FACULTAD DE INGENIERÍA

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Maestría en Ingeniería Geotécnica - MIG
(Carrera Binacional Argentina - Alemania)

Asignatura ACMIG03:

Comportamiento Mecánico de Suelos

Dr. Juan Pablo Ibañez
juan.pablo.Ibanez@ingenieria.uncuyo.edu.ar
+54 261 5796326

FACULTAD DE INGENIERÍA

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Maestría en Ingeniería Geotécnica - MIG
(Carrera Binacional Argentina - Alemania)

Resistencia al Corte en Suelos

ACMIG03: Comportamiento Mecánico de Suelos

Dr. Juan Pablo Ibañez

juan.pablo.Ibanez@ingenieria.uncuyo.edu.ar

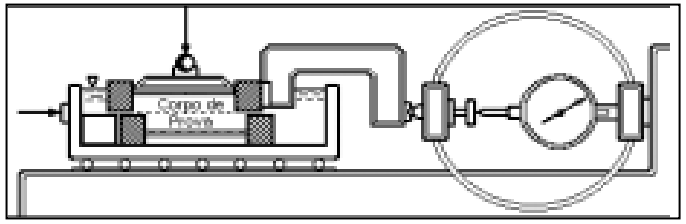
+54 261 5796326

Ensayo de corte directo

• Este ensayo fue utilizado en las primeras mediciones de resistencia de una masa de suelos por **Coulomb** en **1776**.

• Se mide:
- fuerza T;
- desplazamiento horizontal δ;
- desplazamiento vertical ΔH;

• Es conocida la fuerza vertical N;



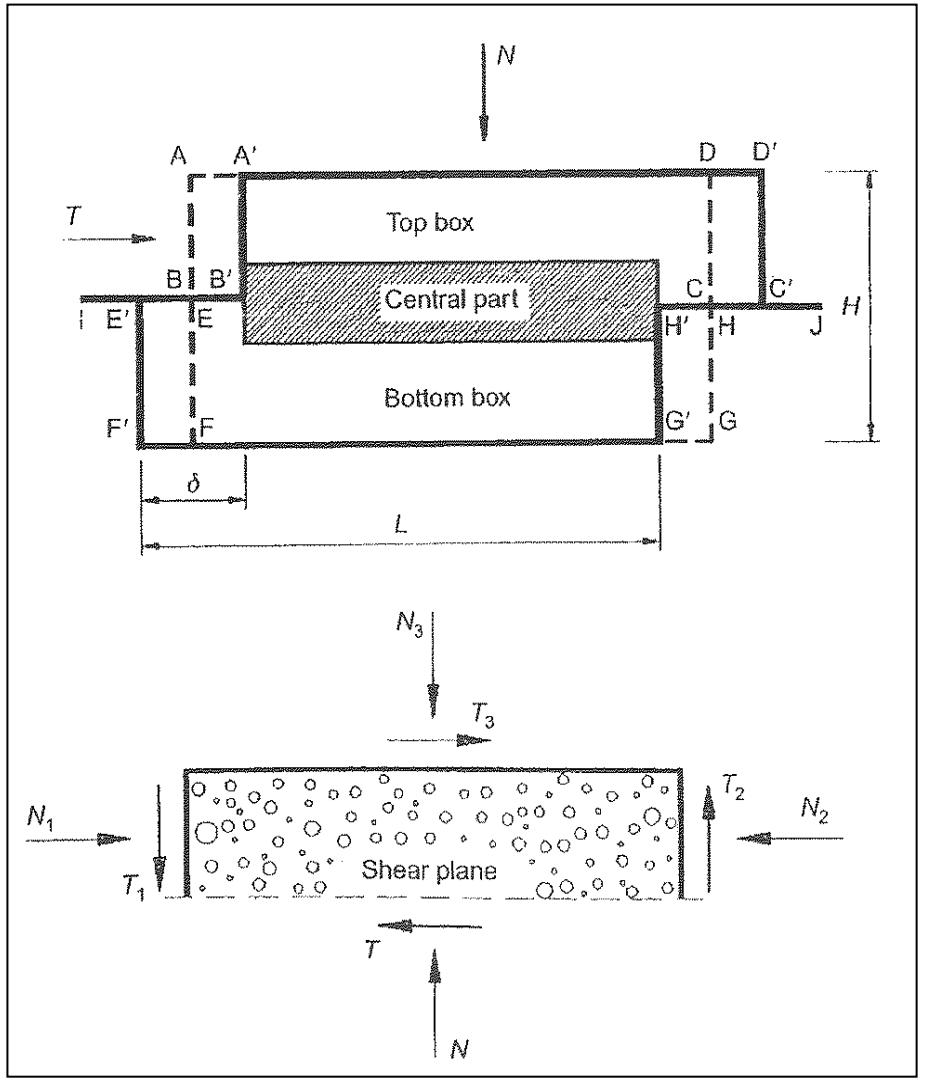
• La caja está separada por la zona media.

• Tiene una placa rígida superior que se apoya directamente en el suelo y es donde se aplica una carga vertical P.

• La parte superior de la caja tiene acoplado un aro medidor que impide el desplazamiento y mide la fuerza horizontal.

• El esfuerzo de corte en la probeta de suelo se induce mediante la imposición de un desplazamiento a velocidad constante de la parte inferior de la caja.

• El desplazamiento relativo moviliza la resistencia del suelo.



