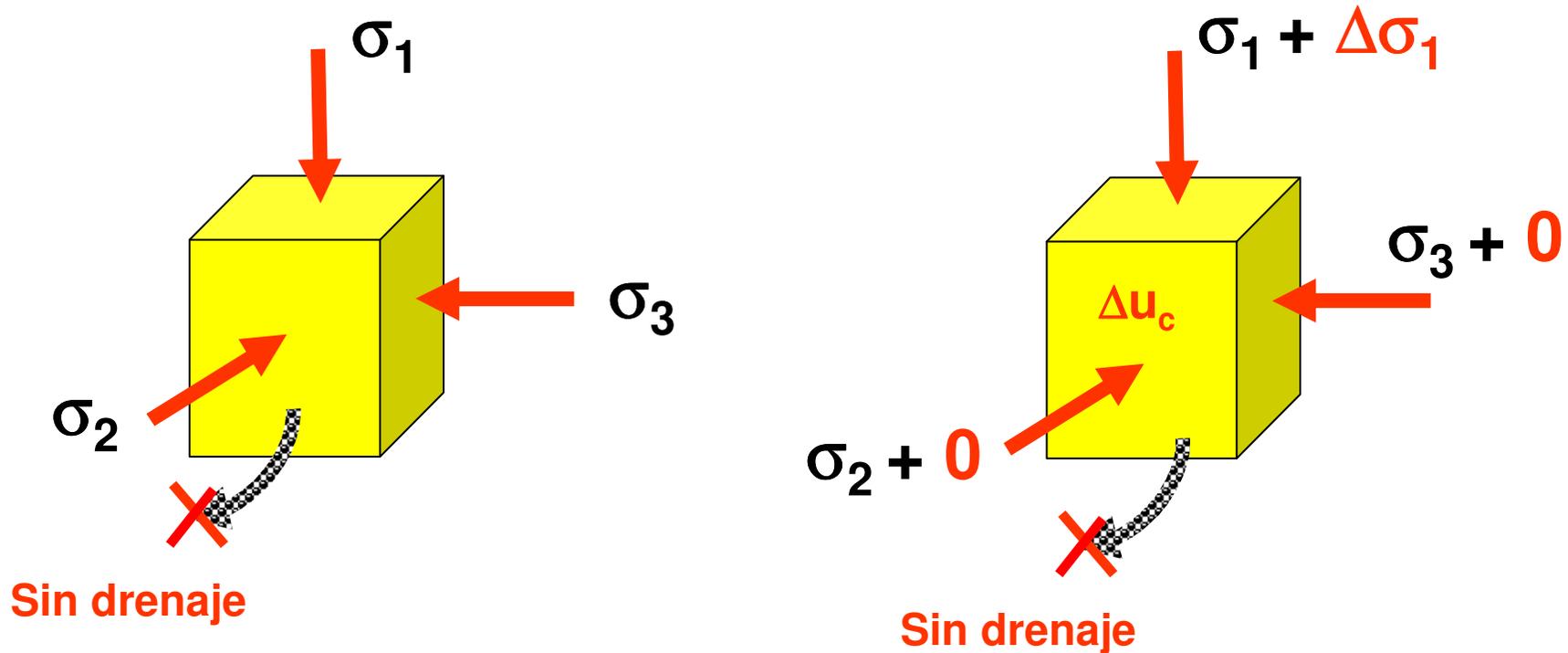
Paso 1 :Incremento de tensiones isotropicas



Incremento de presión efectiva en cada dirección =  $\Delta\sigma_3 - \Delta u_c$

# Derivación de la ecuación de presión de poros de Skempton

## Paso 2 :Incremento de esfuerzo principal mayor

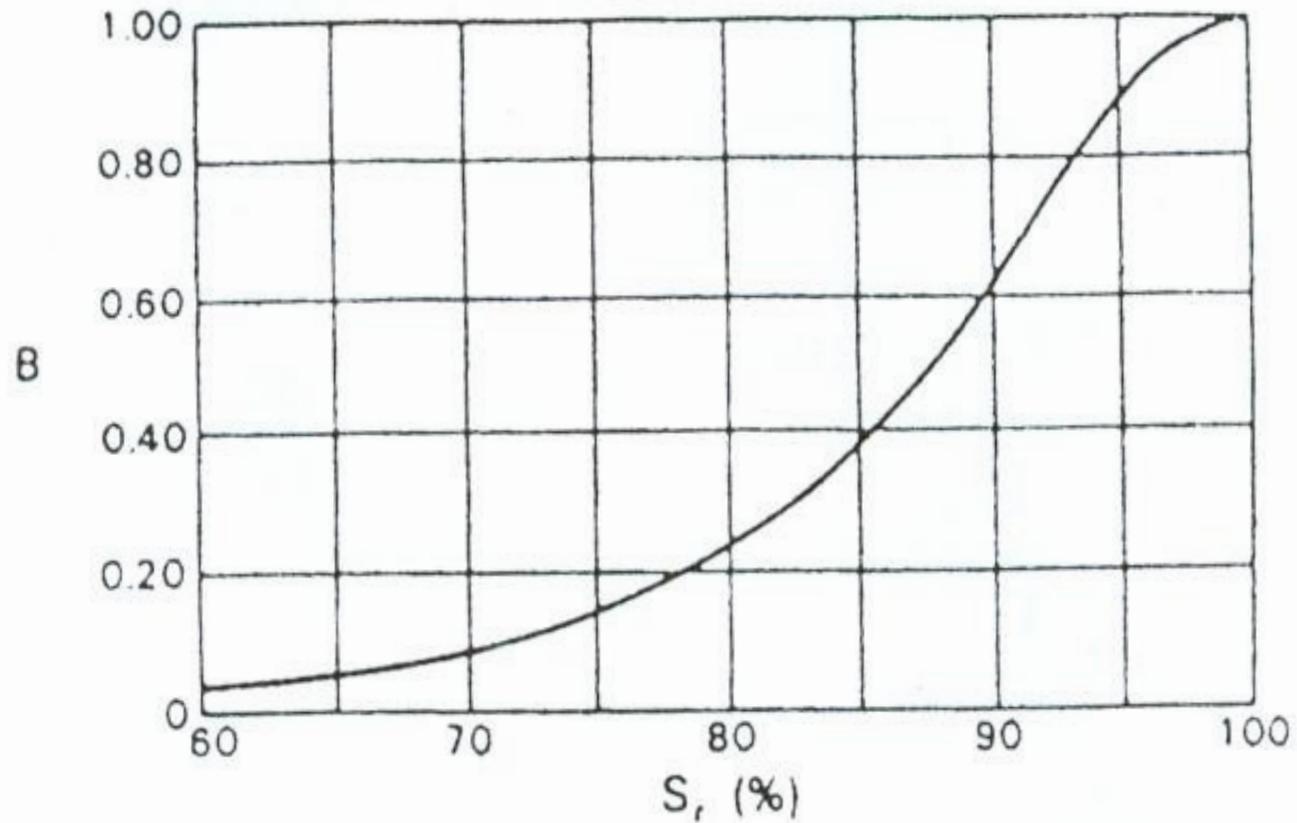


Incremento de tensión efectiva en dirección  $\sigma_1 = \Delta\sigma_1 - \Delta u_d$

Incremento en tensión efectiva en direcciones  $\sigma_2$  y  $\sigma_3 = 0 - \Delta u_d$

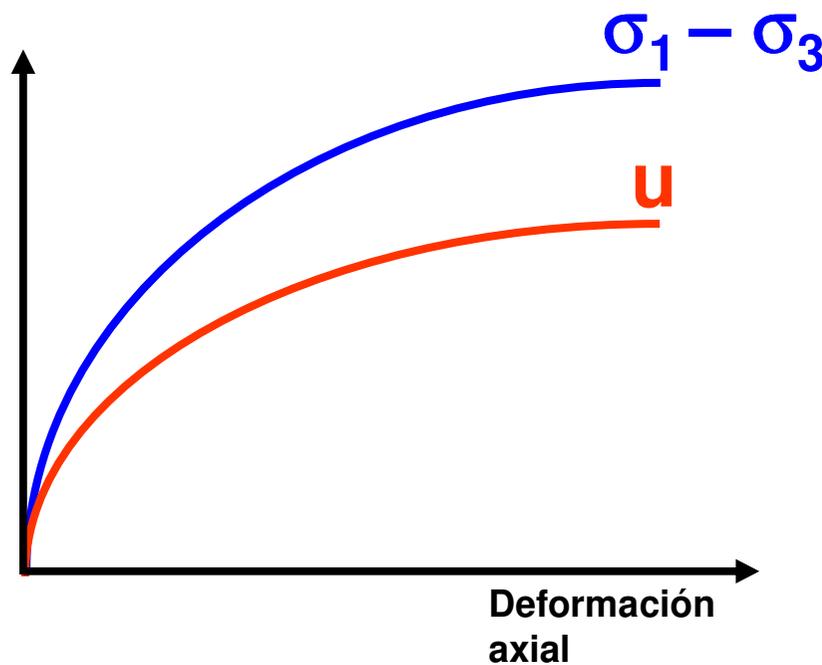
Incremento medio en tensión efectiva =  $(\Delta\sigma_1 - \Delta u_d - \Delta u_d - \Delta u_d)/3$

## Valores típicos del parámetro **B**



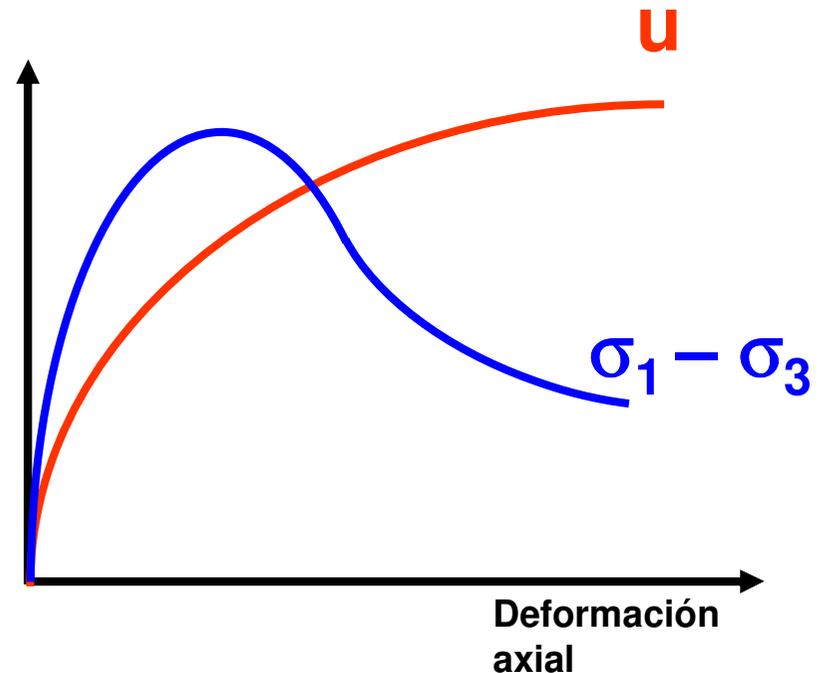
Typical relationship between  $B$  and degree of saturation.

## Valores Típicos del parámetro **A**



Arcilla NC (baja sensibilidad)

( $A = 0.5 - 1.0$ )



Arcilla NC (Alta sensibilidad)

( $A > 1.0$ )

En arcillas altamente sensitivas puede ocurrir colapso de la estructura de suelos debido a la generación de altas presiones de poros

## SENSIBILIDAD DE ARCILLAS

Muchas arcillas pierden parte de su resistencia y rigidez cuando son remoldeadas, debido a la reorientación de partículas a posiciones menos favorables. Terzaghi la definió como la razón entre la resistencia no perturbada y la resistencia perturbada. Suele emplearse el ensaye de compresión no confinada.

Skempton - Bjerrum

Sensibilidad

Clasificación

<2

Insensible

2-4

Moderadamente sensible

4-8

**Sensible**

8-16

Muy sensible

16-32

Levemente rápida

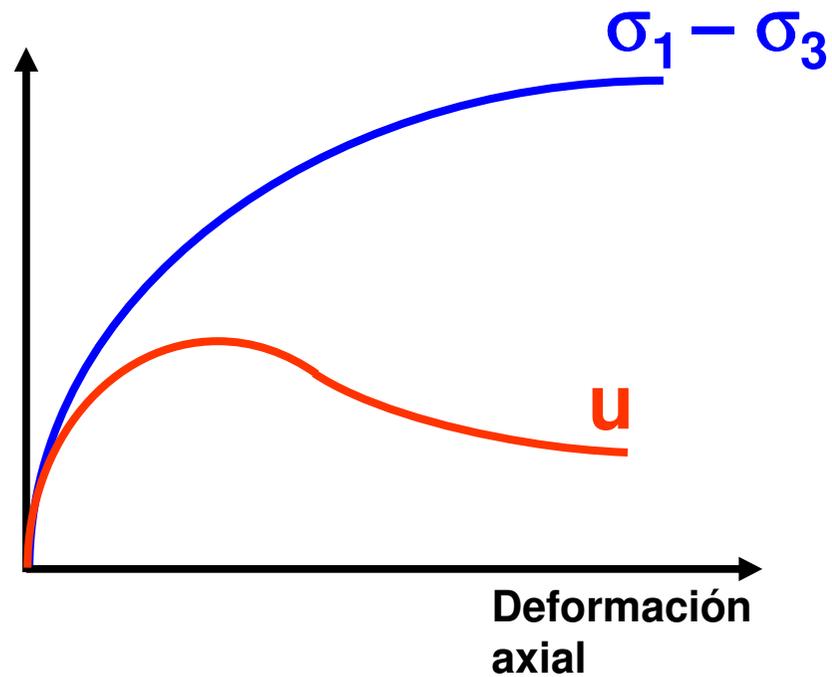
32-64

Mediana rapidez

>64

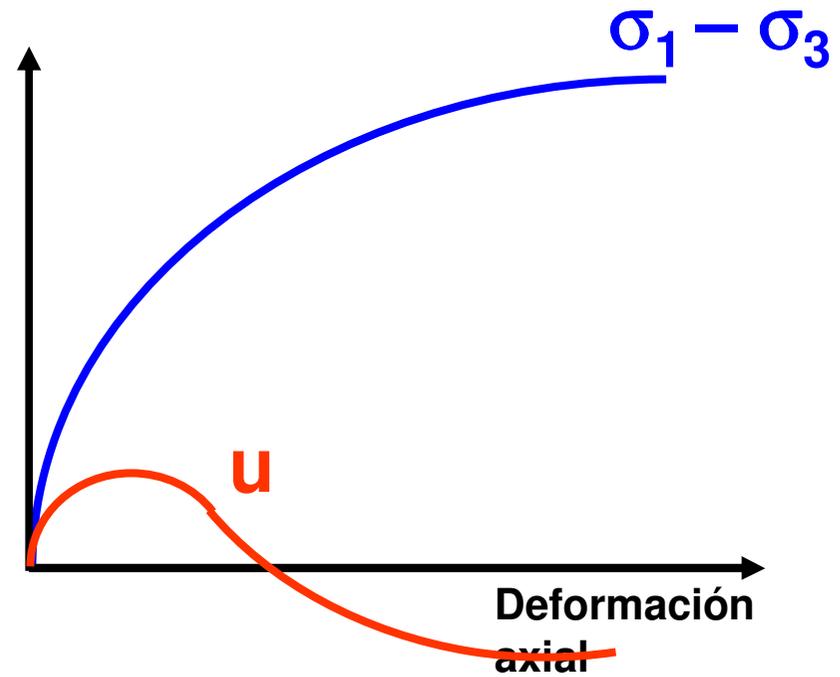
rápida

## Valores típicos de parámetro $A$



Arcilla OC (preconsolidación leve)

( $A = 0.0 - 0.5$ )

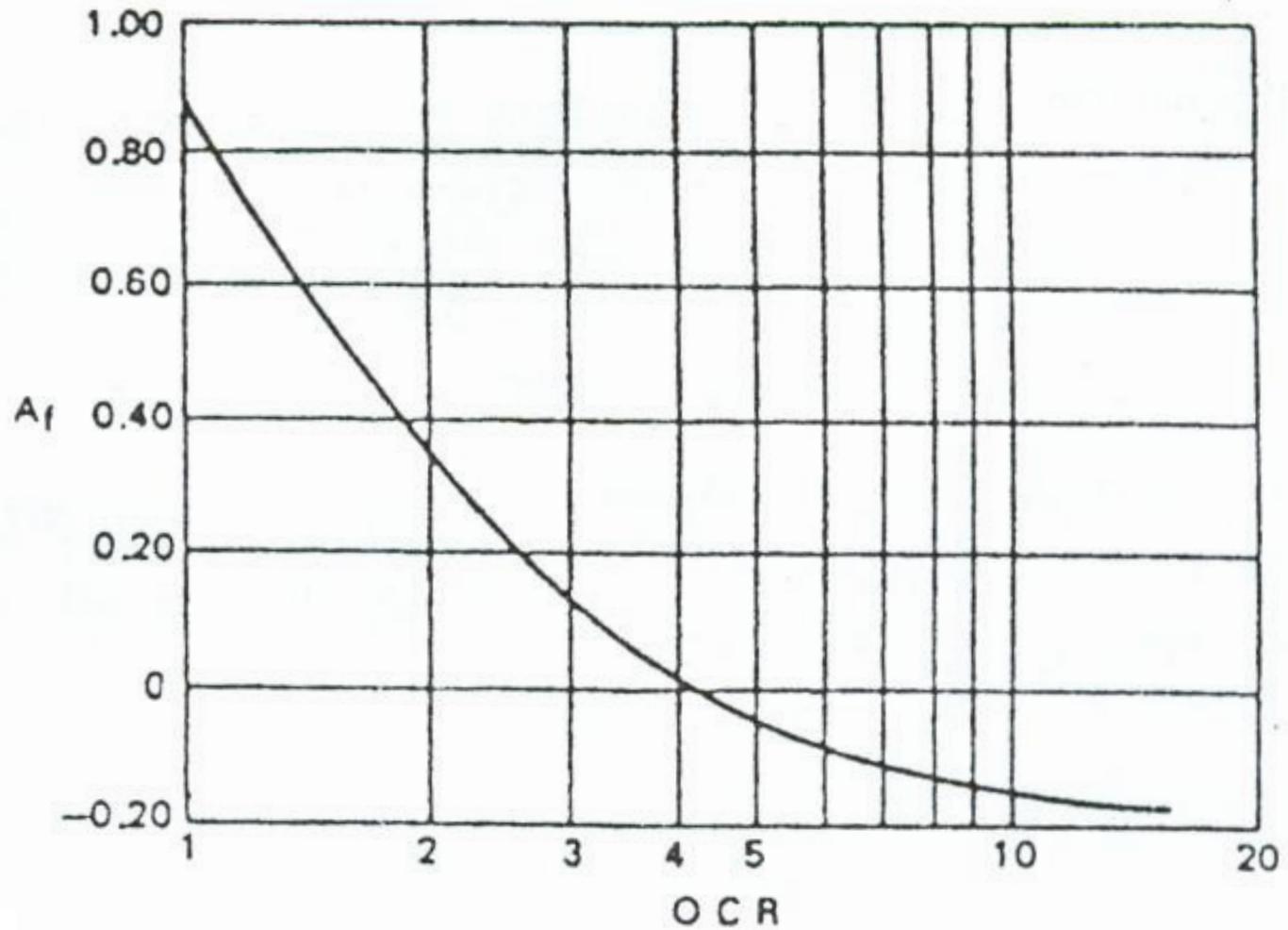


Arcilla OC (preconsolidación alta)

( $A = -0.5 - 0.0$ )

Durante el incremento de la tensión principal mayor la presión de poros puede llegar a ser negativa en arcillas muy preconsolidadas debido a la dilatación de la probeta

## Valores Típicos del parámetro **A**



Typical relationship between  $A$  at failure and overconsolidation

# Ensayo No Consolidado No Drenado (Ensayo UU)

**Total,  $\sigma$**

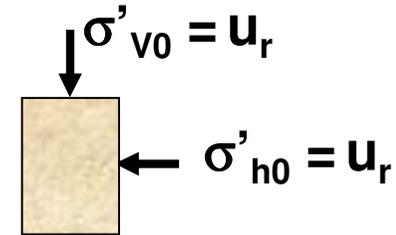
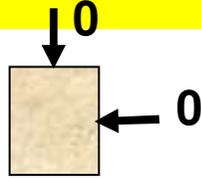
**=**

**Neutra,  $u$**

**+**

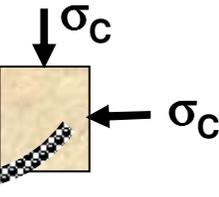
**Efectiva,  $\sigma'$**

**Paso 1: Inmediatamente luego de muestreo**



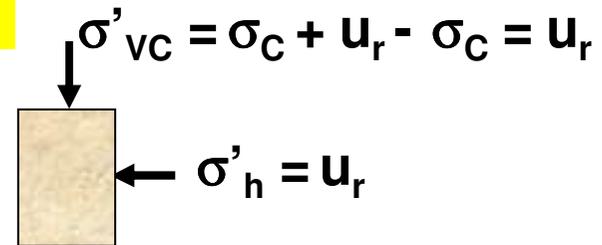
**Paso 2: Luego de aplicación de presión de cámara hidrostática**

**Sin drenaje**  
**X**



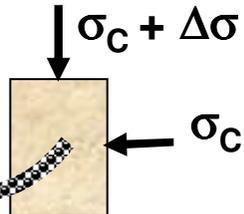
$$-u_r + \Delta u_c = -u_r + \sigma_c$$

( $S_r = 100\%$ ;  $B = 1$ )



**Paso 3: Durante aplicación de carga axial**

**Sin drenaje**  
**X**



$$-u_r + \sigma_c \pm \Delta u$$

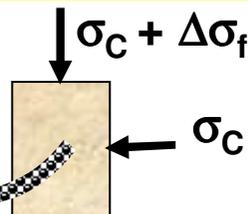
$\sigma$

$\sigma'$

**=**

**Paso 3: En la falla**

**Sin drenaje**  
**X**



$$-u_r + \sigma_c \pm \Delta u_f$$

$\sigma$

$\sigma'$

**=**

$\sigma$

$\sigma'$

**+**

$\sigma$

# Ensaye No Consolidado – No Drenado (Ensaye UU)

**Total,  $\sigma$**

=

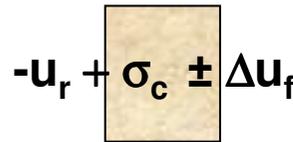
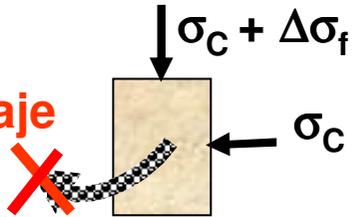
**Neutra,  $u$**

+

**Efectiva,  $\sigma'$**

**Paso 3: En falla**

Sin drenaje

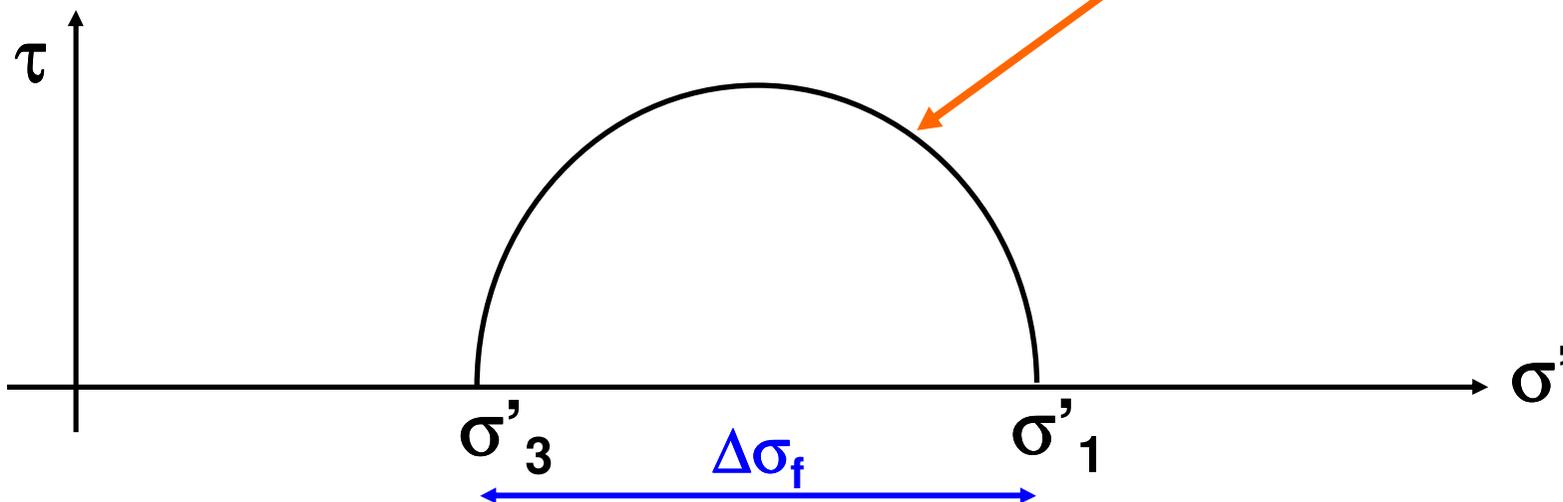


$$\sigma'_{vf} = \cancel{\sigma_c} + \Delta\sigma_f + u_r - \cancel{\sigma_c} \mp \Delta u_f = \sigma'_{1f}$$

$$\sigma'_{hf} = \cancel{\sigma_c} + u_r - \cancel{\sigma_c} \mp \Delta u_f = \sigma'_{3f}$$

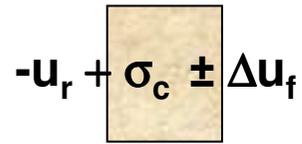
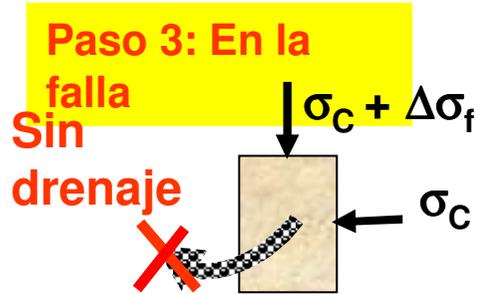
El círculo de Mohr en términos de tensiones efectivas no depende de la presión de cámara.

De allí, obtenemos un sólo círculo de Mohr en términos de tensiones efectivas para diferentes presiones de cámara



# Ensaye No Consolidado - No Drenado (Ensaye UU)

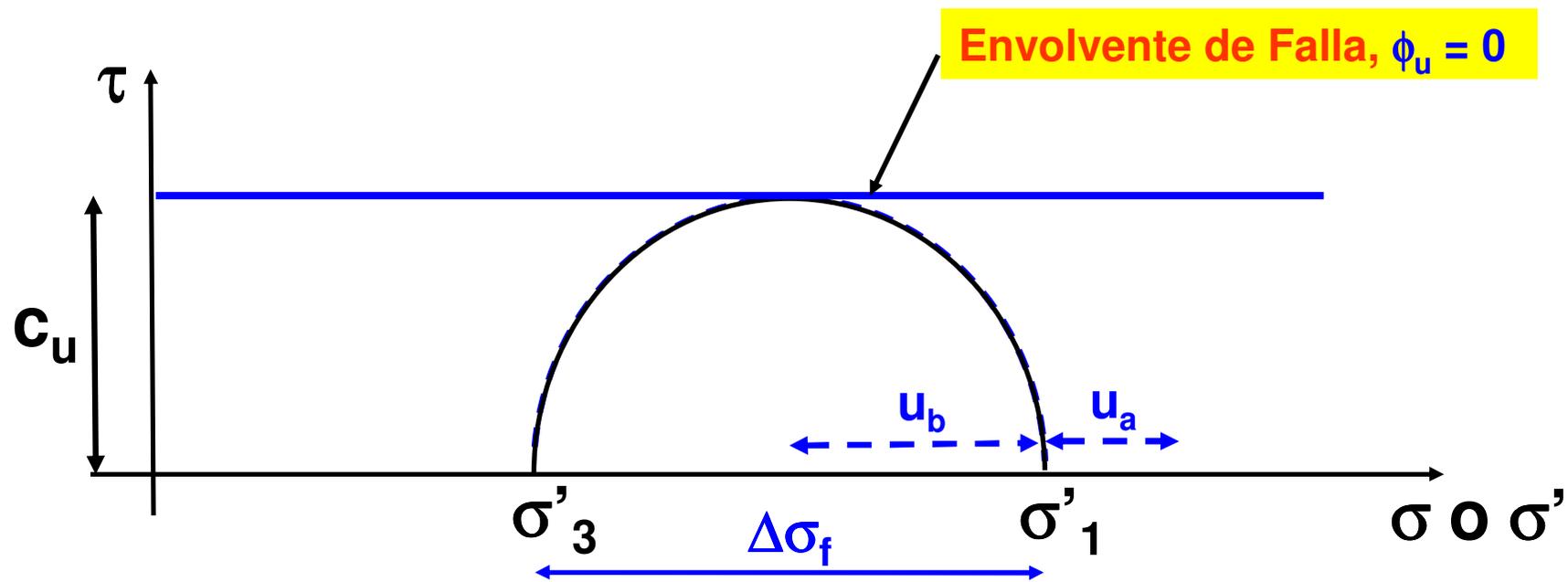
**Total,  $\sigma$**  = **Neutra,  $u$**  + **Efectiva,  $\sigma'$**



$$\sigma'_{vf} = \cancel{\sigma_c} + \Delta\sigma_f + u_r - \cancel{\sigma_c} \mp \Delta u_f = \sigma'_{1f}$$

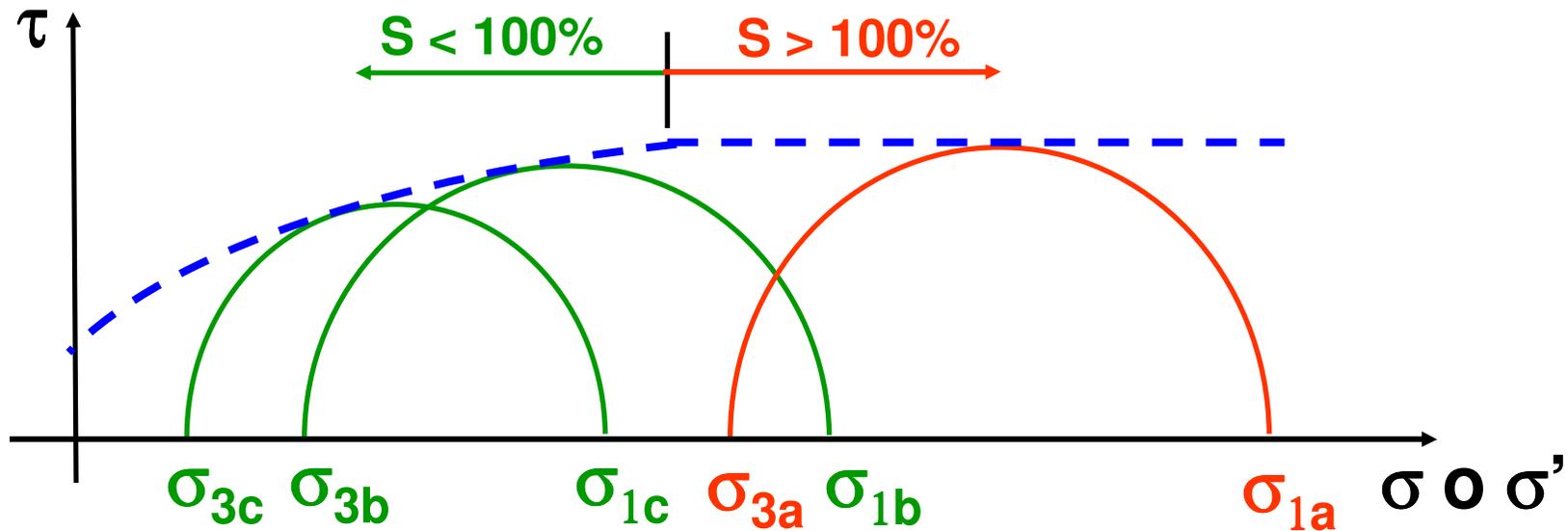
$$\sigma'_{hf} = \cancel{\sigma_c} + u_r - \cancel{\sigma_c} \mp \Delta u_f = \sigma'_{3f}$$

## Círculos de Mohr en terminos de tesniones totales



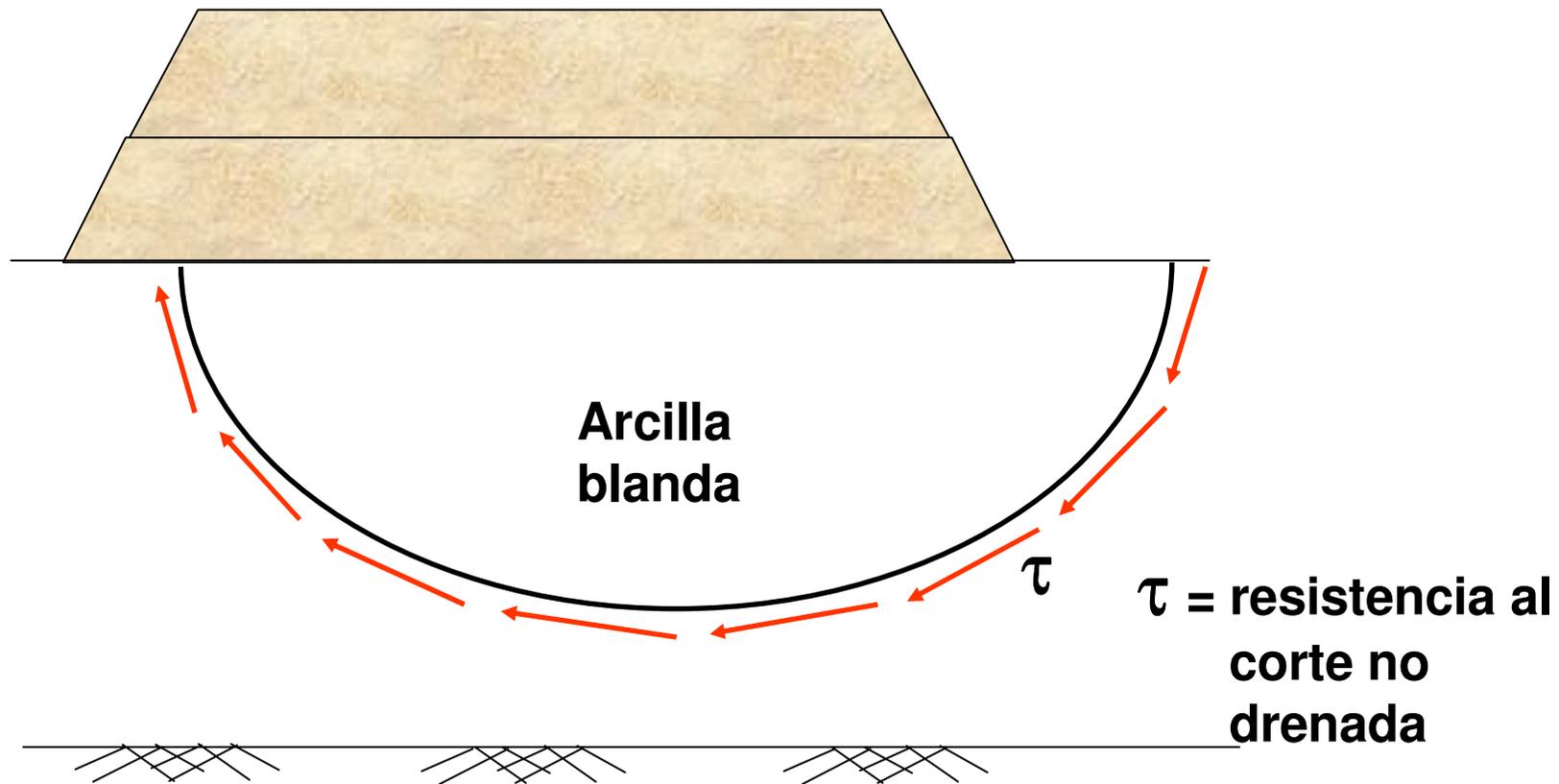
# Ensaye No Consolidado – No Drenado (Ensaye UU)

## Efecto del grado de saturación en la envolvente de falla



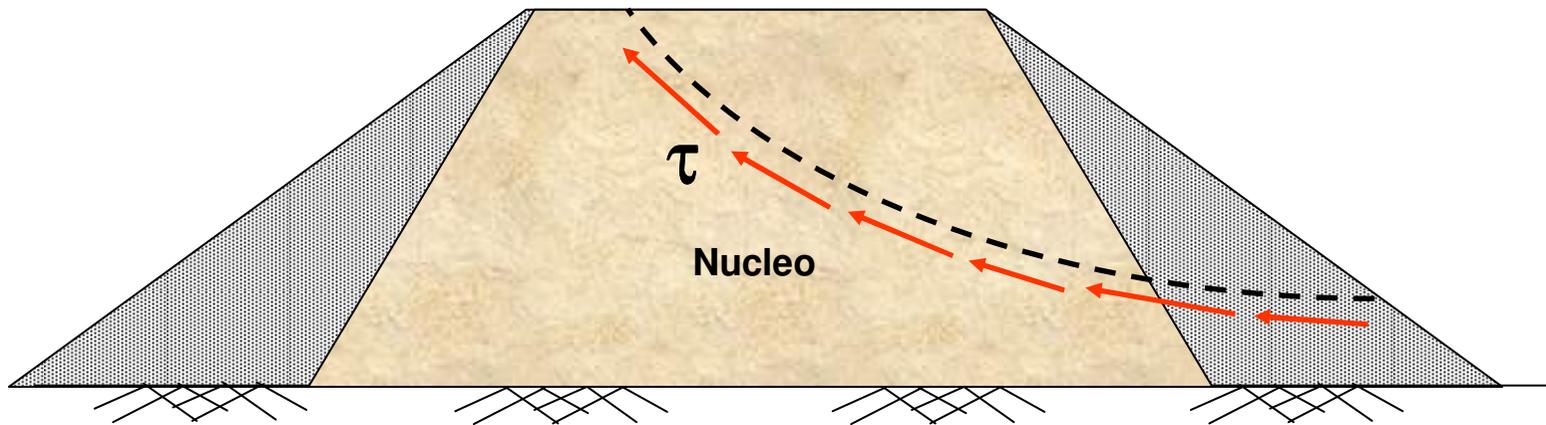
# Algunas aplicaciones prácticas de análisis UU para arcillas

## 1. Terraplén construido rápidamente sobre un depósito de arcilla blanda



# Algunas aplicaciones practicas de análisis UU para arcillas

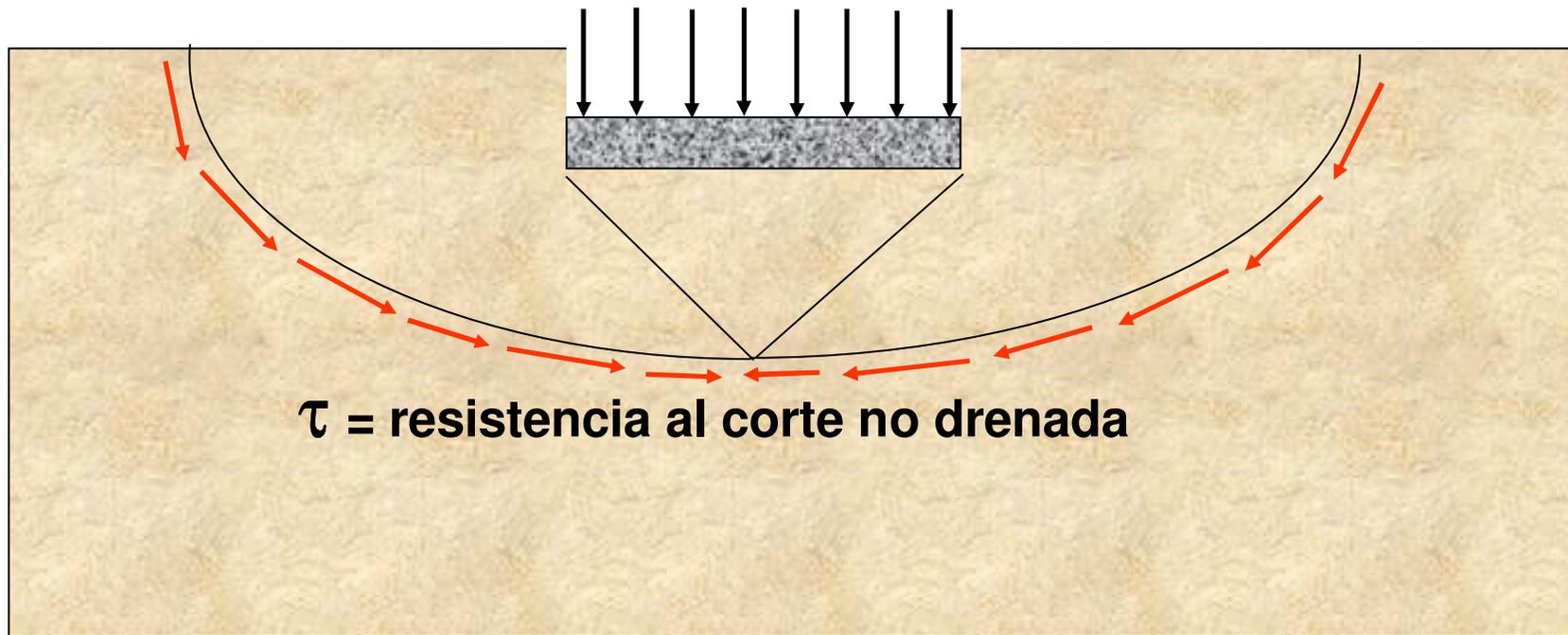
2. Presa de tierra construida rapidamente sobre arcilla blanda sin cambio en contenido de humedad de ella