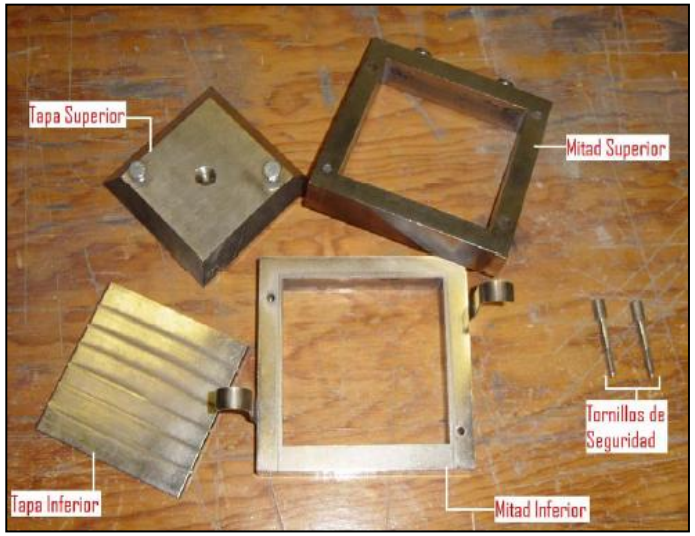
Ensayo de corte directo



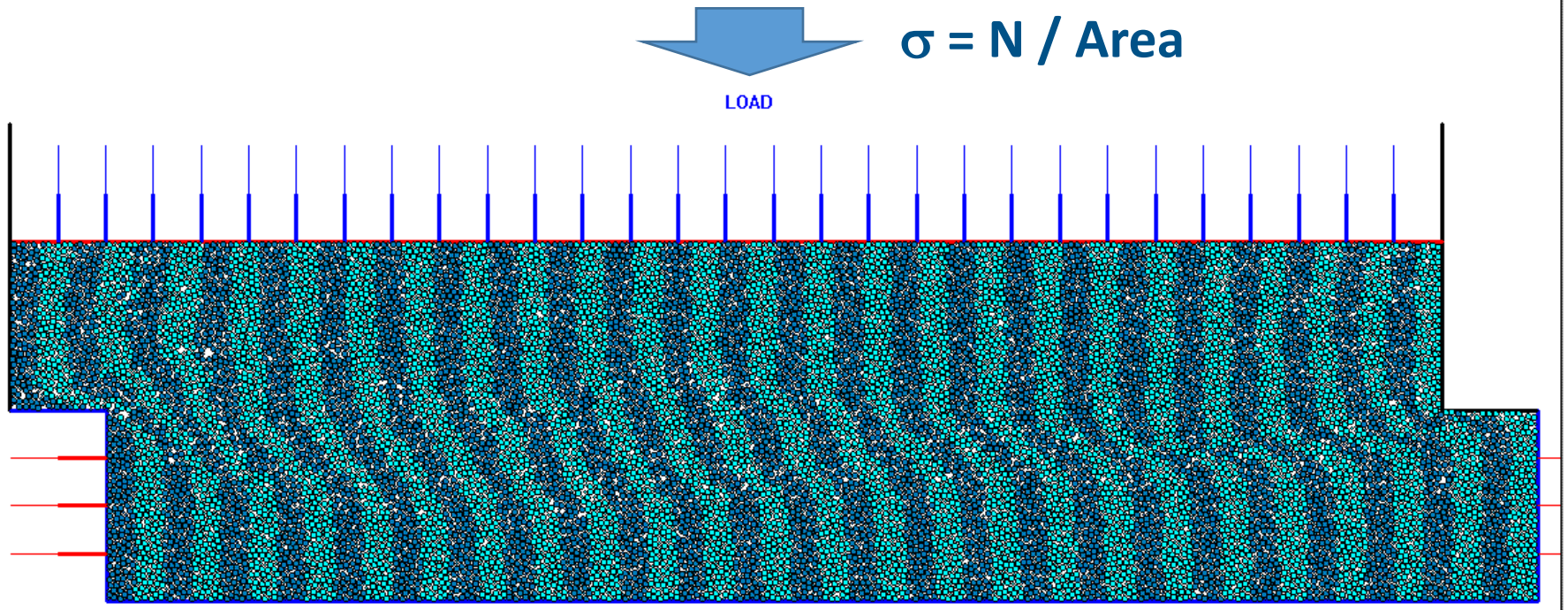








Ensayo de corte directo



Modelo de elementos discretos tipo disco circular

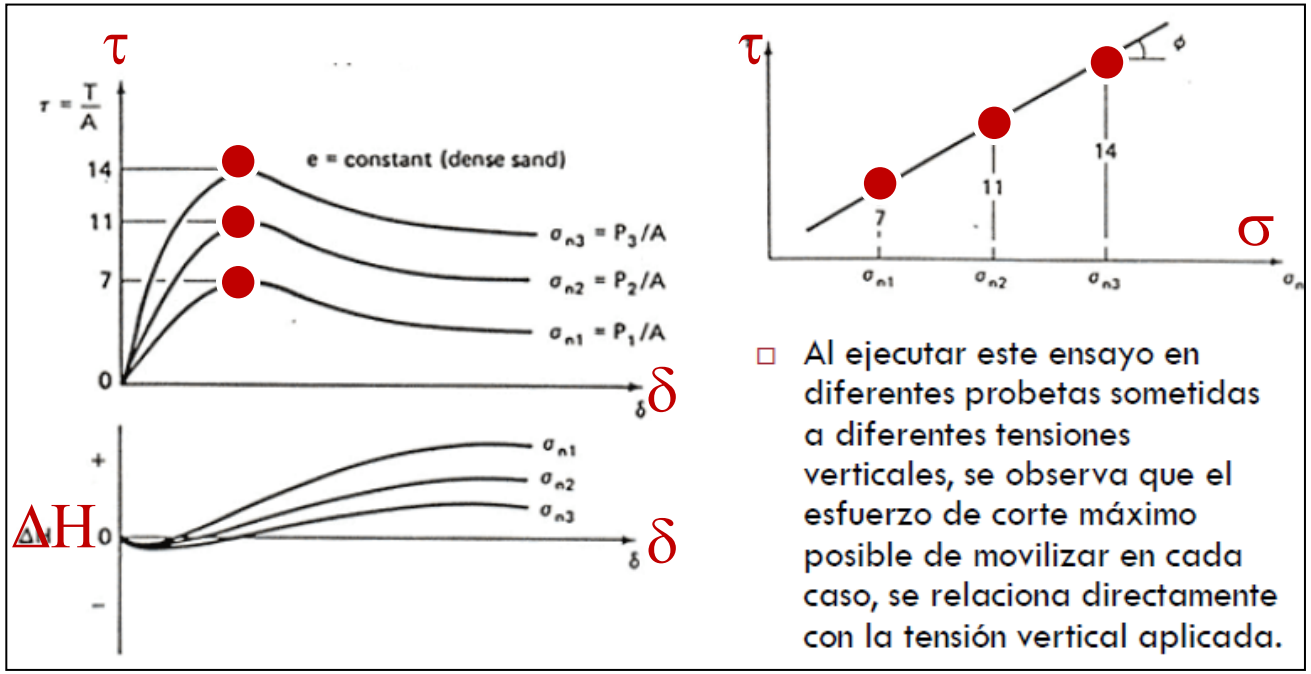
El ensayo se realiza con **3 probetas** que son cizalladas para **3 tensiones verticales crecientes**, por ejemplo:

- σ = 0.05MPa
- σ = 0.10MPa
- σ = 0.20MPa

Ensayo de corte directo

Arena densa o arcilla PC

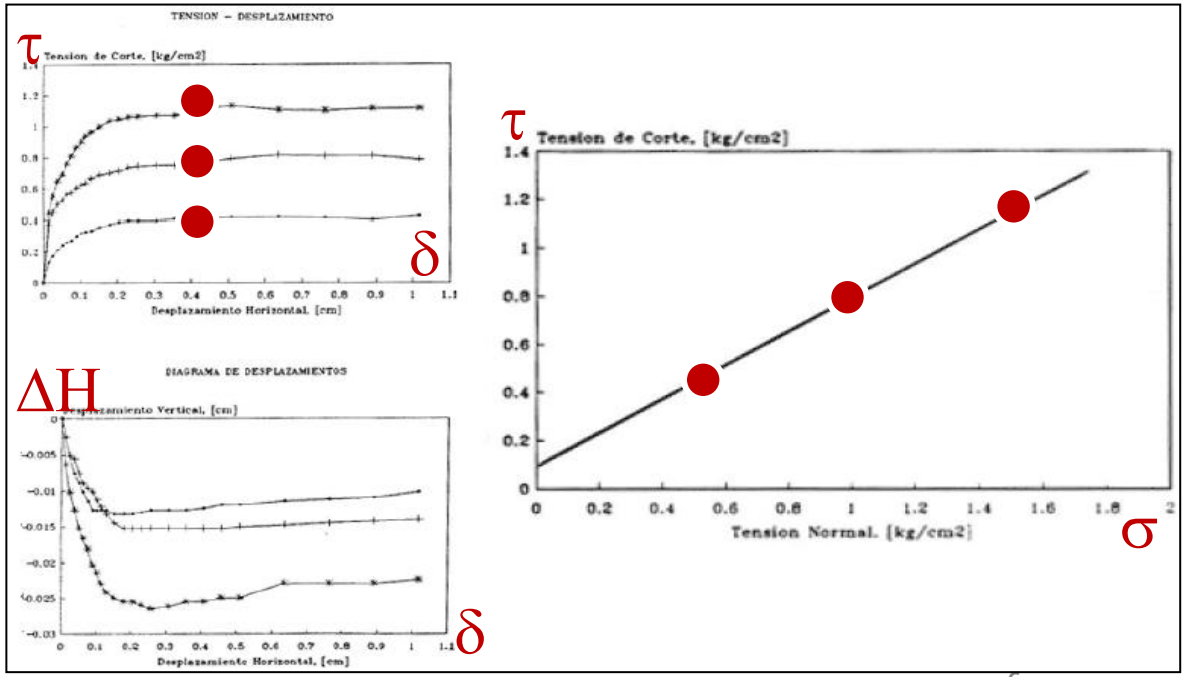
- La resistencia al corte aumenta con la tensión confinante P;
- **Se produce un pico** de resistencia asociado a un comportamiento volumétrico **dilatante**.
- Esta tendencia disminuye para altos confinamientos P;



- Al ejecutar este ensayo en diferentes probetas sometidas a diferentes tensiones verticales, se observa que el esfuerzo de corte máximo posible de movilizar en cada caso, se relaciona directamente con la tensión vertical aplicada.

Arena suelta o Arcilla NC

- La resistencia al corte aumenta con la tensión confinante P;
- No se produce pico de resistencia y el comportamiento volumétrico es de **contracción**.
- Esta tendencia aumenta con el confinamiento P;



Ensayo de corte directo

- El ensayo generalmente se realiza bajo deformación controlada;
- Dependiendo de la velocidad de avance, es posible desarrollar en limos y arcillas una condición cercana a la no drenada.
- En arenas se debe aplicar una velocidad de baja para asegurar una condición drenada.
- A partir de los resultados de las 3 probetas ensayadas se trazan las rectas envolventes de falla para los valores pico y residual, y se obtienen los parámetros de resistencia al corte C y ϕ.

Los equipos de corte directo no permiten la medición de las tensiones normales horizontales, por lo que no es posible dibujar los círculos de Mohr asociados a la falla.

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

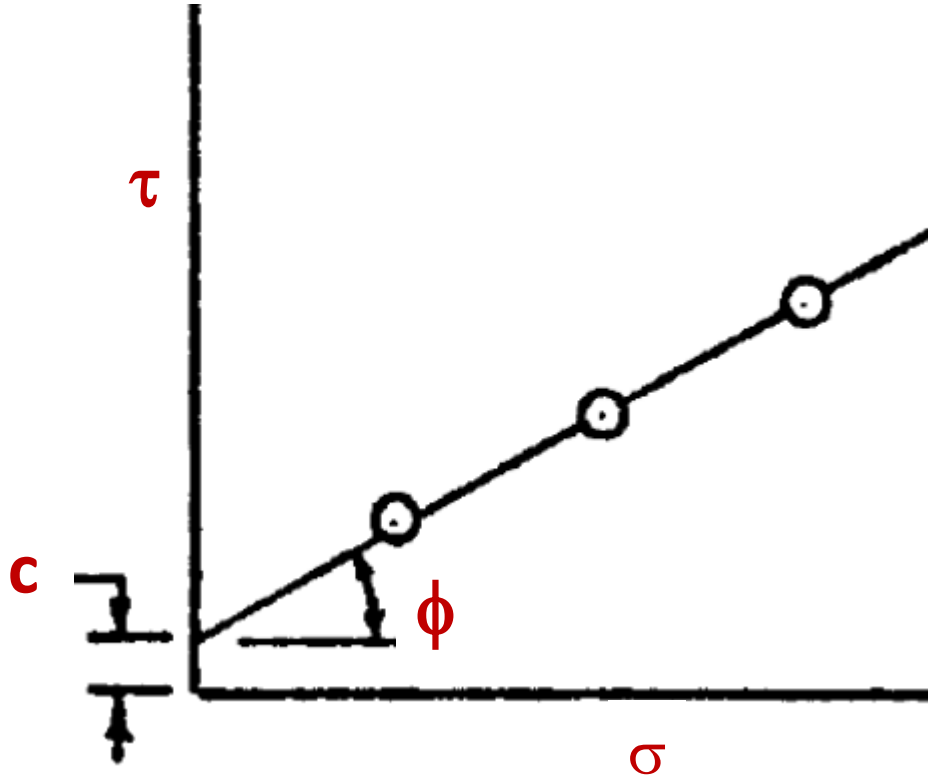
Donde:

τ: Resistencia al corte

C: Cohesión

σ: Esfuerzo normal.

ϕ: Ángulo de fricción interna.