$\tau$  = Resistencia al corte  
no drenada de nucleo  
de arcilla

# Algunas aplicaciones prácticas de Analisis UU para arcillas

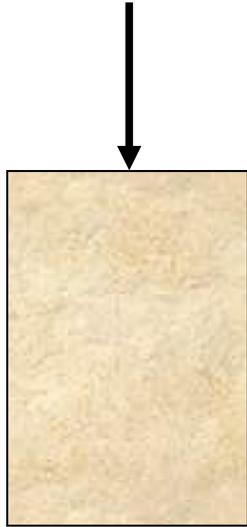
## 3. Fundación construida rapidamente sobre deposito de arcilla



Nota: Ensayes UU simulan la condición de corto plazo en terreno. Así,  $c_u$  puede ser usada para analizar el comportamiento de suelos en el corto plazo

# Ensayo de Compresión No Confinada (Ensayo UC)

$$\sigma_1 = \sigma_{VC} + \Delta\sigma$$

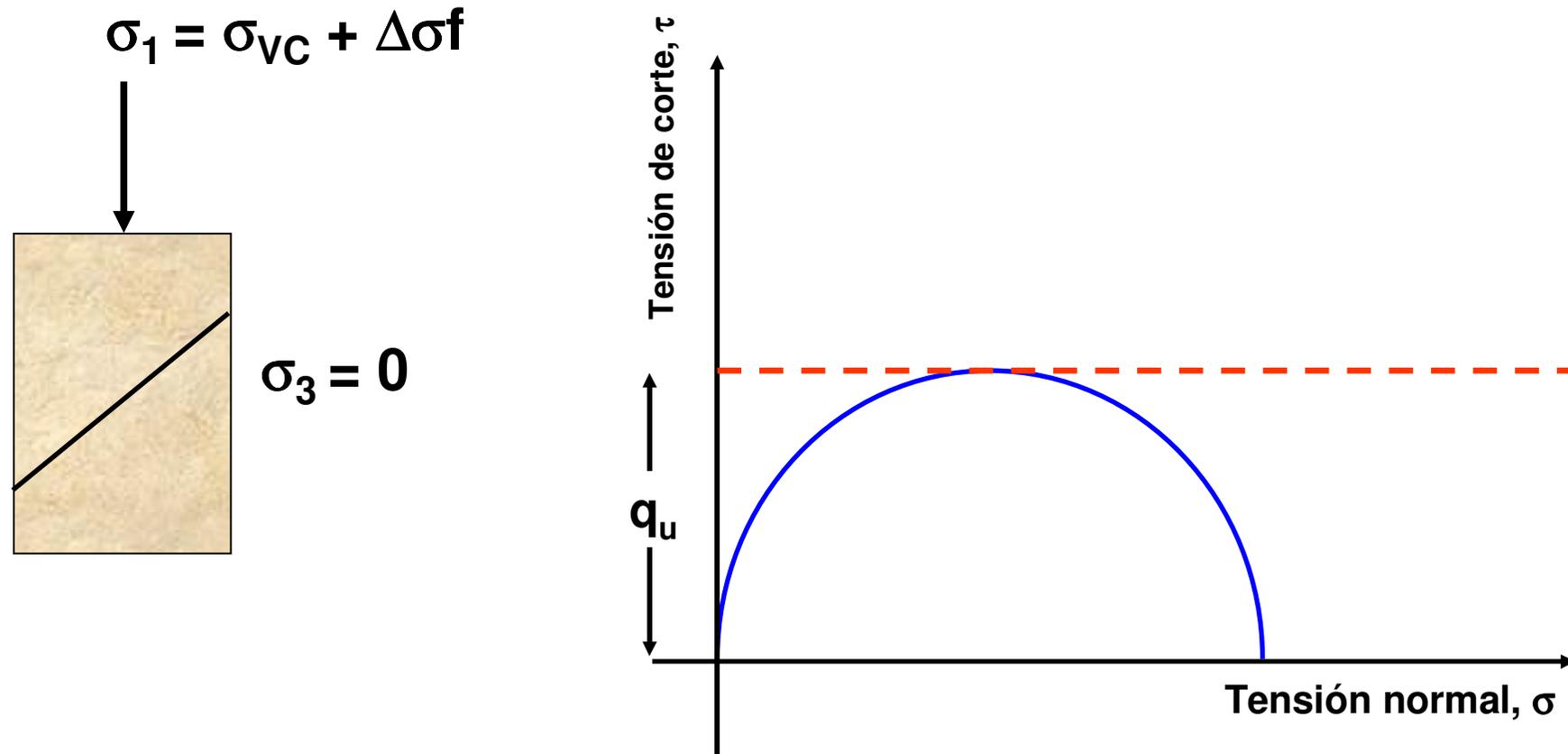


$$\sigma_3 = 0$$



La presión de confinamiento es cero en el ensayo UC

## Ensaye de Compresión No Confinada (Ensaye UC)

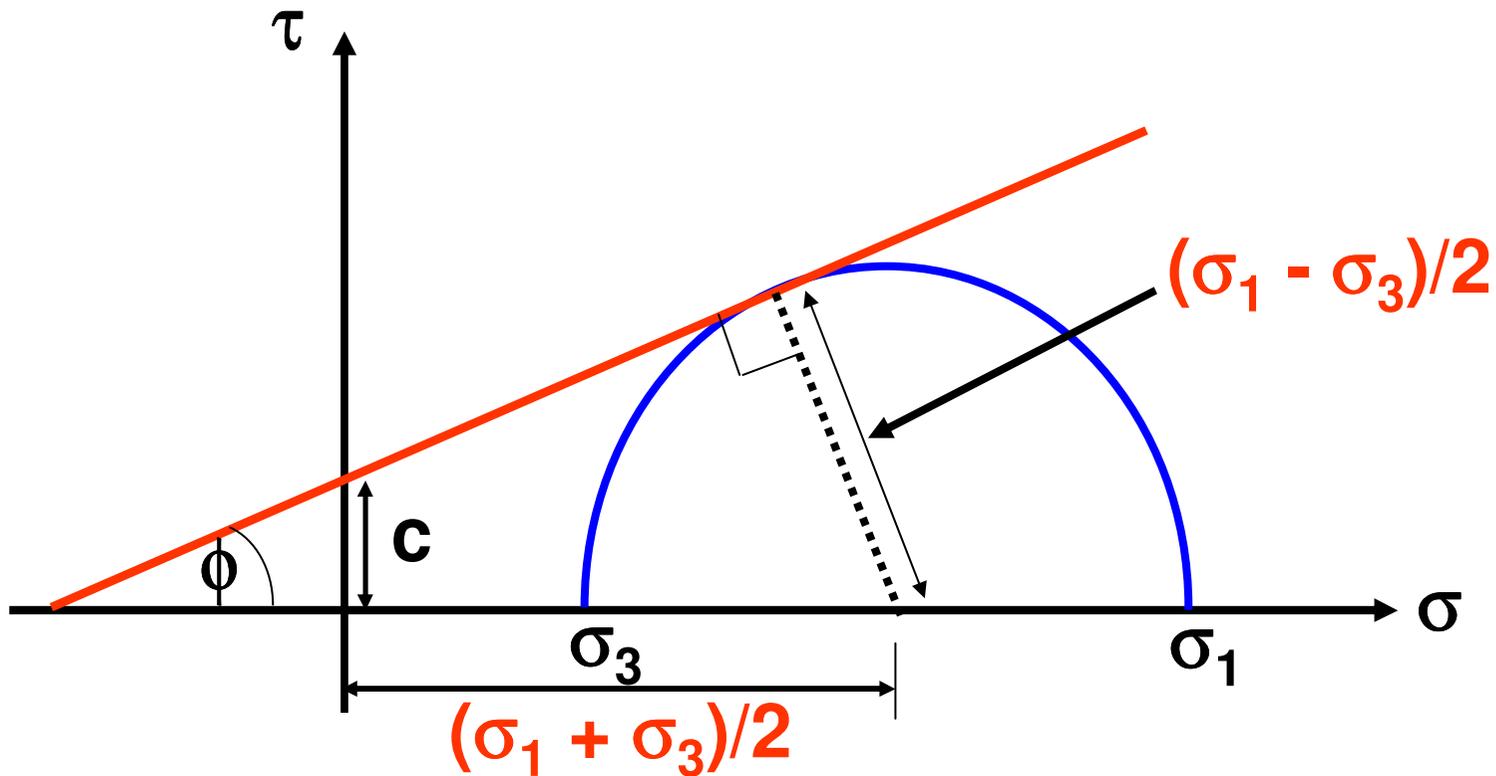


**Nota: Teóricamente  $q_u = c_u$ , sin embargo en el caso  $q_u < c_u$  debido a la falla prematura de la probeta**

## Invariantes de tensiones ( $p$ y $q$ )

$$p \text{ (o } s) = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$$

$$q \text{ (o } t) = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$$

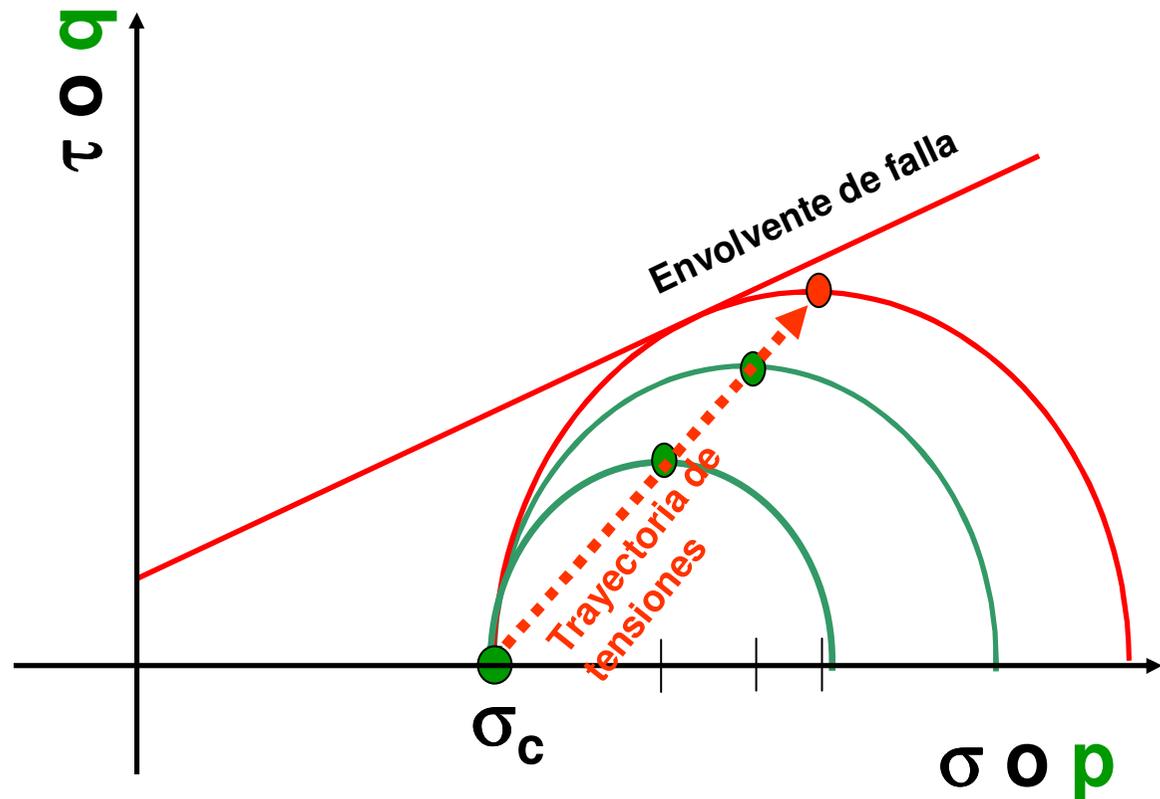
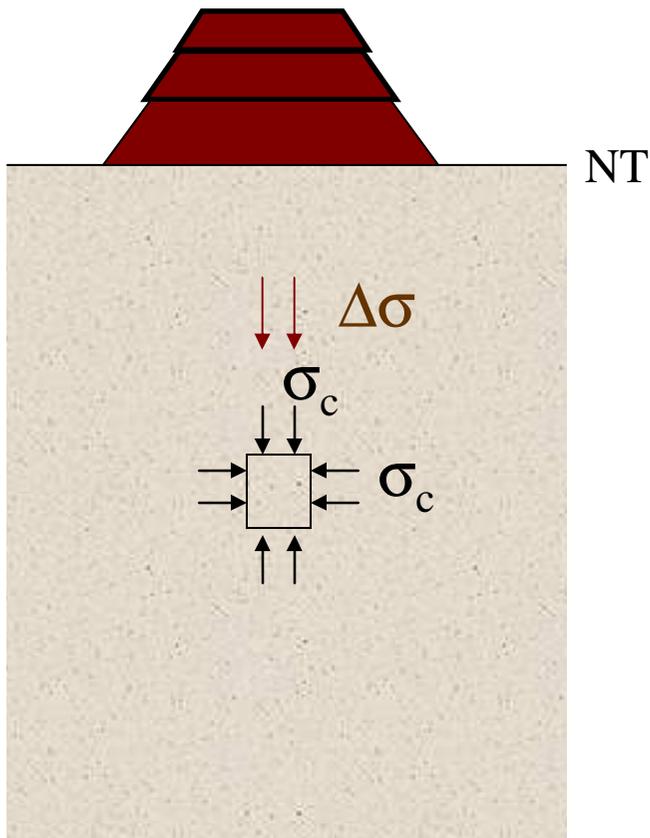


$p$  y  $q$  pueden emplearse para expresar la variación del estado tensional de una probeta durante el ensaye triaxial

# Invariantes de tensiones ( $p$ y $q$ )

$$p \text{ (o } s) = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$$

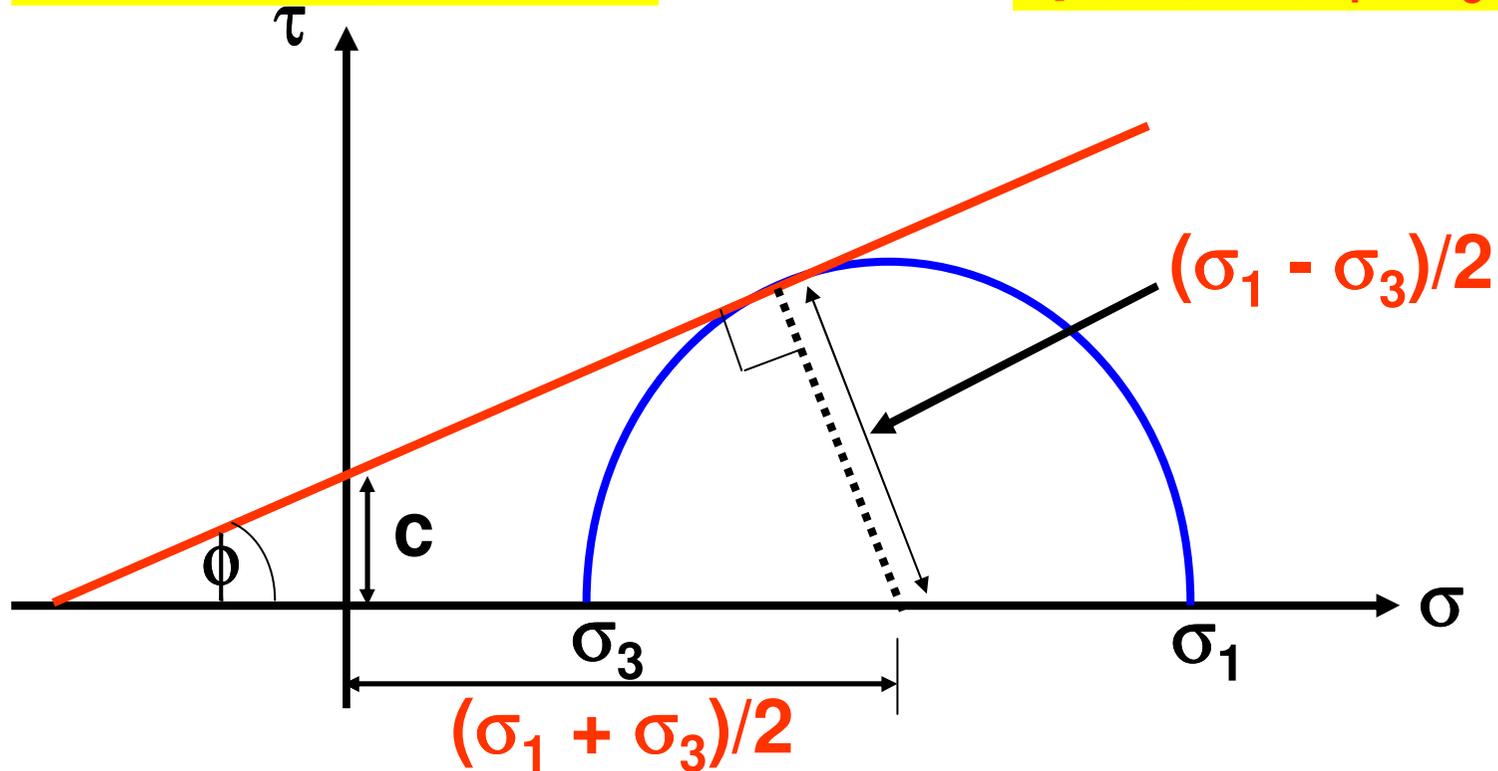
$$q \text{ (o } t) = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$$



## Envolvente de falla de Mohr Coulomb en términos de invariantes de tensiones

$$p(o s) = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$$

$$q(o t) = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$$



$$\left[ c' \cot \phi' + \left( \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \right) \right] \sin \phi' = \left( \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \right)$$

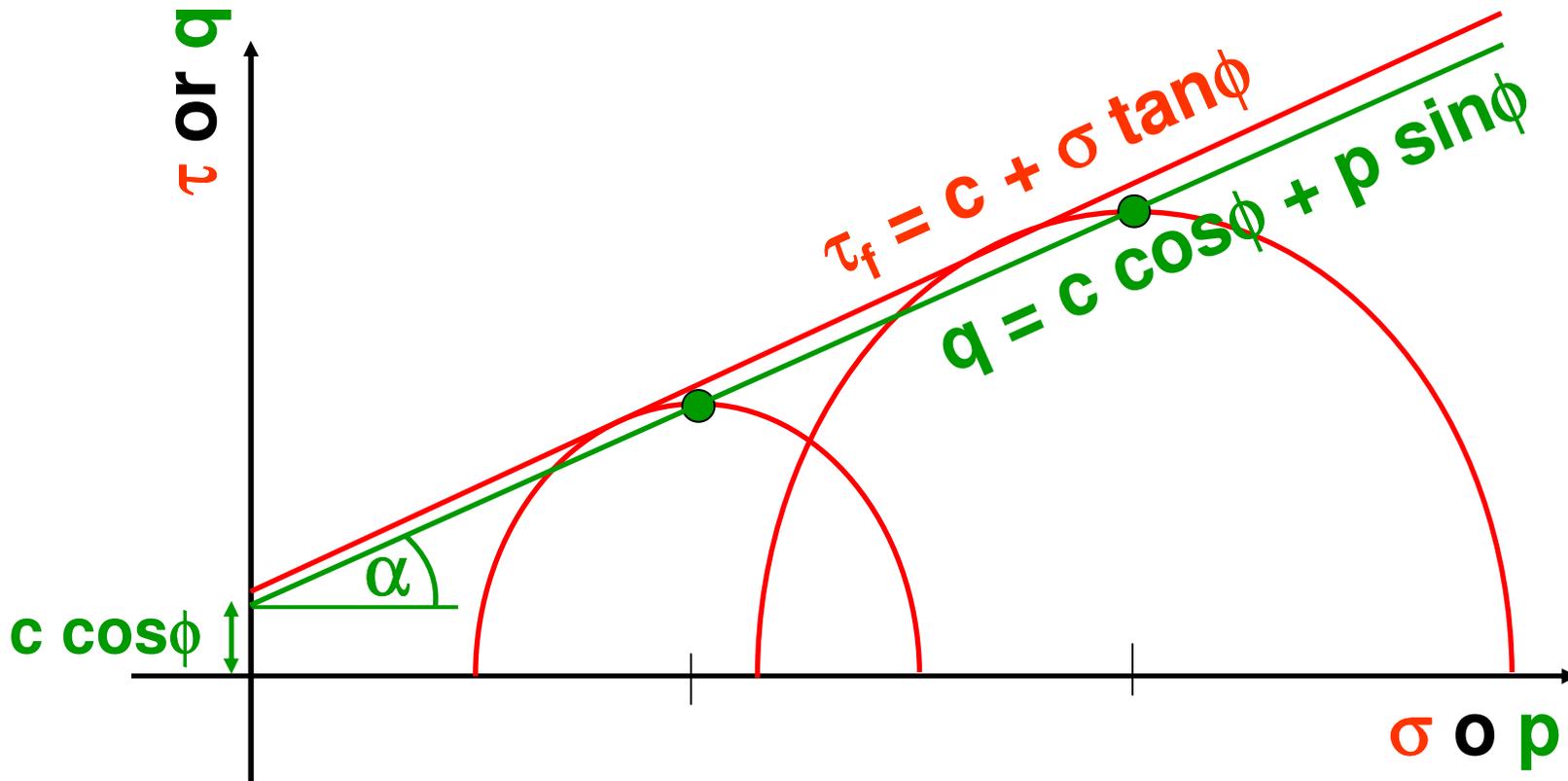
$$\frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{2} = \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_3)}{2} \sin \phi' + c' \cos \phi'$$

$$q = p \sin \phi' + c' \cos \phi'$$

# Envolvente de falla de Mohr Coulomb en términos de invariantes de tensiones

$$p \text{ (o } s) = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$$

$$q \text{ (o } t) = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$$



De alli,  $\sin \phi = \tan \alpha$



$$\phi = \sin^{-1}(\tan \alpha)$$

# Trayectorias de tensiones para ensayos Triaxiales CD

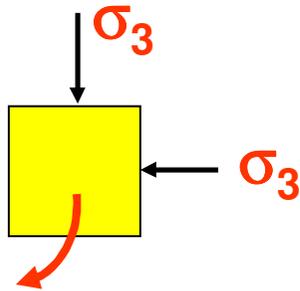
En ensayos CD la presión de poros es cero. Entonces, las tensiones totales y efectivas son iguales

$$p, p' (o s, s') = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$$

$$= (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$$

$$q (o t) = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$$

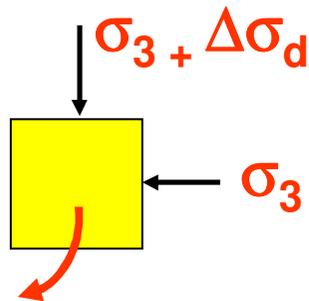
Paso 1



$$p, p' (o s, s') = \sigma_3$$

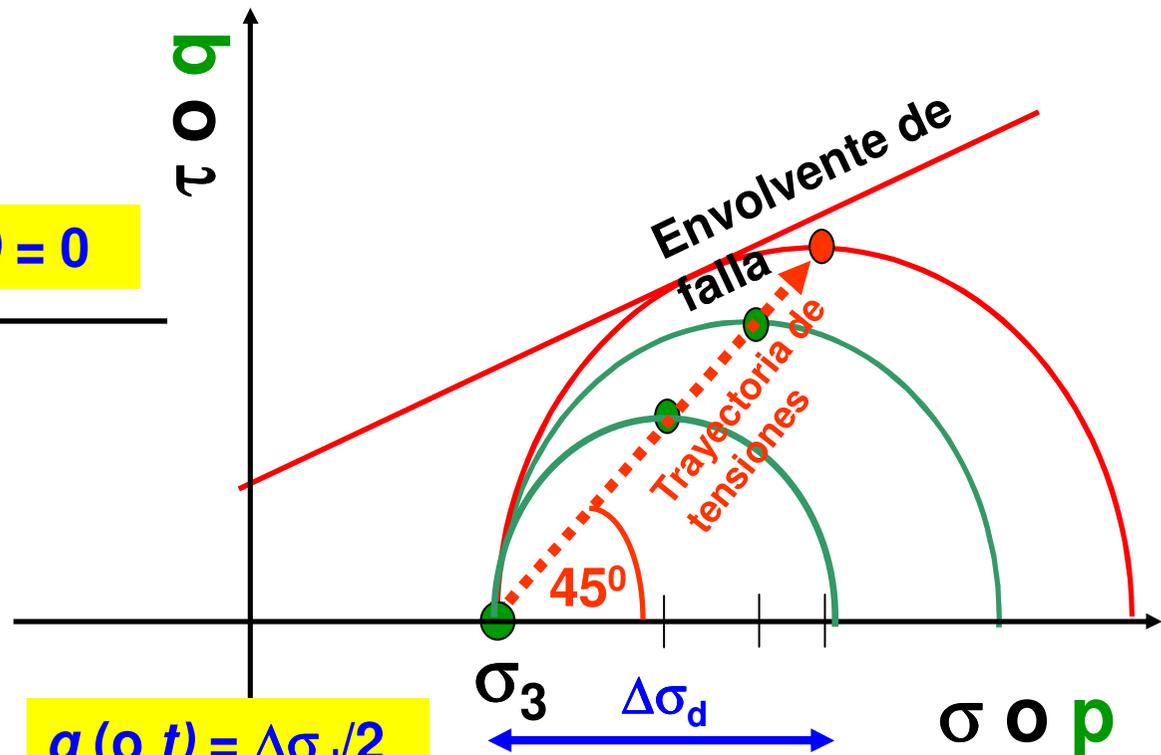
$$q (o t) = 0$$

Paso 2



$$p, p' (o s, s') = \sigma_3 + \Delta\sigma_d/2$$

$$q (o t) = \Delta\sigma_d/2$$



# Trayectorias de tensiones para ensayos triaxiales CU

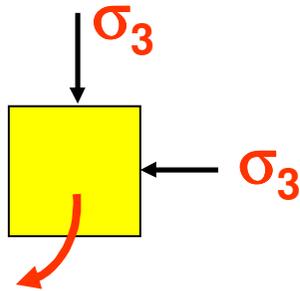
En ensayos CU se desarrolla presión de poros durante el corte

$$p(o s) = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$$

$$p'(o s') = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 - u$$

$$q(o t) = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$$

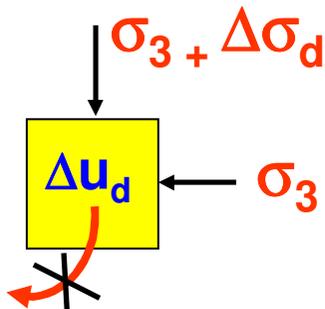
Paso 1



$$p, p'(o s, s') = \sigma_3$$

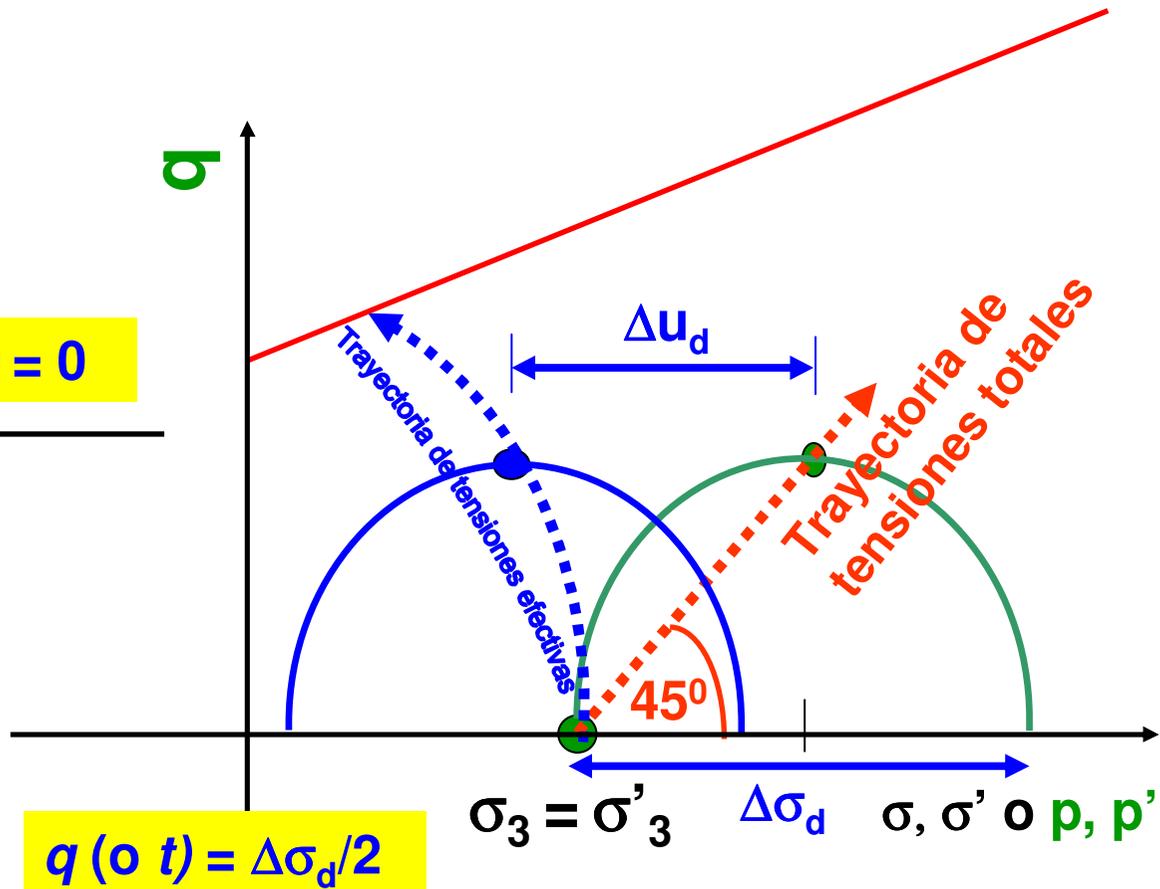
$$q(o t) = 0$$

Paso 2

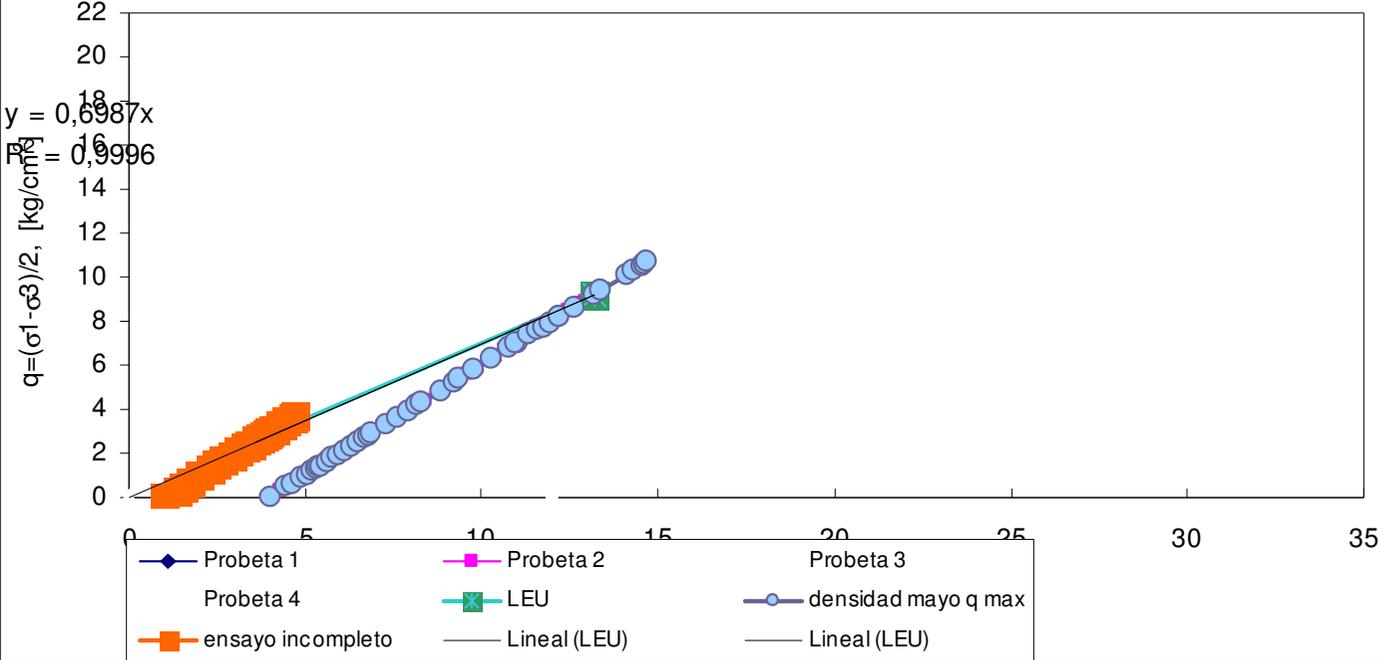


$$p(o s) = \sigma_3 + \Delta\sigma_d/2$$

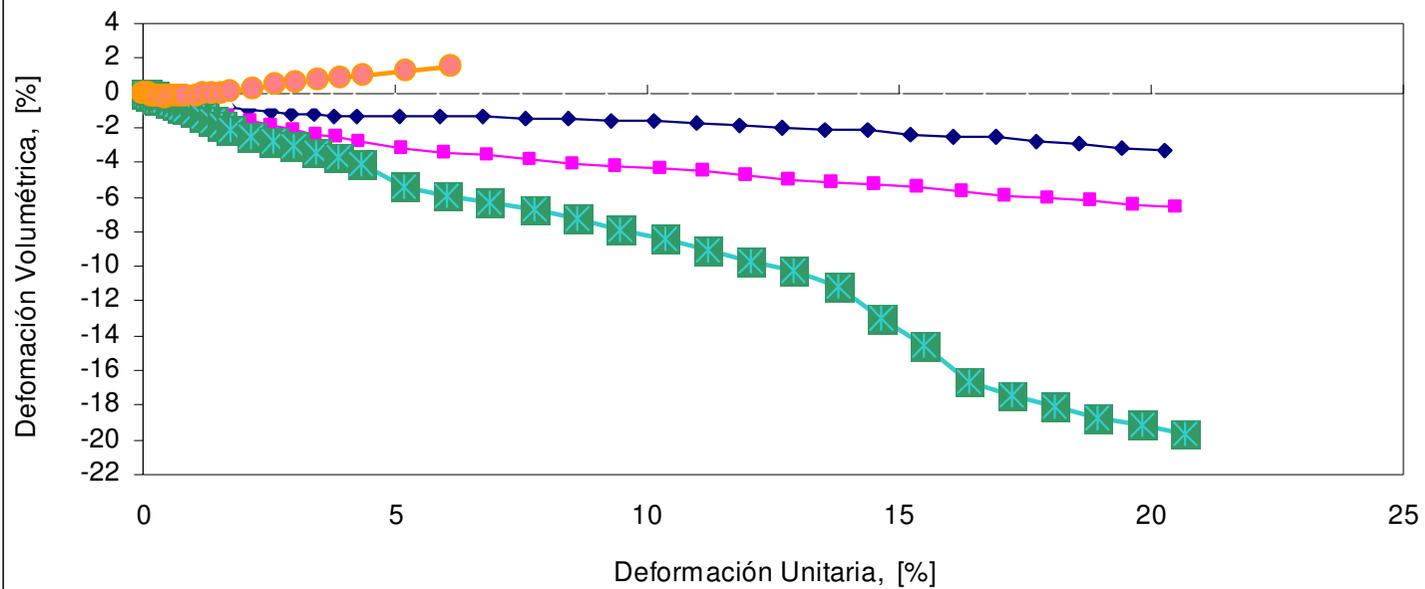
$$q(o t) = \Delta\sigma_d/2$$



**TRIAXIAL CID, p - q,**  
 Proyecto: OL-4283  
 Muestra: PEBBLES

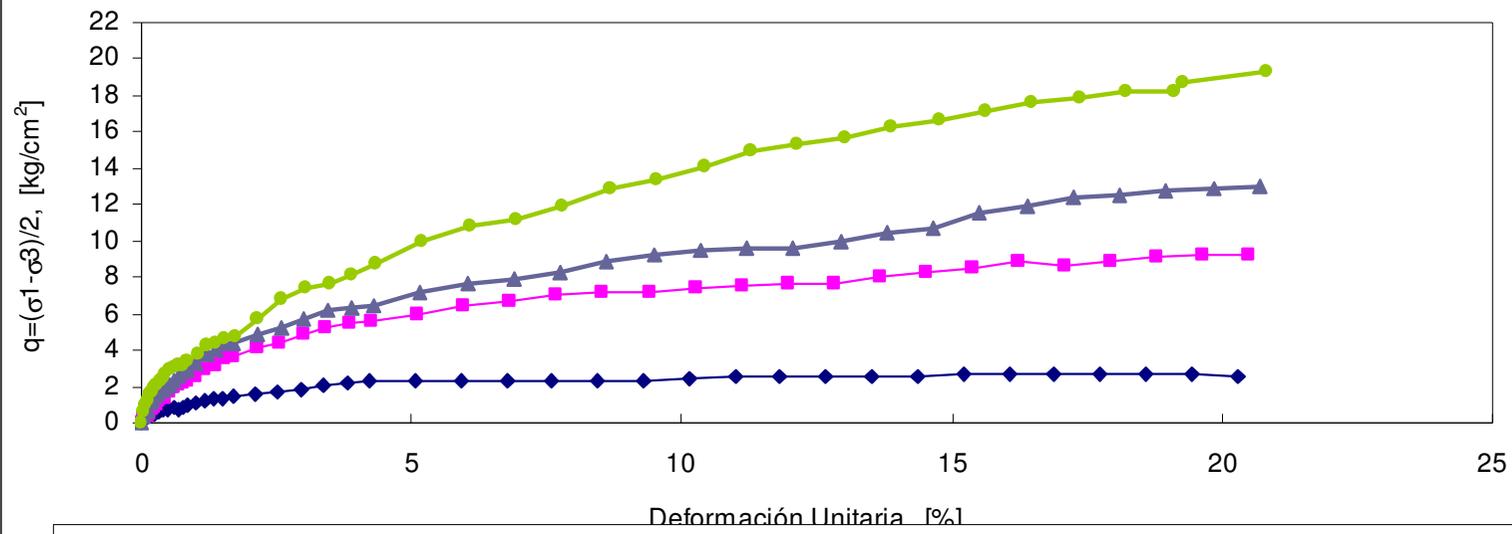


TRIAXIAL CID,  $\varepsilon - \varepsilon_v$ ,  
Proyecto: OL-4283  
Muestra: PEBBLES