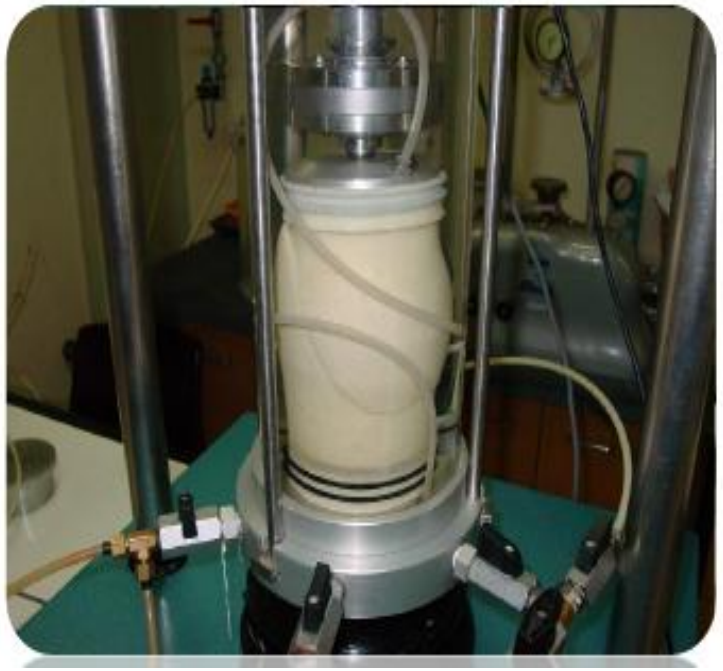


Ensayo triaxial: Suelos

- La probeta cilíndrica es ensayada en una cámara que permite el control de las tensiones verticales y radiales.
- El plano de falla no se induce como en el corte directo, sino que se controlan las tensiones principales.

Esta diferencia conceptual se refleja en la esbeltez de la probeta

Ensayo triaxial (relación del esbeltez de 2 en general)



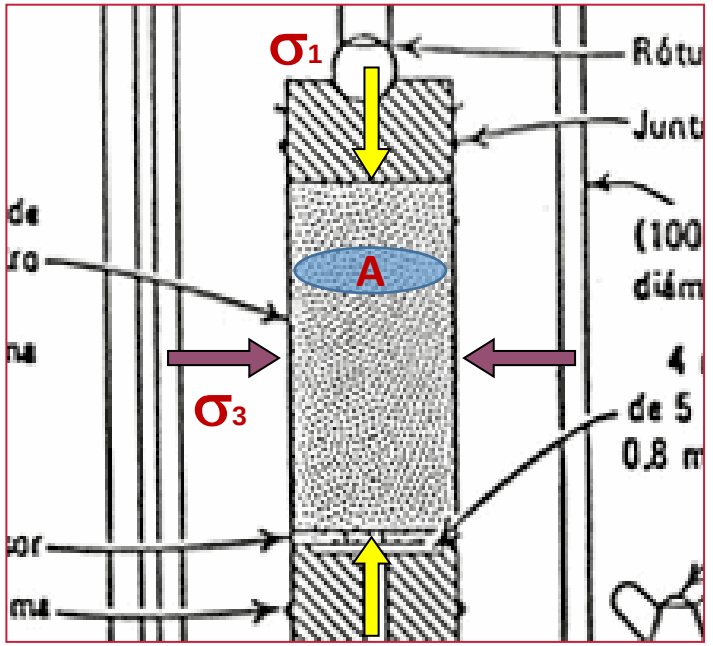
≠

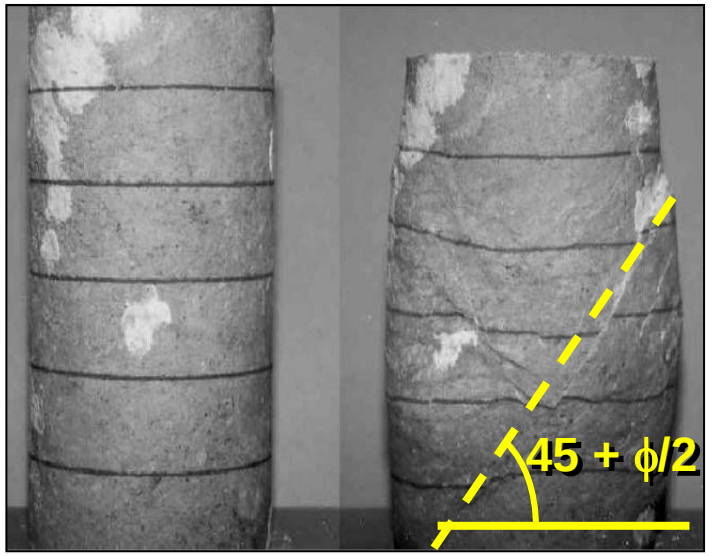


Ensayo de corte directo (relación del esbeltez <<1)

Ensayo triaxial

- La **presión de cámara** permite confinar isótropamente la probeta.
- Las dos **tensiones horizontales** son iguales (σ_3).
- Mediante el pistón axial se aplica una carga vertical denominada **desviador de tensiones P** ($\sigma_1 = P/A + \sigma_3$).
- Así, las **tensiones** aplicadas a la probeta **son principales**.
- Este equipo permite la **saturación de las muestras** mediante la aplicación de una contrapresión al interior de la probeta.
- Además, permite la medición de los cambios en la **presión de poros**, con lo cual es posible conocer las tensiones efectivas en todo momento.
- El ensayo tiene dos partes:
  - 1°) Aplicación de la presión de cámara
  - 2°) Aplicación del desviador de tensiones hasta la rotura





Ensayo triaxial

Condición de drenaje durante el ensayo:

1°) Aplicación de la presión de cámara σ_3

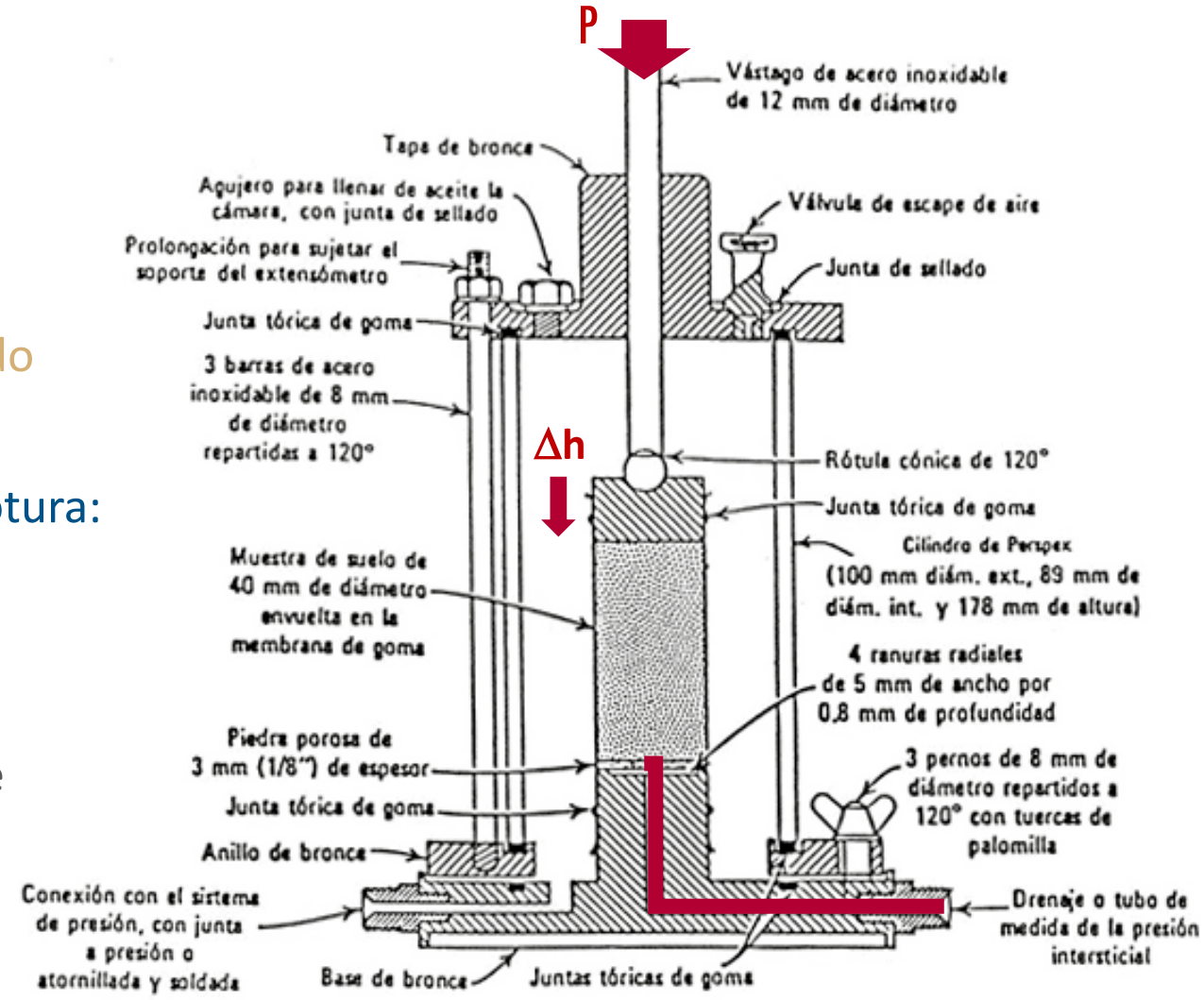
- Válvula de drenaje de la probeta cerrada: No Consolidado
- Válvula de drenaje de la probeta abierta: Consolidado

2°) Aplicación del desviador de tensiones P hasta la rotura:

- Válvula de drenaje de la probeta cerrada: No drenado
- Válvula de drenaje de la probeta abierta: Drenado

En función de la combinación de estas condiciones de drenaje de la probeta, tenemos los ensayos:

- **UU:** Ensayo No Consolidado - No Drenado **[Q]**
- **CD:** Ensayo Consolidado - Drenado **[S]**
- **CU:** Ensayo Consolidado - No Drenado **[R]**



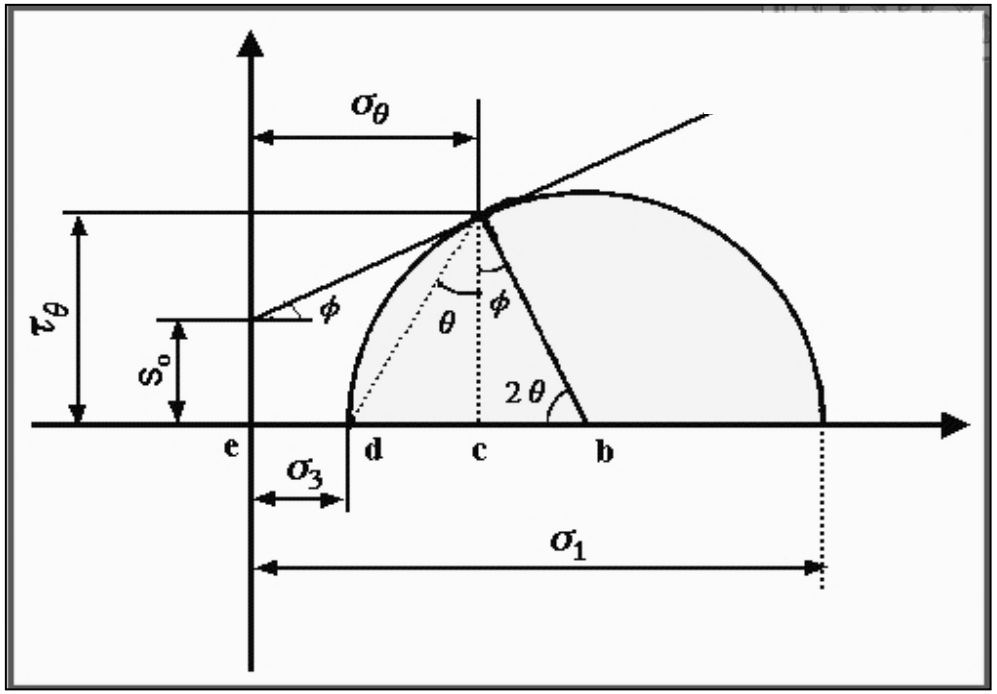
Válvula y tubo de drenaje y medición de las presiones de poros

Ensayo triaxial: Suelos

- Se ensayan al menos **3 probetas** de suelo de las mismas características, para **presiones de cámara crecientes**.
- De cada probeta ensayada se obtienen los valores **σ_1 y σ_3 en rotura**, y con ello se puede trazar un **circulo de Mohr**.
- La recta envolvente a los círculos es la envolvente de falla, cuyos parámetros son **"c" y "ϕ"**, que es el **resultado final del ensayo triaxial**.