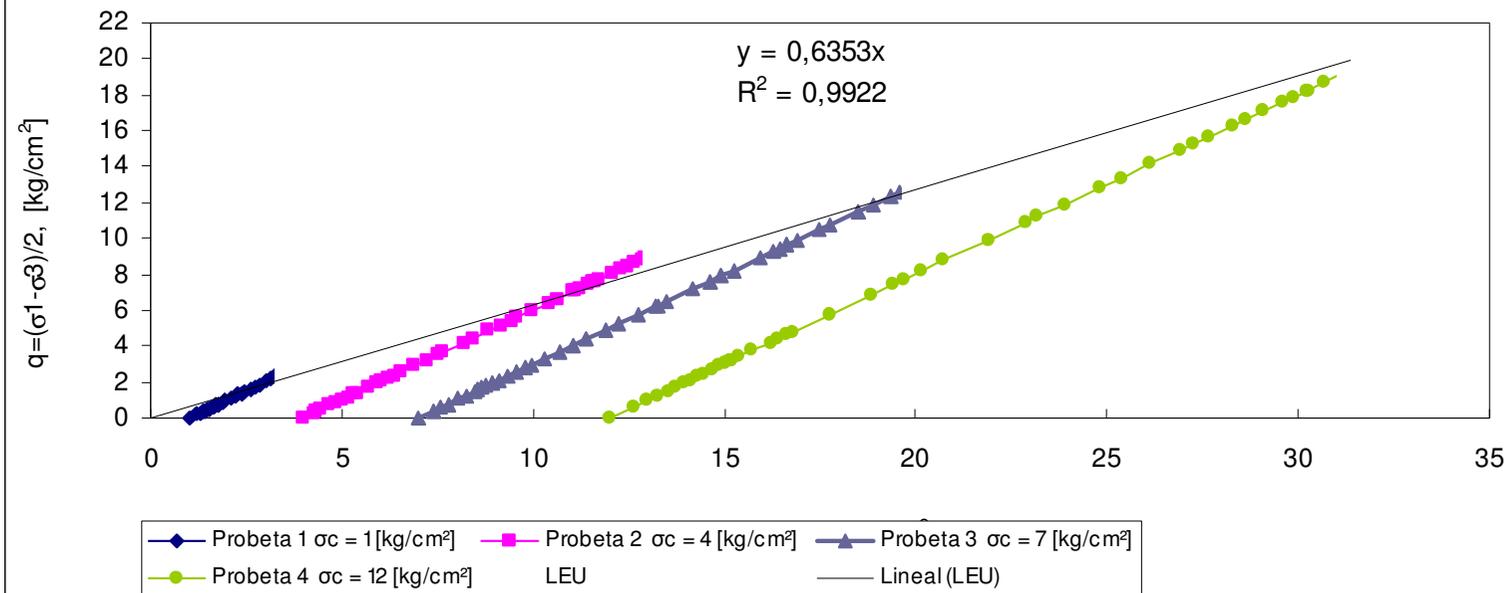
◆ Probeta 1    ■ Probeta 2    Probeta 3    Probeta 4    ✕ densidad mayor q la max    ● ensayo incompleto

TRIAxIAL CID,  $\epsilon - q$ ,  
Proyecto: Caserones  
Muestra: PEBBLES

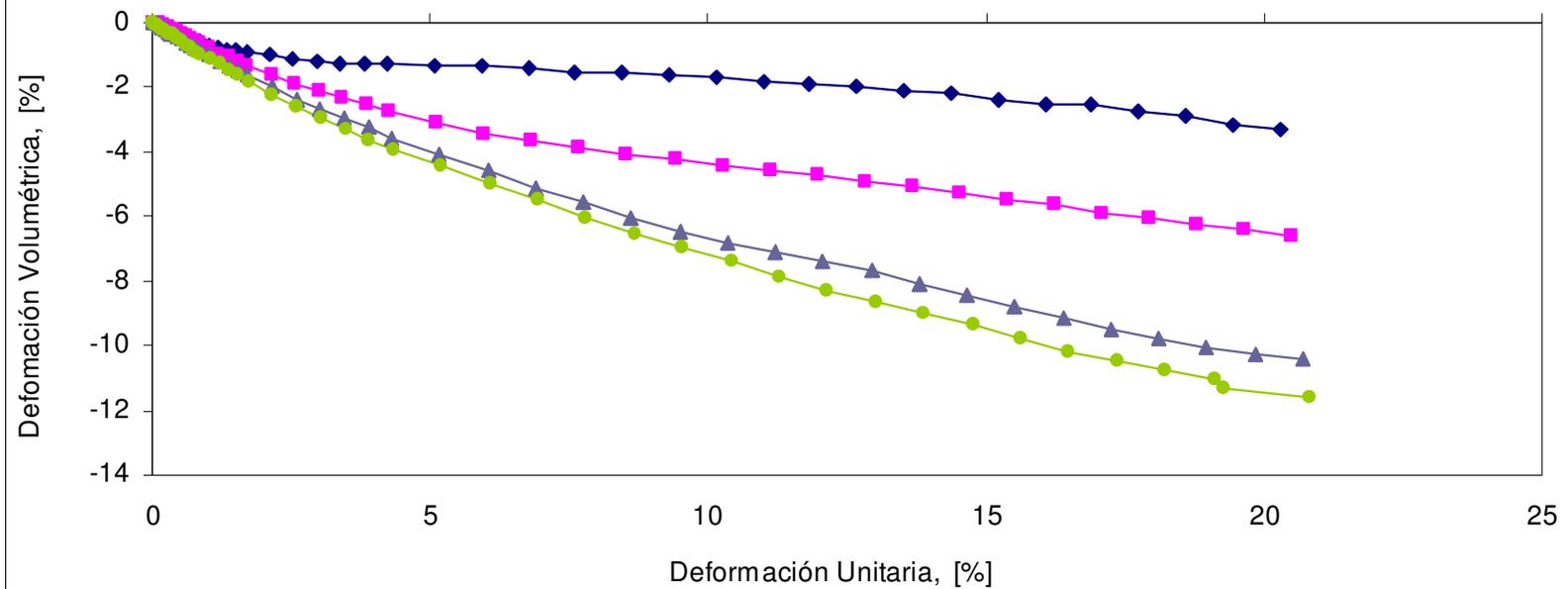


◆ Probeta 1  $\sigma_c = 1$  [ $\text{kg/cm}^2$ ]    ■ Probeta 2  $\sigma_c = 4$  [ $\text{kg/cm}^2$ ]    ▲ Probeta 3  $\sigma_c = 7$  [ $\text{kg/cm}^2$ ]    ● Probeta 4  $\sigma_c = 12$  [ $\text{kg/cm}^2$ ]

**TRIAxIAL CID, p - q,**  
Proyecto: OL-4283  
Muestra: PEBBLES

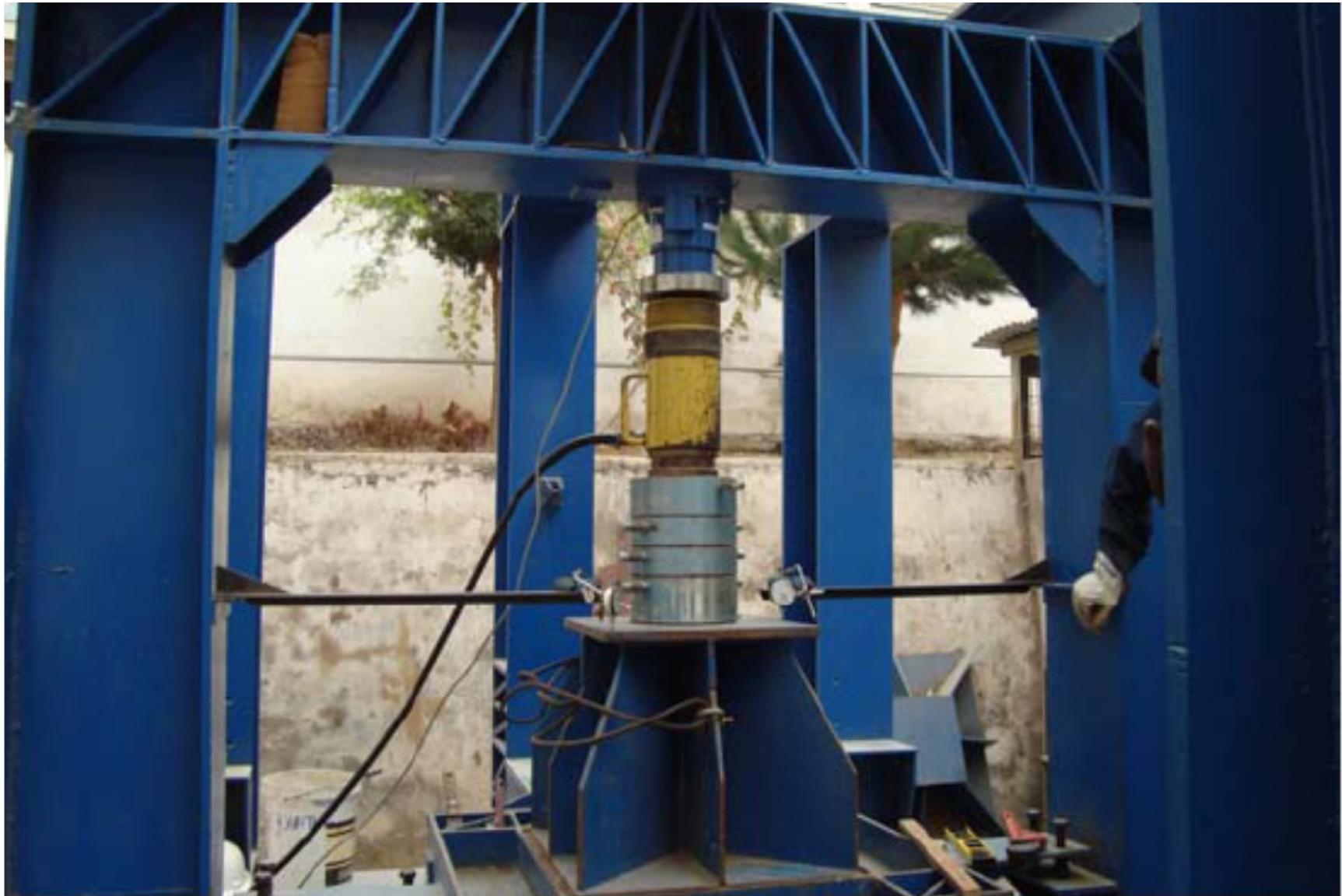


TRIAxIAL CID,  $\epsilon - \epsilon_V$ ,  
Proyecto: OL-4283  
Muestra: PEBBLES



◆ Probeta 1  $\sigma = 1$  [kg/cm<sup>2</sup>]    ■ Probeta 2  $\sigma = 4$  [kg/cm<sup>2</sup>]    ▲ Probeta 3  $\sigma = 7$  [kg/cm<sup>2</sup>]    ● Probeta 4  $\sigma = 12$  [kg/cm<sup>2</sup>]







## Otros ensayos de laboratorio

Corte Directo Simple

Ensaye de Anillo Torsional

Ensaye Triaxial Plano

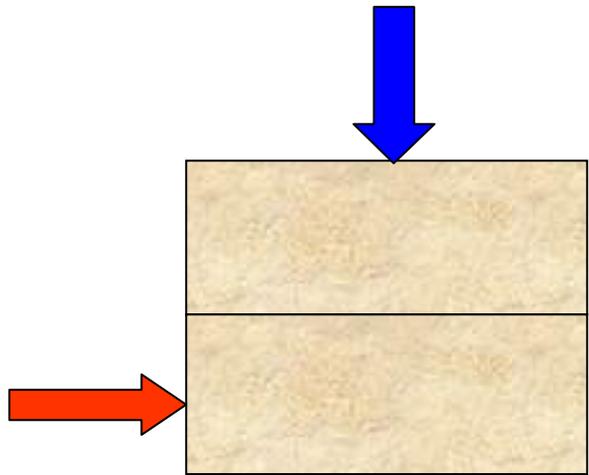
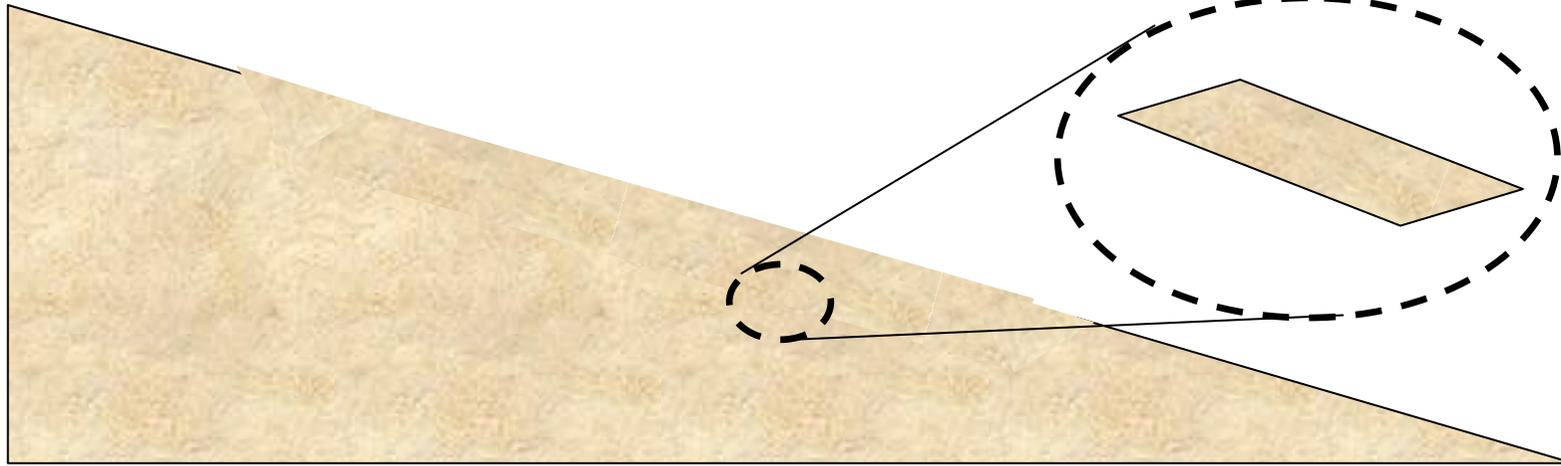
## Otros ensayos de Laboratorio

Corte Directo Simple

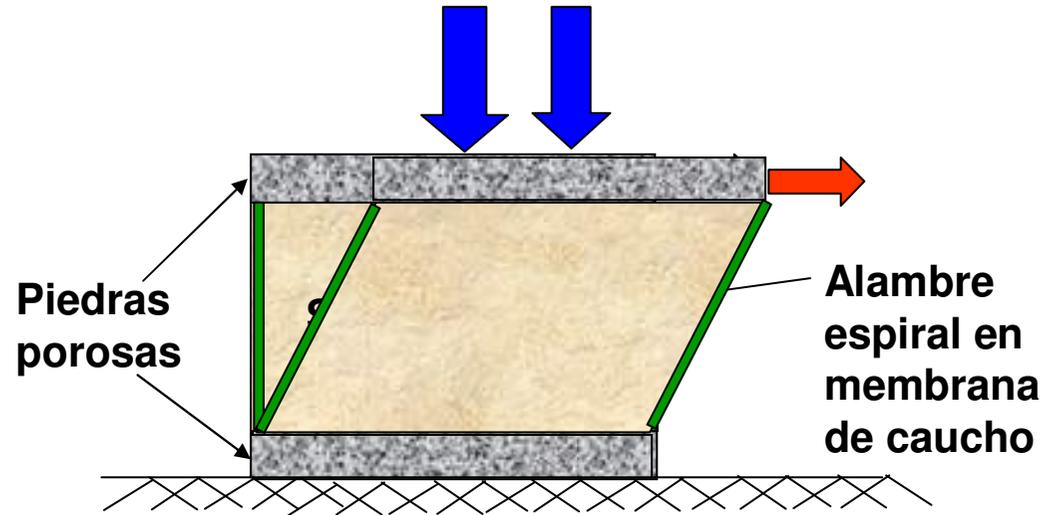
Ensaye de Anillo Torsional

Ensaye Triaxial Plano

# Ensaye Corte Directo Simple



Ensaye Corte Directo



Ensaye Corte Directo Simple

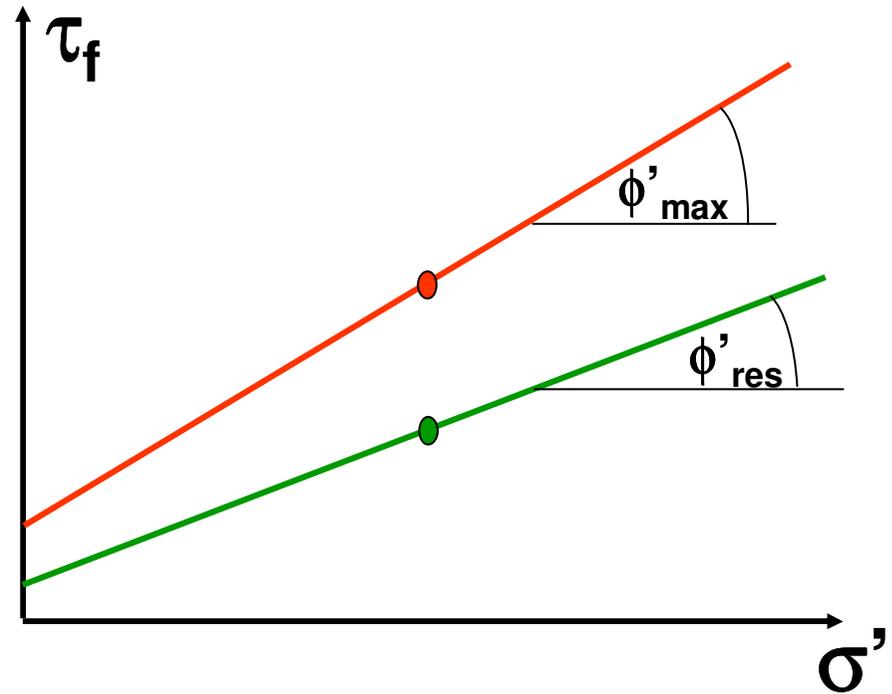
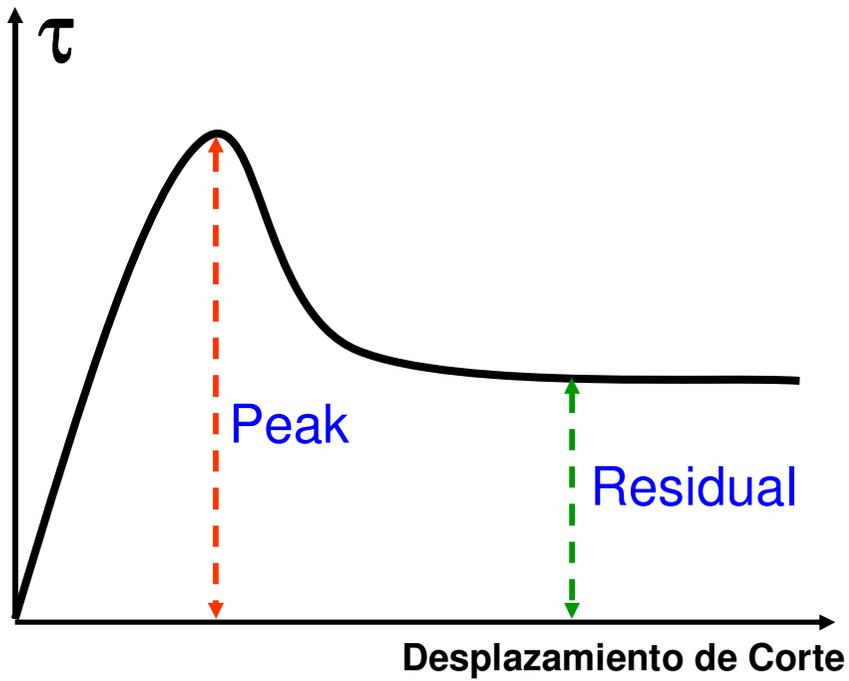
## Otros ensayos de Laboratorio