La **Envolvente de Falla**:

- es **tangente** a los círculos de Mohr asociados a la falla.
- corresponde a la relación de Mohr-Coulomb para la **rotura**.
- *Los parámetros c y ϕ, obtenidos son parecidos pero no iguales a los de corte directo.*



$$\sigma'_1 = \sigma'_3 N_\phi + 2c\sqrt{N_\phi}$$

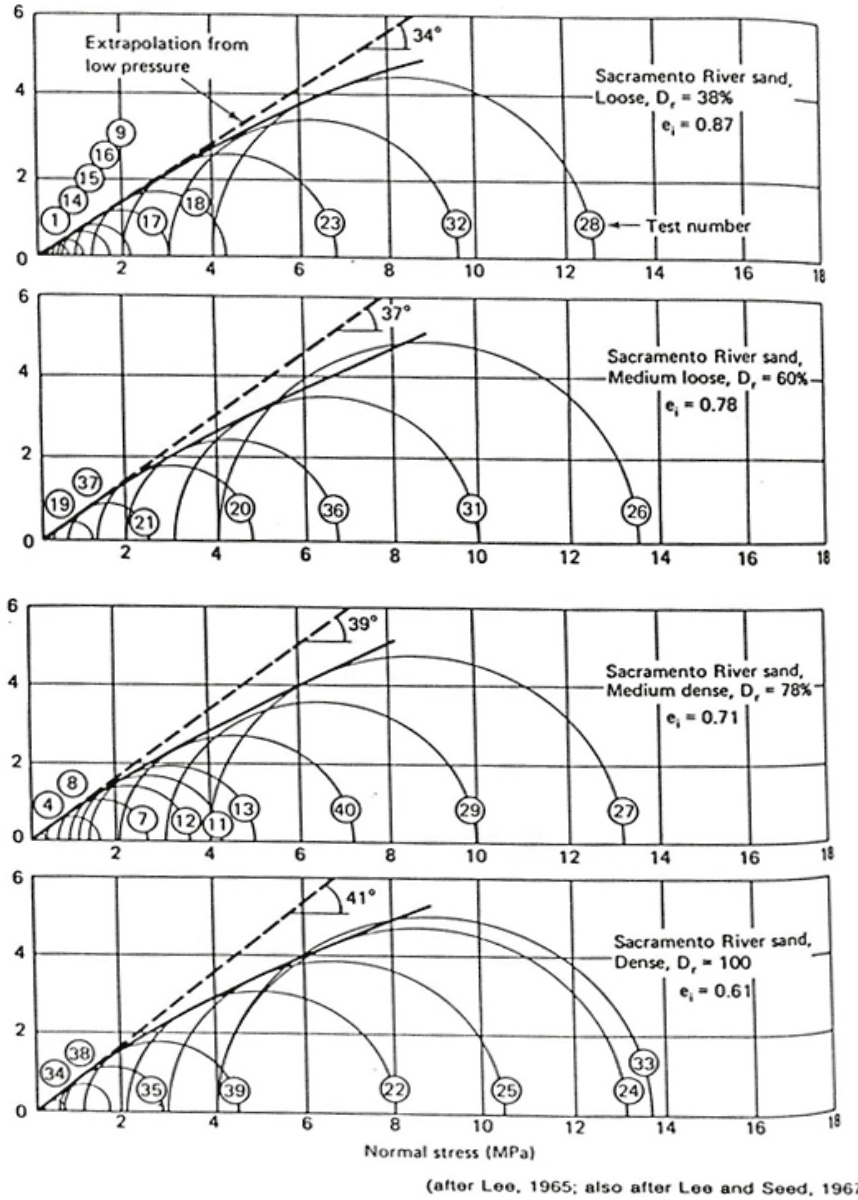
$$N_\phi = \mathrm{tg}^2(45 + \phi/2)$$

$$\tau = \sigma \tan(\phi) + c$$

Ensayo triaxial: Suelos

Ensayo CD: Consolidado - Drenado

- Se utiliza en general para **suelos granulares**, en los que el **drenaje se produce rápidamente**.
- Las **válvulas** de drenaje siempre están **abiertas**.
- Por lo tanto, **no se producen presiones de poro** en la probeta.
- Simula la condición a largo plazo.
- En suelos arenosos, el valor del **ángulo de fricción interna ϕ´ crece con la densidad** de la arena.
- Para **altos confinamientos, el valor de ϕ´ disminuye**, debido la rotura de los bordes de granos angulosos o al quiebre de granos de baja resistencia.



(after Lee, 1965; also after Lee and Seed, 1967).

Mido: Δh, área final, P

ϕ´ crece con la densidad de la arena

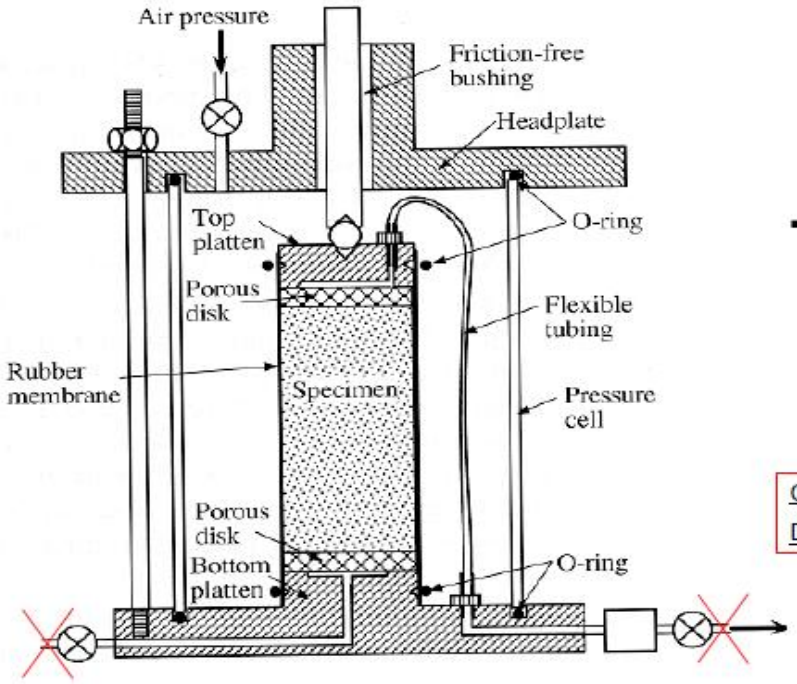
La relación de vacíos "e" disminuye con la densidad de la arena

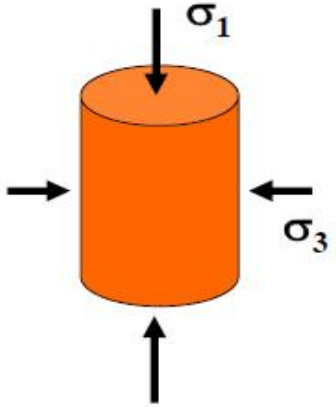
Ensayo triaxial

Ensayo UU: No Consolidado – No Drenado

- Se utiliza en general para **suelos finos saturados**, en los que el **drenaje se produce muy lentamente**.
- Simula la condición a **corto plazo**.
- Las **válvulas** de drenaje siempre están **cerradas**.
- Por lo tanto, se producen **presiones de poro (u)** en la probeta.