**Ensaye Corte Directo Simple**

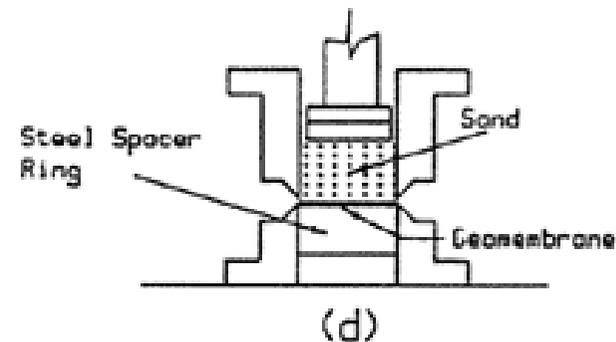
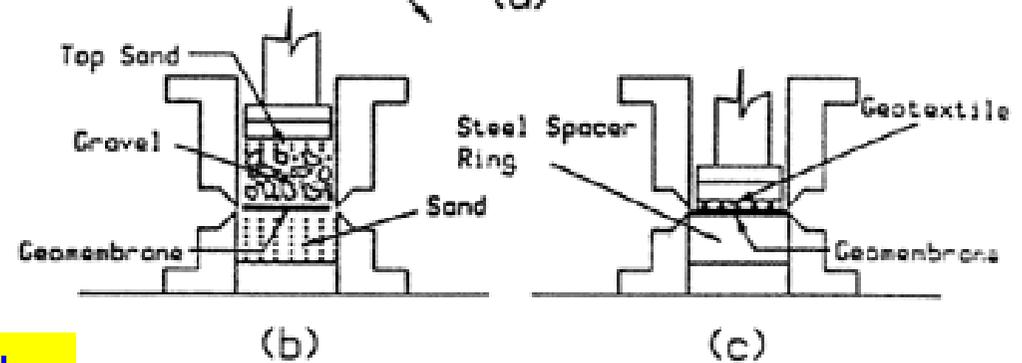
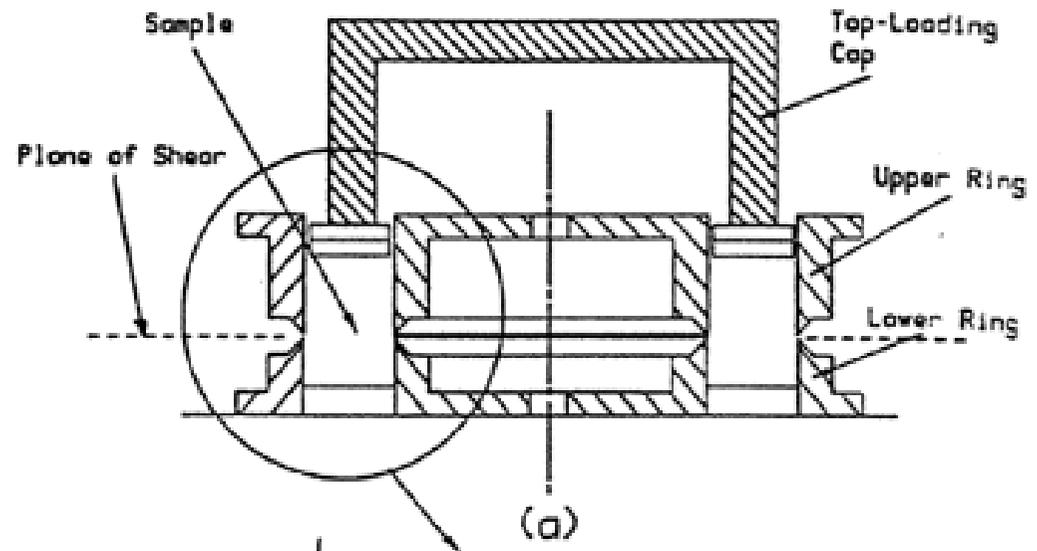
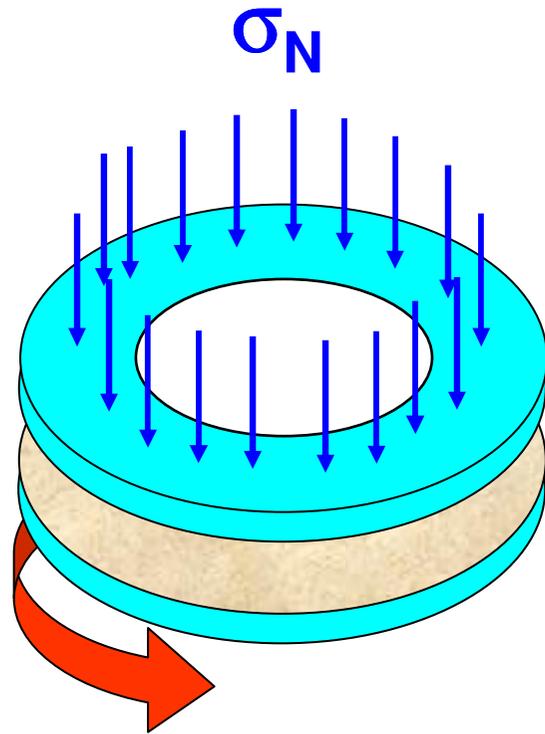
**Ensaye de Anillo Torsional**

**Ensaye Triaxial plano**

# Ensayo de Anillo Torsional



# Ensayo de Anillo Torsional



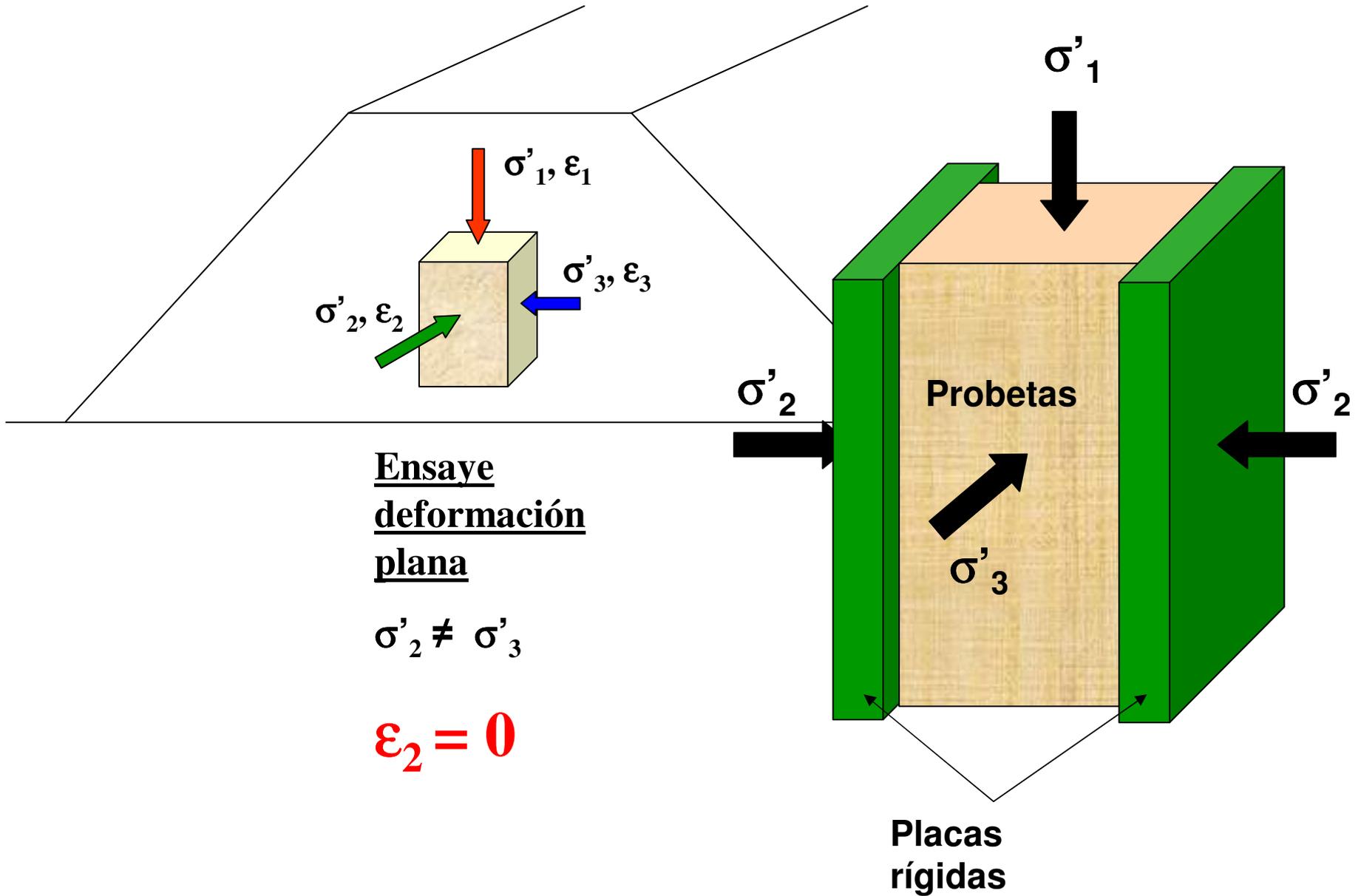
Preparación de la muestra anular no perturbada es muy difícil. Por ende, generalmente se emplean muestras remoldeadas

Direct simple shear test

Torsional ring shear test

**Ensayo Triaxial Plano**

# Ensaye Triaxial Plano



# Ensayes de Corte In situ

**Veleta**

**Torvena**

**Penetrometro**

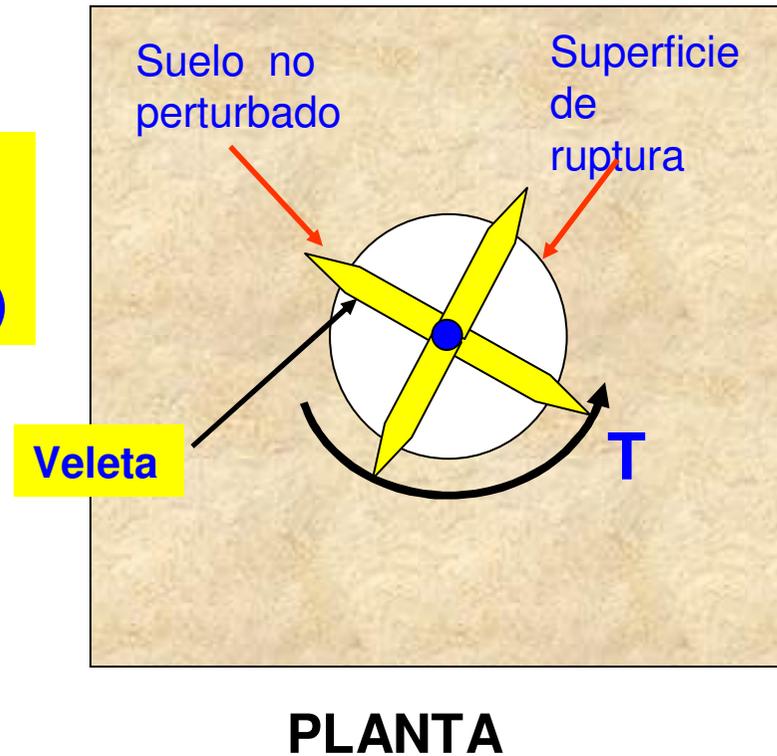
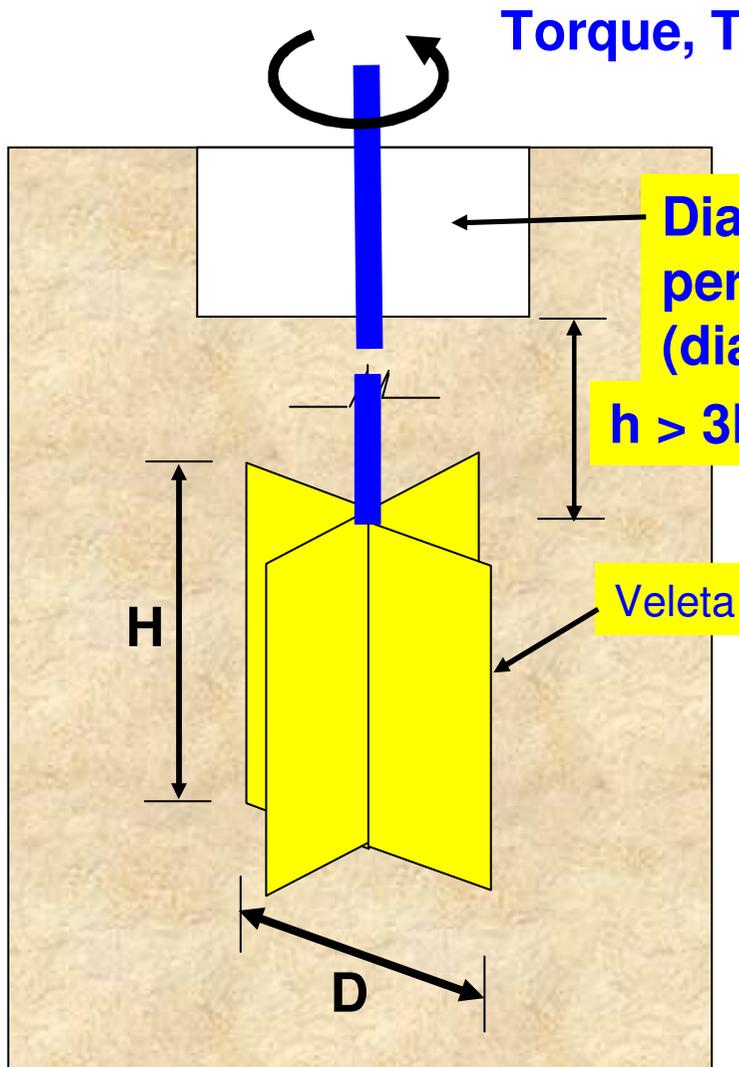
**Presiometro**

**Penetrometro de Cono estatico, PCPT)**

**Standard Penetration Test, SPT**

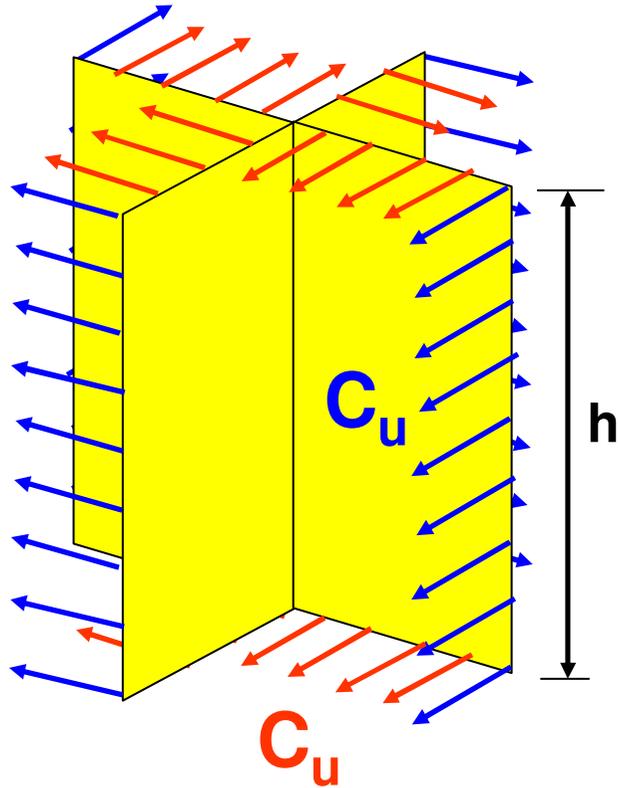
# Veleta

Para resistencia al corte no drenada ( $C_u$ ) y sensibilidad de arcillas blandas



Velocidad de rotación :  $6^{\circ} - 12^{\circ}$  por minuto  
El ensaye puede efectuarse cada 0.5 m verticales

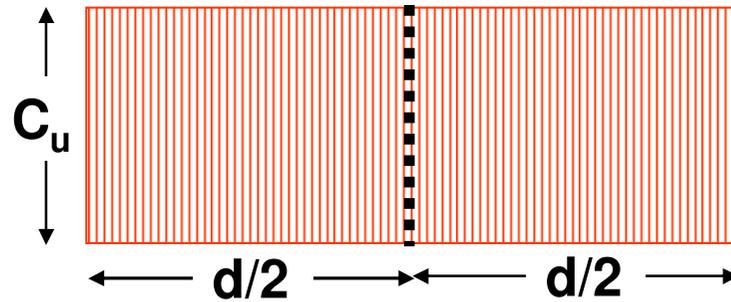
# Veleta



Como el ensaye es rápido se espera una condición no drenada(UU)

$$T = M_s + M_e + M_e = M_s + 2M_e$$

$M_e$  – Asumiendo una distribución uniforme de resistencia al corte



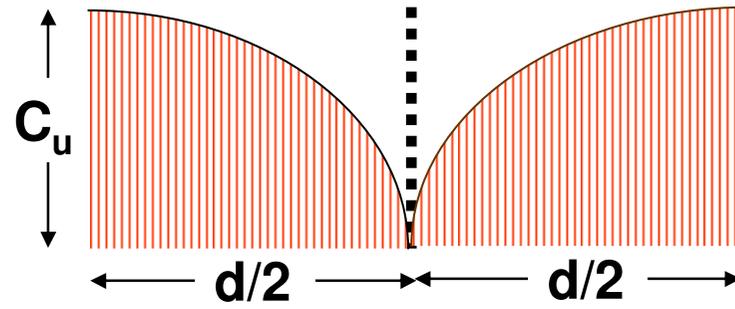
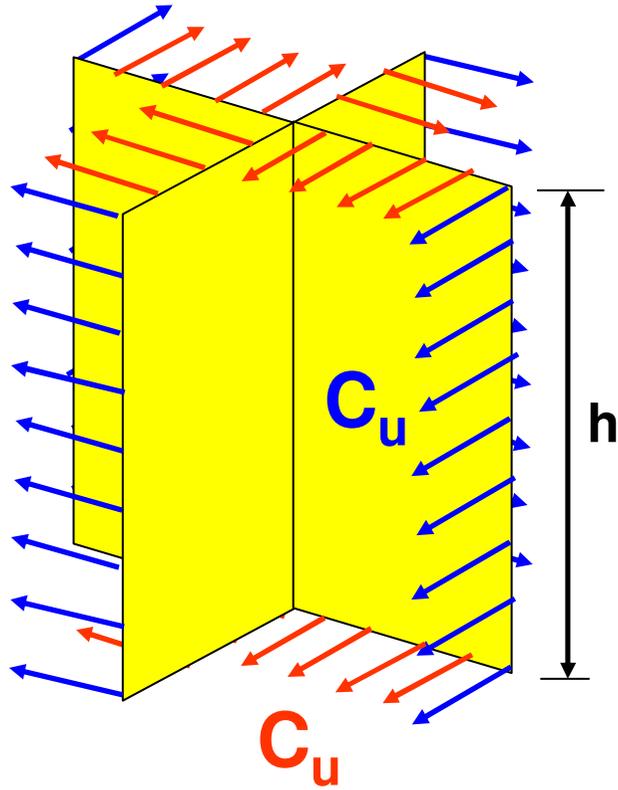
$$M_e = \int_0^{\frac{d}{2}} (2\pi r dr) \cdot C_u r$$

$$M_e = 2\pi C_u \int_0^{\frac{d}{2}} r^2 dr = 2\pi C_u \left[ \frac{r^3}{3} \right]_0^{\frac{d}{2}}$$

$$M_e = \frac{2\pi C_u}{3} \left[ \frac{d^3}{8} \right] = \frac{\pi C_u d^3}{12}$$

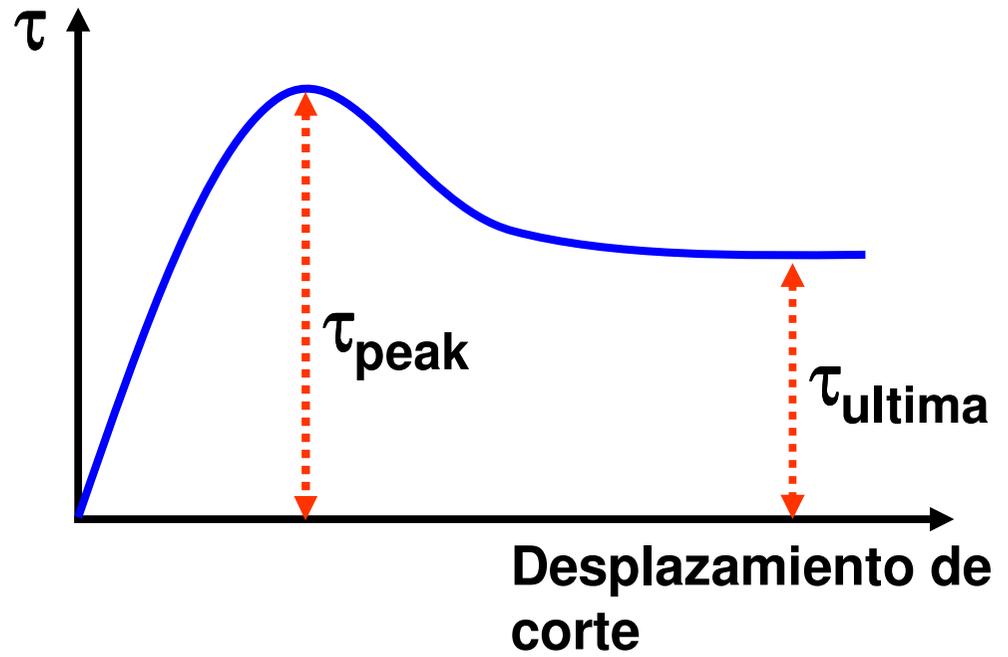
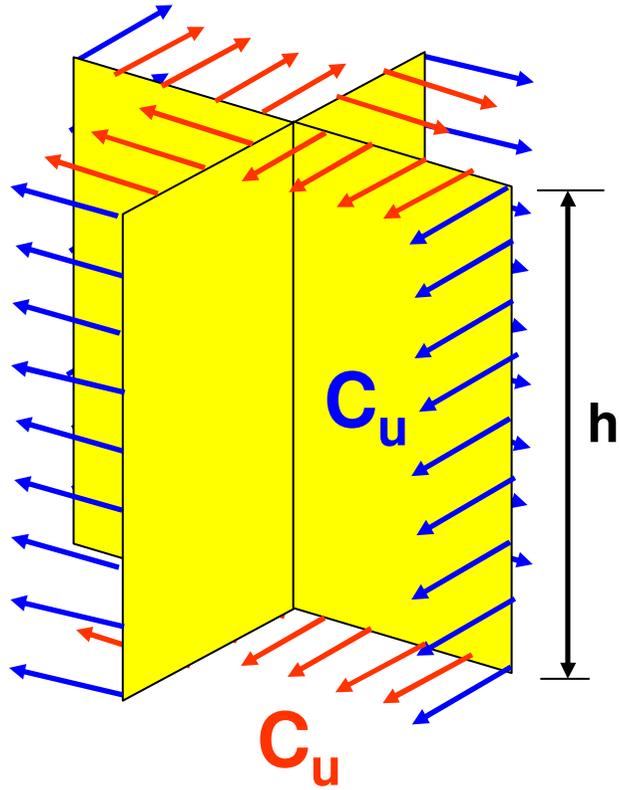
# Veleta

$$T = M_s + M_e + M_e = M_s + 2M_e$$



$$C_u = \frac{T}{\pi \left( \frac{d^2 h}{2} + \frac{3d^3}{20} \right)}$$

# Veleta



Sensibilidad= resist  
peak/resist última

## Corrección de resistencia al corte de veleta

Bjerrum (1974) propuso corregir los valores de terreno,  $C_u$  en aras de la seguridad de los diseños.

$$C_{u(\text{diseño})} = \lambda C_{u(\text{veleta})}$$

**Con,**  $\lambda$  = factor de correccion =  $1.7 - 0.54 \log (IP)$

**IP** = Indice plasticidad

# Torvena

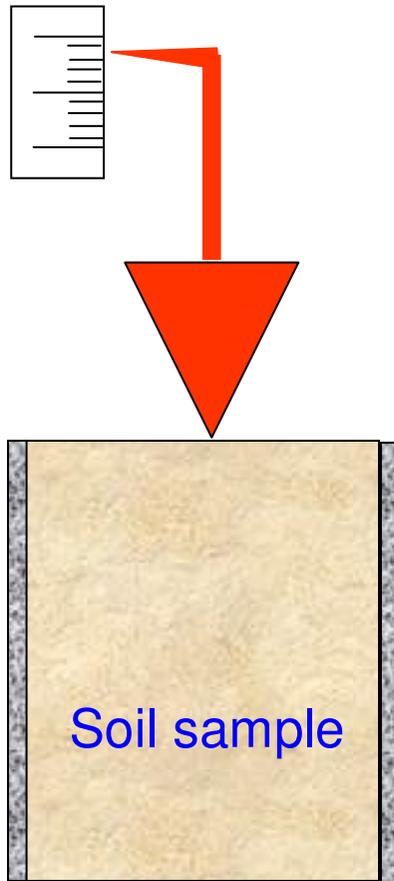


# Penetrometro

Entrega resistencia a compresión no confinada ( $q_u$ ) por medio de resorte calibrado.



# Swedish Fall Cone (suitable for very soft to soft clays)



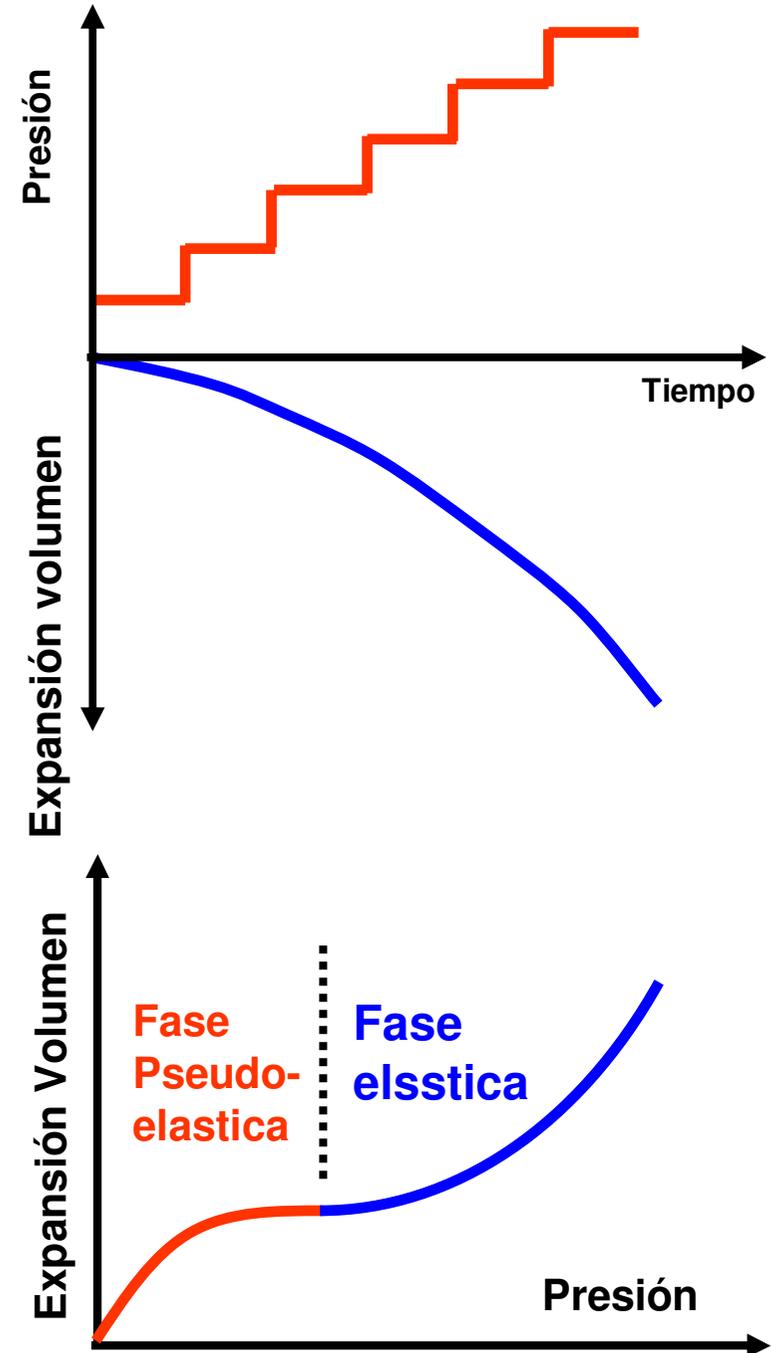
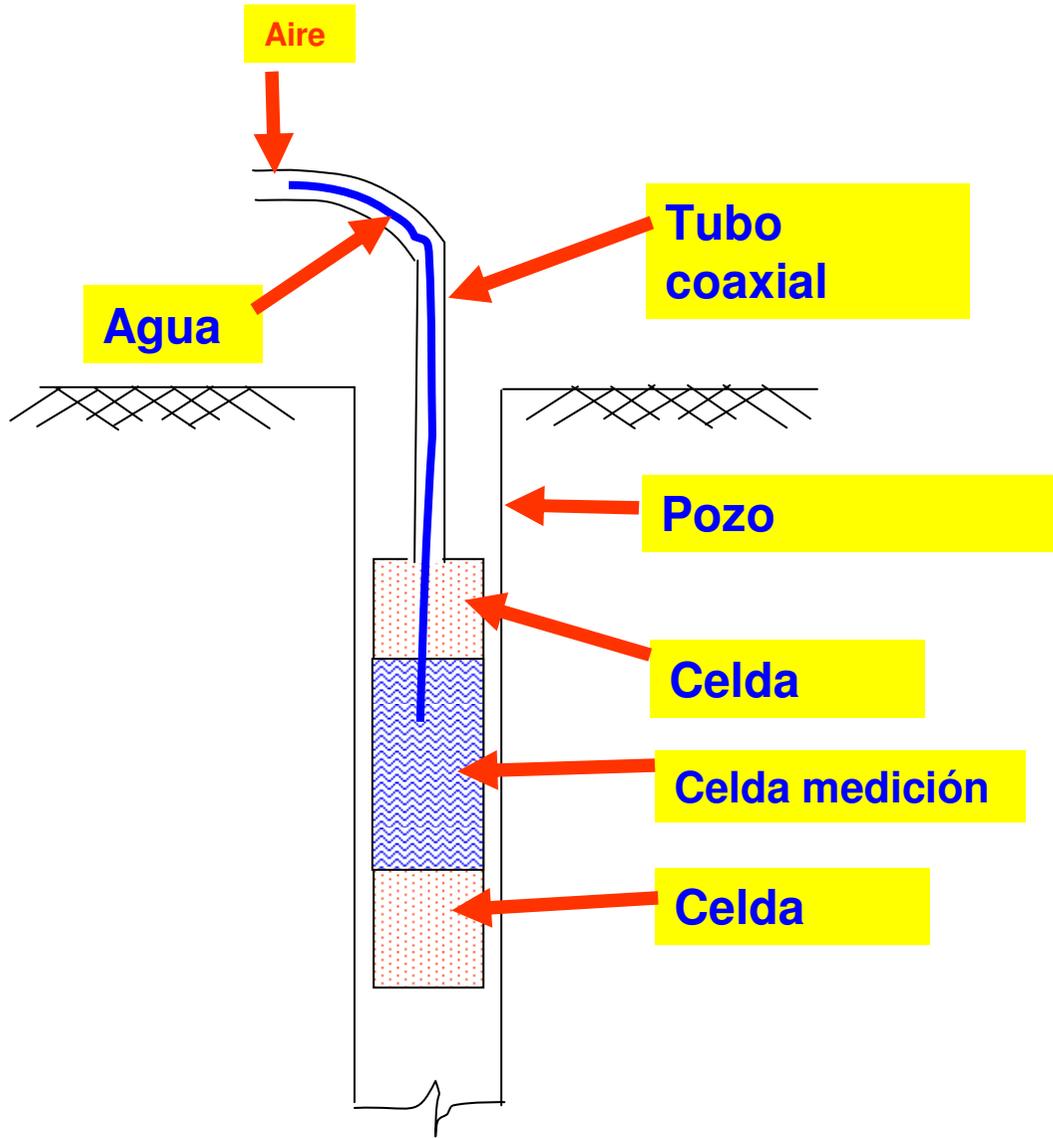
$$C_u \propto \text{Mass of the cone}$$
$$\propto 1/(\text{penetration})^2$$

The test must be calibrated

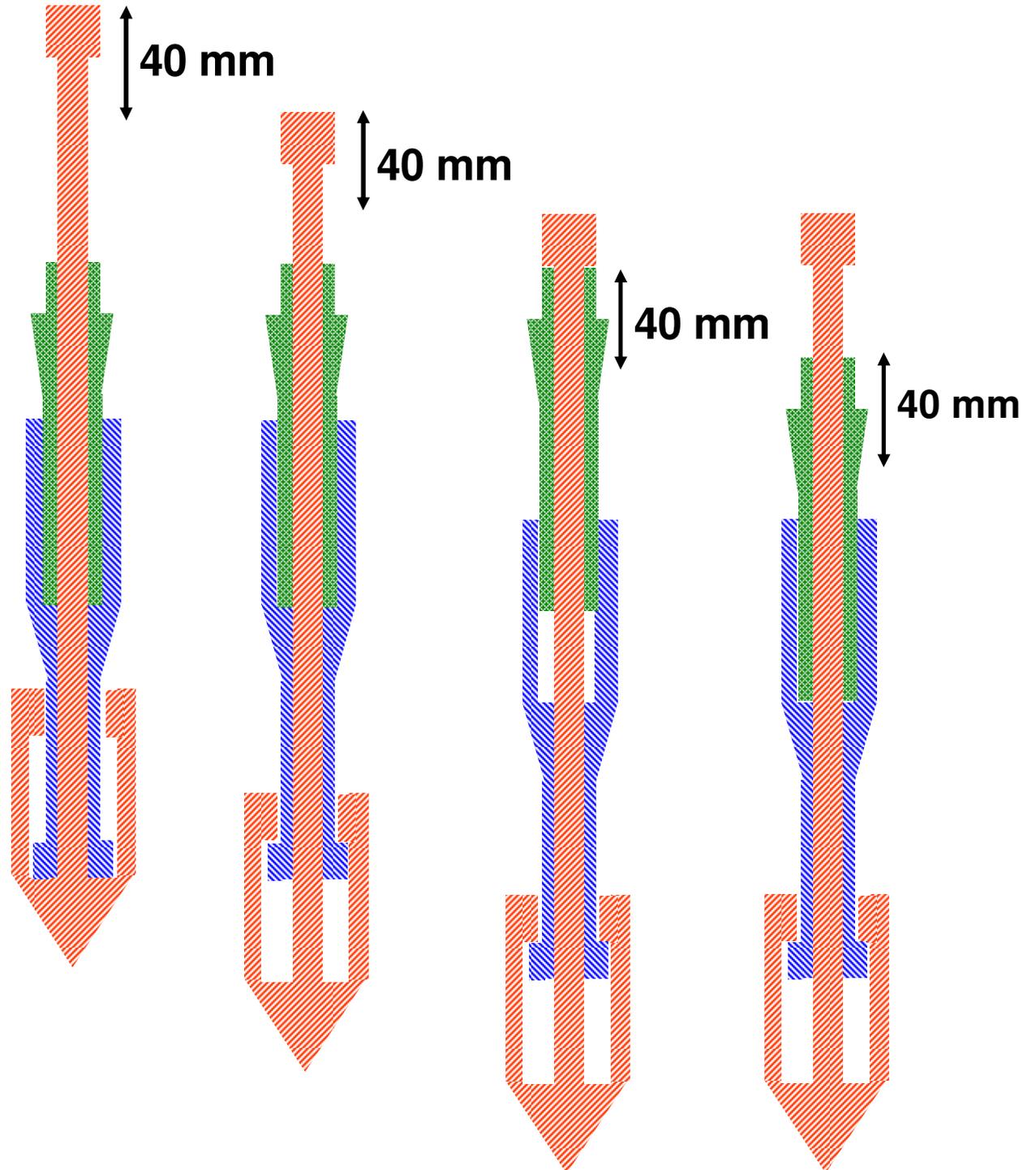
# Presiómetro



# Presiometro (Menard)



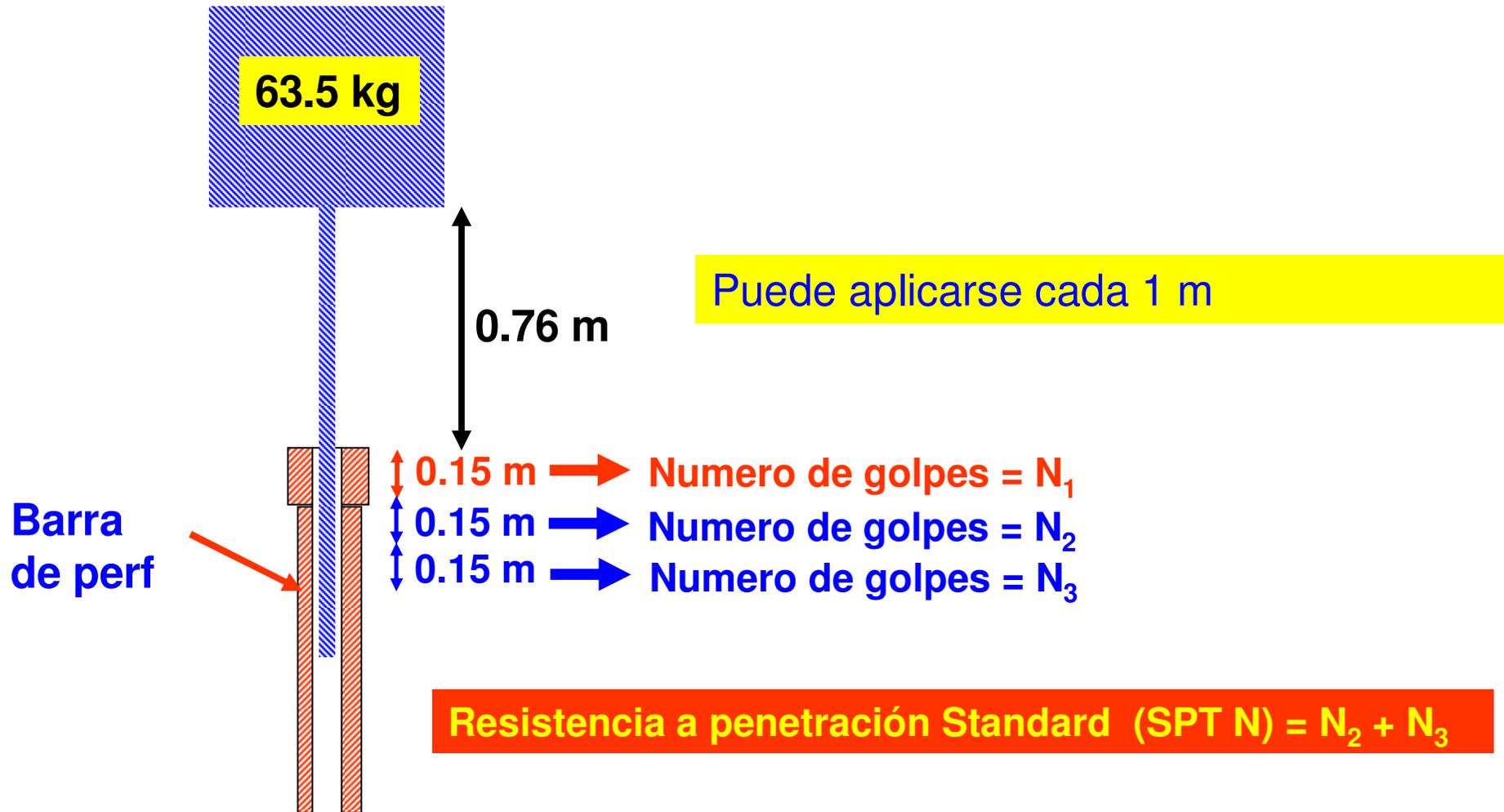
# Penetrometro estatico de cono



Aquellos que pueden medir presiones de poros se les llama piezoconos

# Standard Penetration Test, SPT

Existen diversas coreelaciones (c,  $\phi$ , ect) para  $N$



## VALORES INDICATIVOS DE $\phi$

<b>Arenas, granos redondeados</b>	$\phi$ (grados)
Suelta	27 - 30
Media	30 - 35
Densa	35 - 38
<b>Arenas granos angulares</b>	
Suelta	30 - 35
Media	35 - 40
Densa	40 - 45
<b>Grava con algo de arena</b>	34 - 48
<b>Limos</b>	26 - 35
<b>Arcillas normalmente consolidadas</b>	20 - 30