Medición de s_u: ensayo triaxial no drenado (Q)

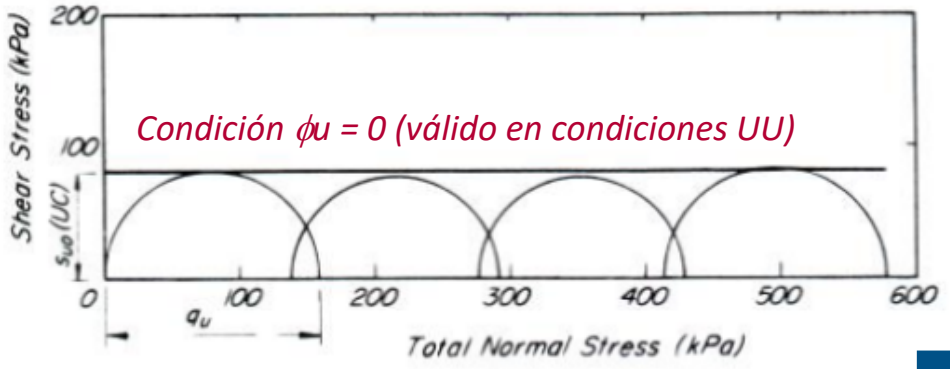




Cámara: *Drenaje Impedido*
Desviador: *Drenaje Impedido*

Ensayo Rápido (Q) – Determinación de la resistencia al corte no drenada: s_u (a veces denominada c_u)

La presión de poros toma la totalidad de la presión de cámara.
Por eso los círculos de Mohr son de igual tamaño para diferentes presiones.



Mido: Δh, P, u

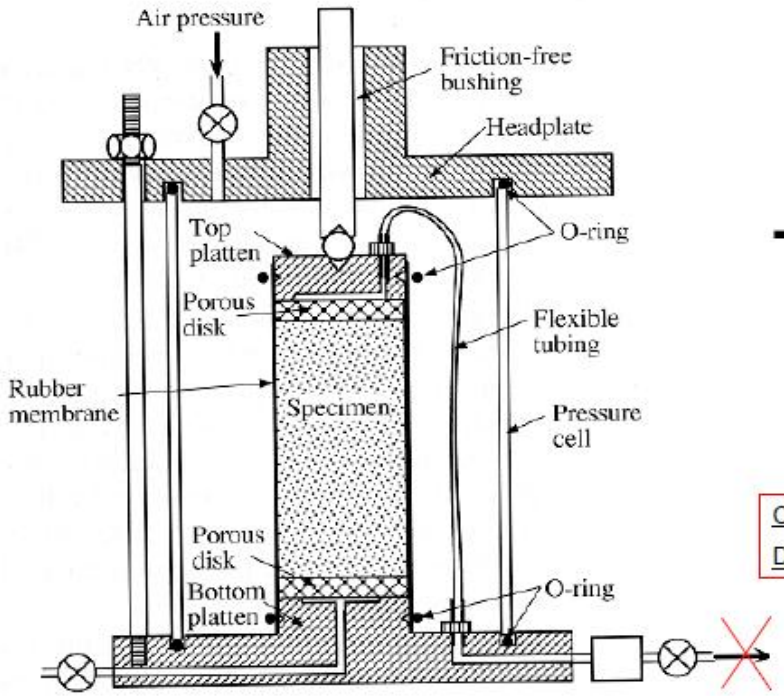
- Suelos Saturados: $\phi_u=0$ y $s_u>0$
- Resistencia a la Compresión Simple q_u es un ensayo económico para determinar la resistencia al corte no dranada s_u.

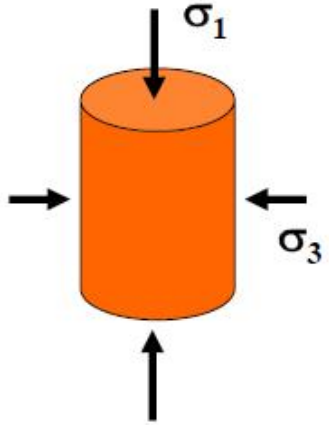
Ensayo triaxial

Ensayo CU: Consolidado – No Drenado

- Se utiliza en general para **suelos con drenaje lento**.
- Simula la condición a **corto plazo**.
- Las **válvulas** de drenaje están *abiertas para consolidar* y *cerradas durante la aplicación del desviador*.
- Por lo tanto, se producen **presiones de poro (u)** en la probeta.

Ensayo triaxial Consolidado - no drenado (R)

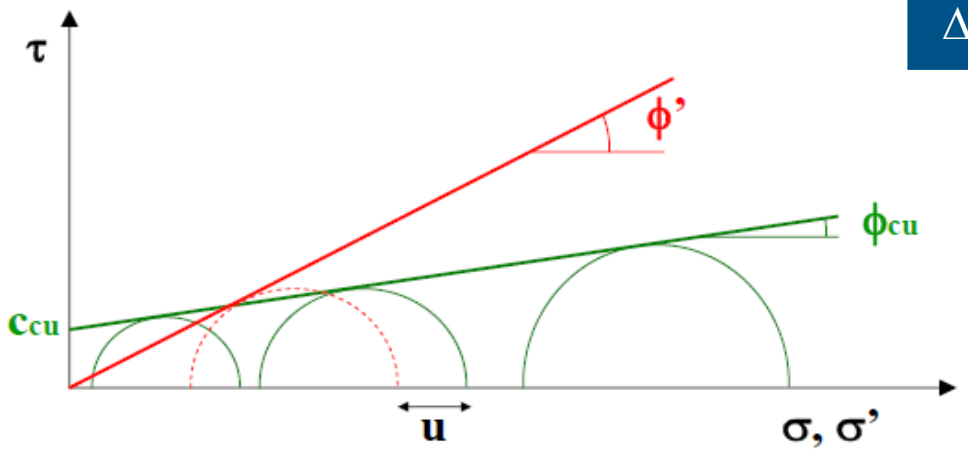




Cámara: *Drenaje Permitido*
Desviador: *Drenaje Impedido*

Ensayo Consolidado - No drenado (R):
Determinación de los parámetros c_{cu} y ϕ_{cu}