# Standard Penetration Test, **SPT**



**SPT (Manual operation)**

# Correlaciones para resistencia al corte

Para arcillas NC, la resistencia al corte no drenada ( $c_u$ ) se incrementa con la presión efectiva,  $\sigma'_0$

$$\frac{c_u}{\sigma'_0} = 0.11 + 0.0037(PI) \quad \text{Skempton (1957)}$$

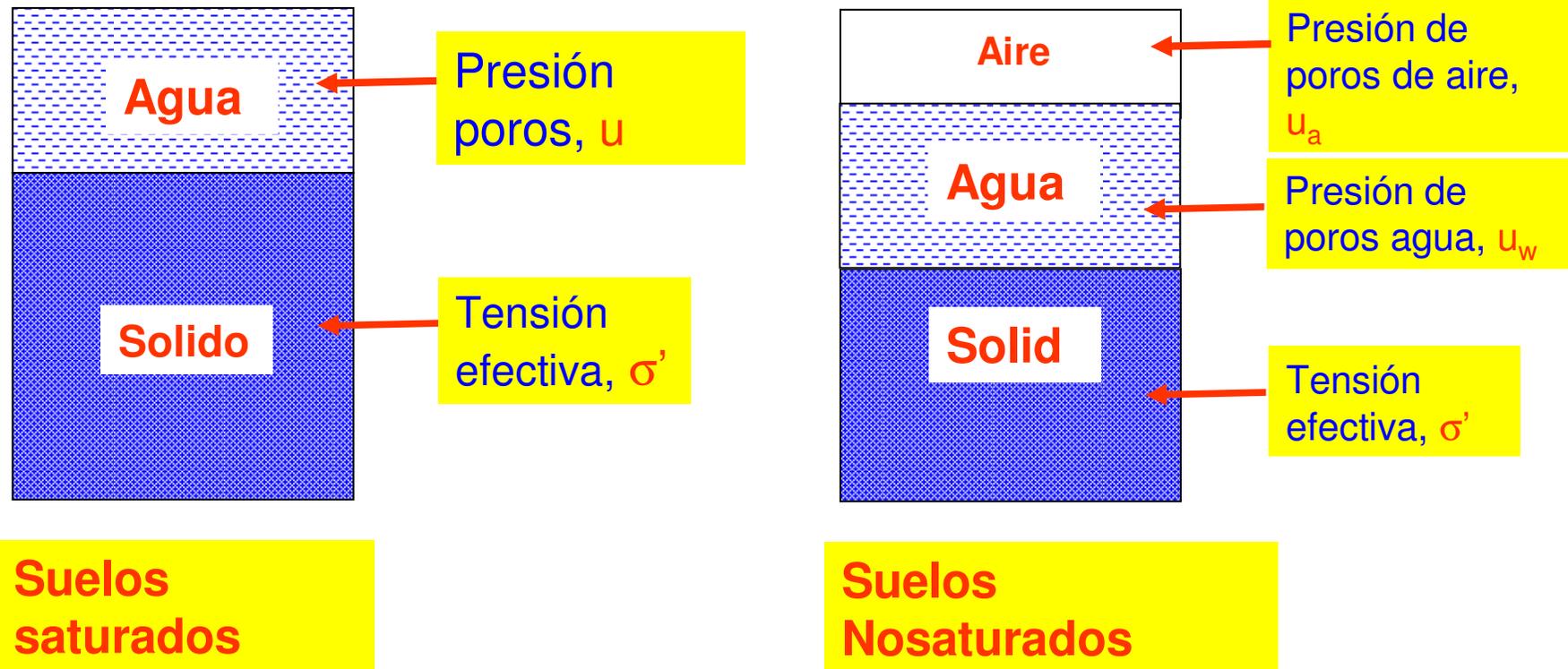
Indice de Plasticidad ( %)

Para arcillas NC, el ángulo de fricción efectivo ( $\phi'$ ) se relaciona con el IP según:

$$\text{Sin } \phi' = 0.814 - 0.234 \log(IP) \quad \text{Kenny (1959)}$$

# Resistencia al corte de suelos parcialmente saturados

En las secciones previas se abordó la resistencia al corte de suelos saturados. Sin embargo, en algunos casos, será necesario estudiar suelos no saturados.



La presión de poros de agua puede ser negativa

## Resistencia al corte de suelos parcialmente saturados

Bishop (1959) propuso una ecuación para la resistencia al corte de suelos no saturados

$$\tau_f = c' + [(\sigma_n - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \tan \phi'$$

Donde,

$\sigma_n - u_a$  = Tensión normal neta

$u_a - u_w$  = Succion

$\chi$  = parametro dependiente del grado de saturación

( $\chi = 1$  para suelos saturados y 0 para suelos secos)

Fredlund et al (1978) modificó dicha relación

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b$$

Donde,

$\tan \phi^b$  = Tasa de aumento de la resistencia al corte con la succión

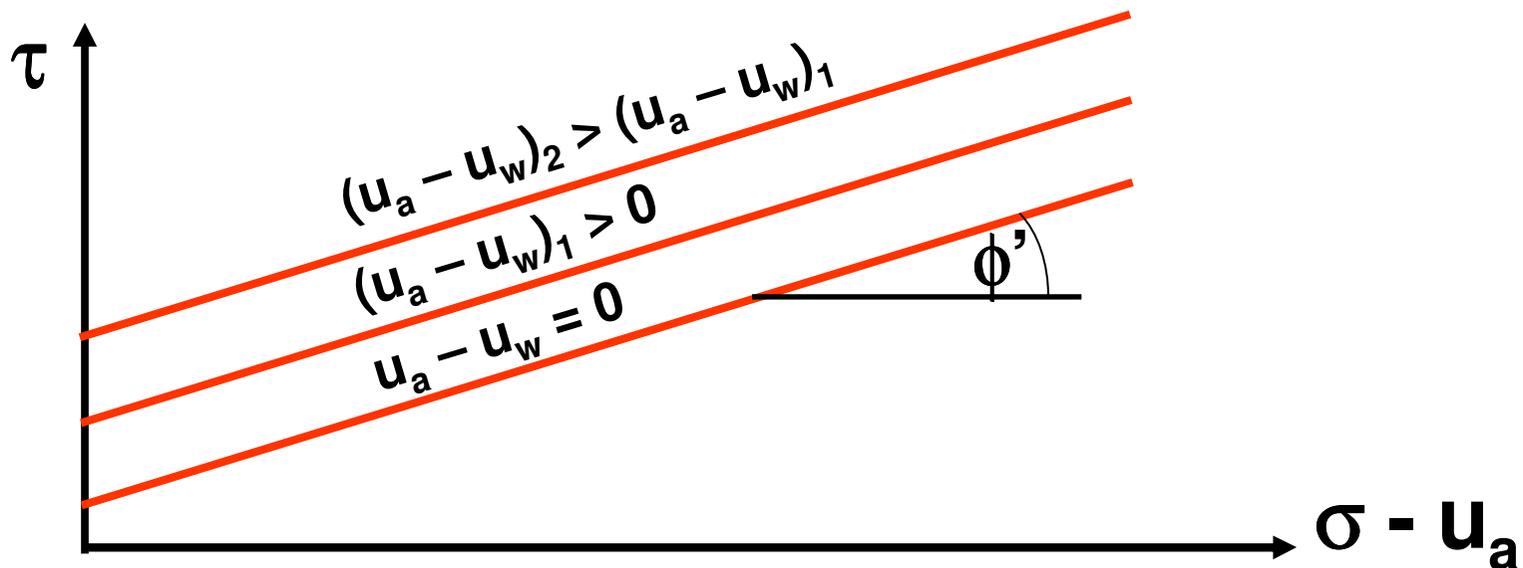
# Resistencia al corte de suelos parcialmente saturados

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b$$

La misma de suelos saturados

Cohesión aparente debida a succión

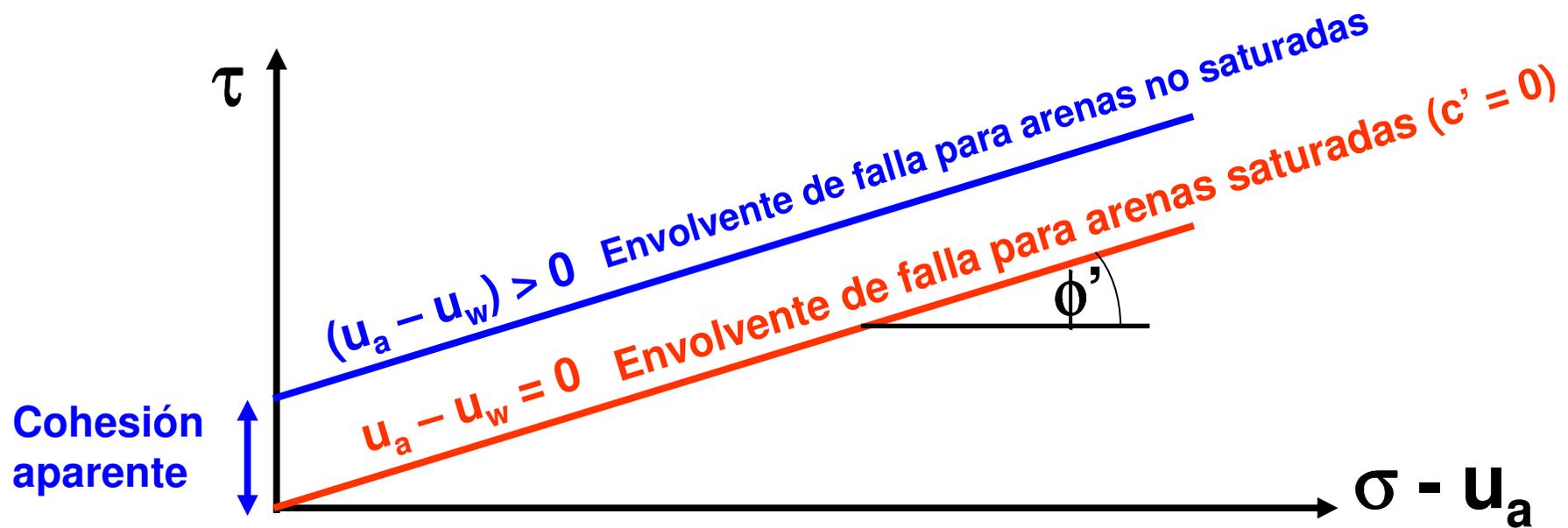
De allí, la resistencia al corte de suelos no saturados es mayor que la de los saturados debida a la succión

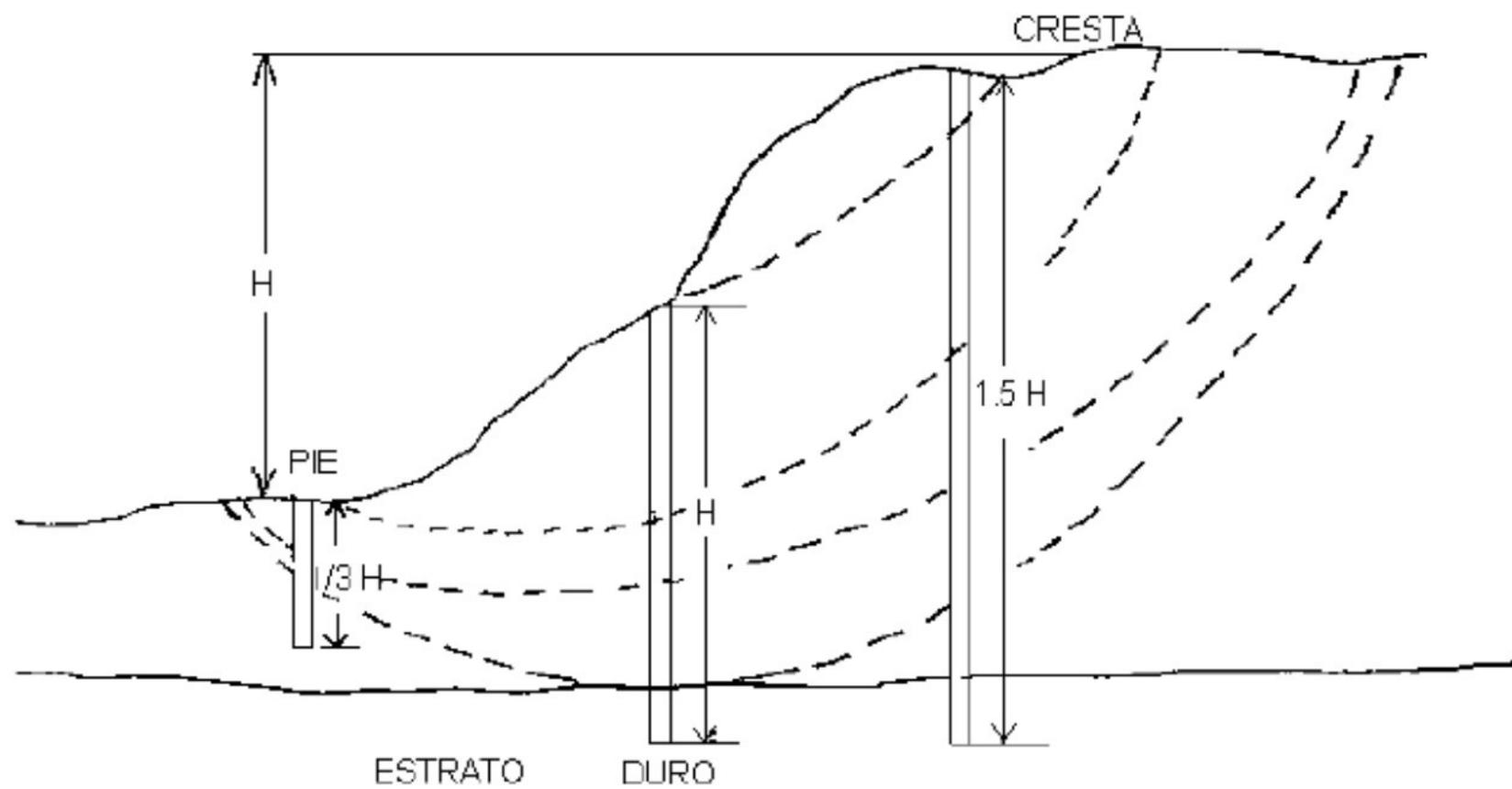


$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b$$

La misma de arenas saturadas

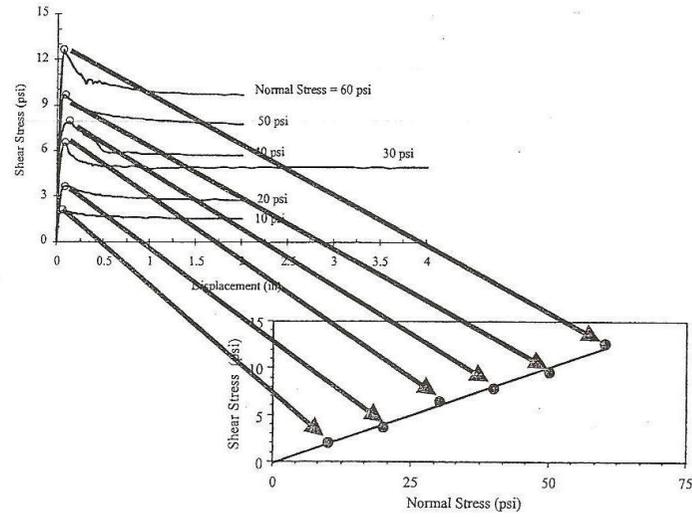
Cohesión aparente



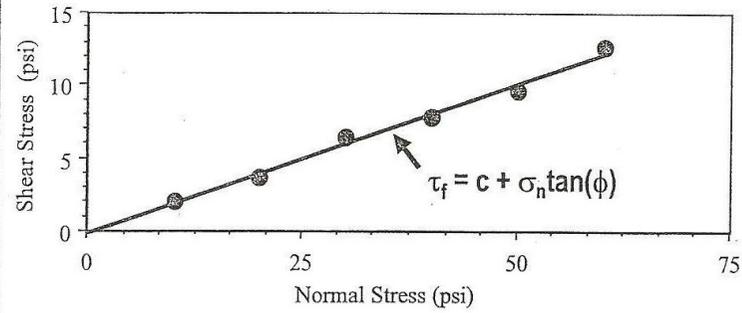


## Peak Failure Envelope

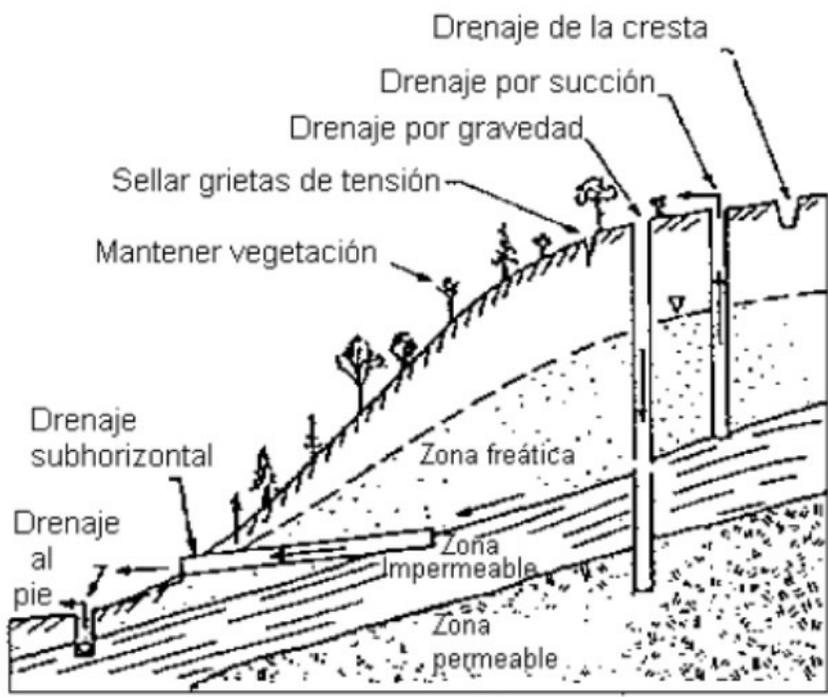
Non-Woven Geotextile/Smooth Geomembrane



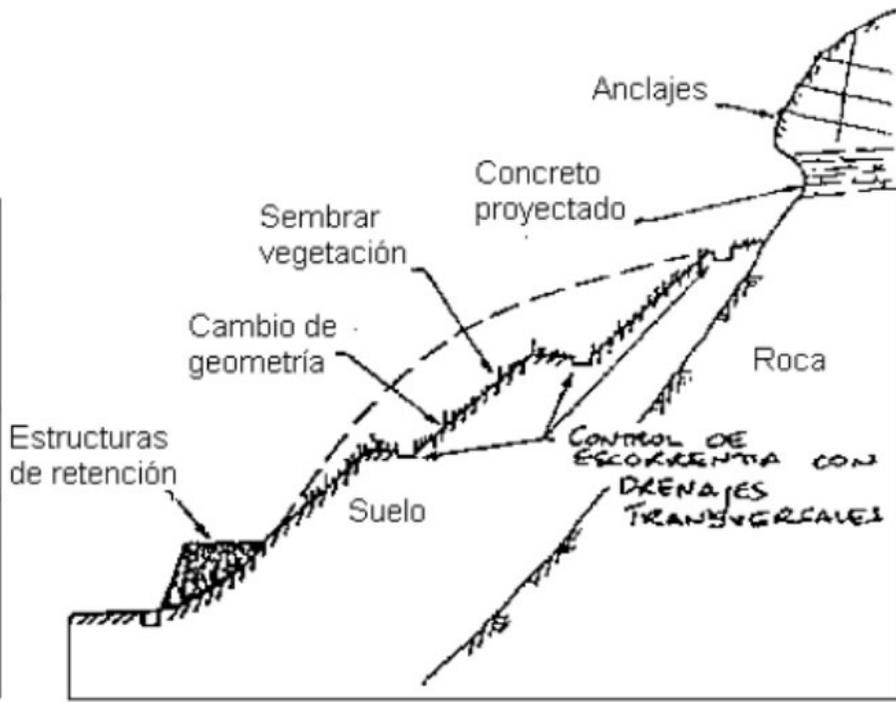
## Peak Failure Envelope



$$c_p = 0 \text{ psi}, \phi_p = 11.5^\circ$$



(a)



(b)