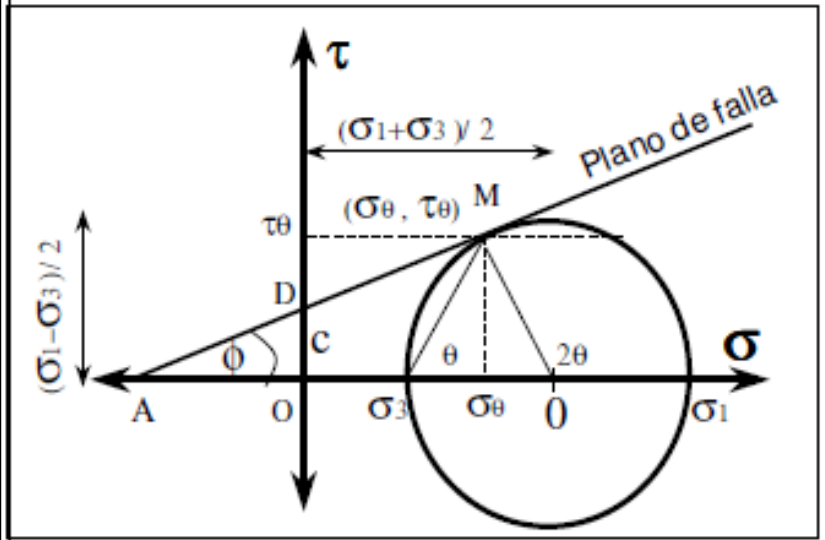
Mido:
Δh, P, u



- El ensayo $\overline{R}$ es el mismo ensayo R pero midiendo las presiones intersticiales. Los valores de cohesión y fricción obtenidos coinciden con los correspondientes a los ensayos drenados.

Relaciones del circulo de Mohr

RELACION MOHR-COULOMB



θ = ángulo que forma el plano de rotura con el plano principal

En la falla :

$$\theta = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}$$

$$\sigma 1 = \sigma 3 + 2r \qquad (1)$$

$$\text{sen } \phi = r / (c / \text{tg } \phi + \sigma 3 + r)$$

$$r = \frac{c \cos \phi}{1 - \text{sen } \phi} + \frac{\sigma 3 \ \text{sen } \phi}{1 - \text{sen } \phi}$$

Reemplazando en (1)

$$\sigma 1 = \sigma 3 + 2\, r = \sigma 3 + 2 \left(\frac{c \cos \phi}{1 - \text{sen } \phi} + \frac{\sigma 3 \ \text{sen } \phi}{1 - \text{sen } \phi} \right)$$

Estableciendo proporciones geómetricas y operando, se obtiene :

$$\sigma 1 = \sigma 3 \ \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) + 2\, c \cdot \text{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$$

Si $N\phi = \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$

$$\Rightarrow \ \sigma 1 = \sigma 3 \, N\phi + 2\, c \sqrt{N\phi}$$

Si $\phi = 0 \Rightarrow qu = \sigma 1 = 2\, c_u$

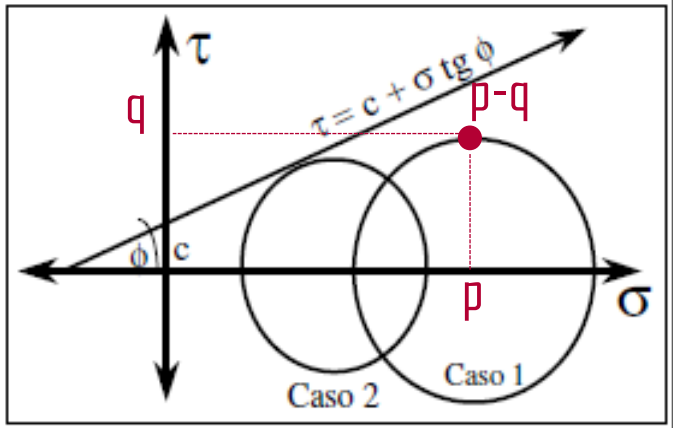
Trayectoria de tensiones

DIAGRAMAS p-q

ENVOLVENTE DE FALLA

- Es la tangente que une una serie de círculos de Mohr en estado de falla
- Significado :

- Si un círculo queda por debajo, es estable para ese estado de esfuerzos
- Si el círculo toca al envolvente de falla, entonces, alcanzó la falla

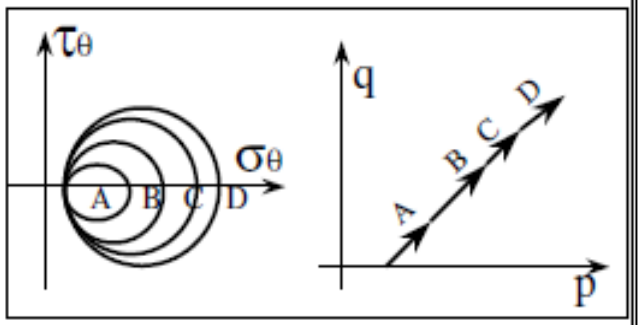


TRAYECTORIA DE TENSIONES

Representación de sucesivos estados de carga de la muestra. Es posible su representación mediante dos formas :

- Círculo de Mohr $\sigma 3 = cte.$ $\sigma 1 = variable$
- Diagrama p - q , en donde :

$$p = (\sigma 1 + \sigma 3)/2$$
$$q = (\sigma 1 - \sigma 3)/2$$



- Para representar la evolución de las tensiones se utiliza un punto característico del círculo, el techo, de coordenadas p-q.

Envolvente p-q:

$$q = a + p \cdot \tan(\alpha)$$

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

Comportamiento mecánico de Suelos

CONSOLIDACIÓN

- DEFORMABILIDAD
- ADENSAMIENTO y RIGIDIZACION
- TIEMPOS
- TRAYECTORIAS de CARGA, DESCARGA y RECARGA
- CONDICIONES DRENADAS

RESISTENCIA AL CORTE

- TENSIONES DE ROTURA
- DEFORMACIONES ELASTICAS y PLASTICAS
- TRAYECTORIAS de CARGA y DESCARGA
- DILATANCIA y CONTRACCION
- CONFINAMIENTO y CONSOLIDACIÓN
- CONDICIONES DRENADAS y NO DRENADAS

Integración del comportamiento de suelos

