

Máster Universitario en Túneles y Obras Subterráneas



ÁREA: A
MÓDULO: MECÁNICA DEL SUELO

RESISTENCIA TOTAL Y EFECTIVA DE LAS ARENAS
RESISTENCIA TOTAL Y EFECTIVA DE LAS
ARCILLAS

Ponente: José M. Mnez. Santamaría.
CEDEX

Día: 05/02/07

Hora: 19:15 a 20:15

MASTER A.E.T.O.S.

TÚNELES

MÓDULO MECANICA DEL SUELO (MS6)

RESISTENCIA TOTAL Y EFECTIVA DE LAS ARENAS

RESISTENCIA TOTAL Y EFECTIVA DE LAS ARCILLAS

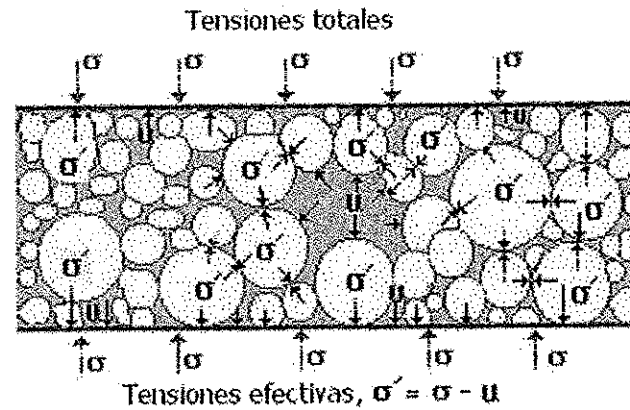
José Manuel Martínez Santamaría

Dr. Ingeniero de Caminos

Laboratorio de Geotecnia –CEDEX

Profesor Asociado U.P.M.

Conceptos: Presión total, efectiva y presión intersticial



Presión total, σ , sobre un plano es la fuerza total por unidad de superficie que actúa en dicho plano

Presión intersticial, u , es la parte de la tensión absorbida por el agua

Presión efectiva, σ' , es la proporción de la tensión tomada por el esqueleto sólido. $\sigma' = \sigma - u$

- Criterio de rotura de un suelo
- Criterio de rotura tipo: Mohr-Coulomb
Fue propuesto por Coulomb en 1.773

Es un modelo de rotura lineal

$$\tau = c' + (\sigma_n - u) \tan \phi'$$

τ y σ_n tensión tangencial y normal en el plano de rotura

u = presión intersticial

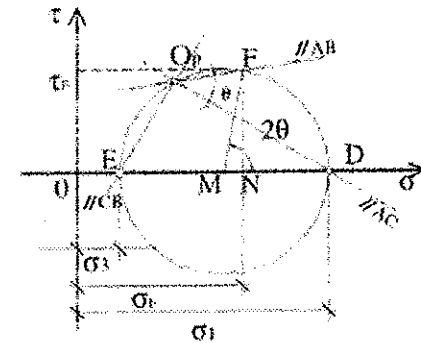
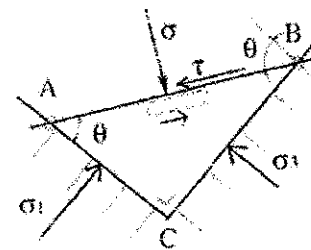
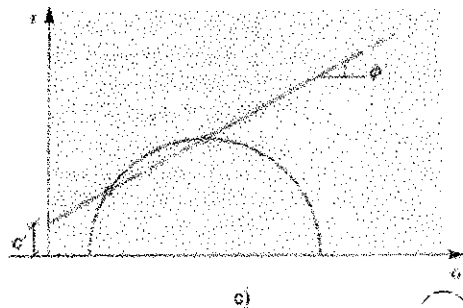
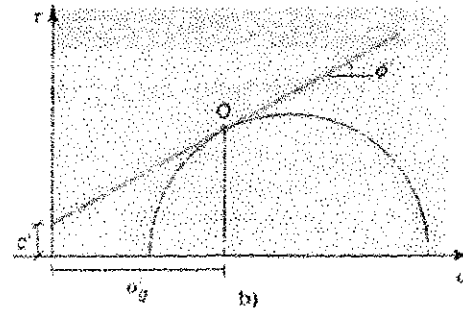
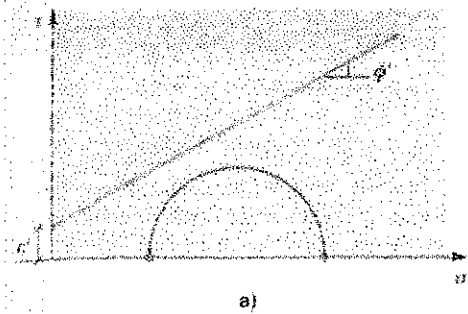
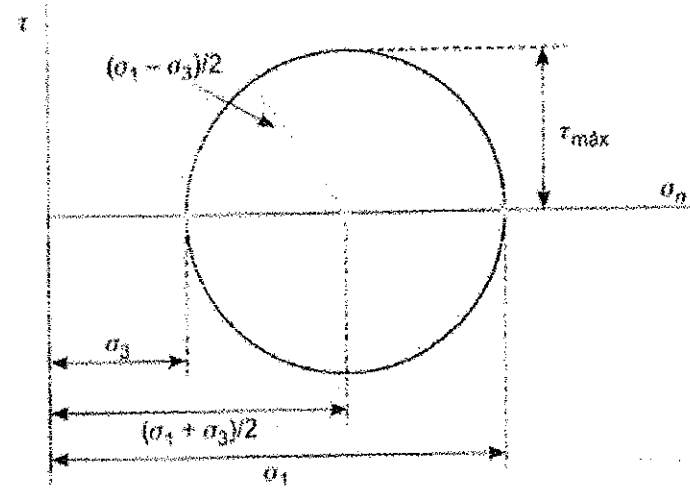
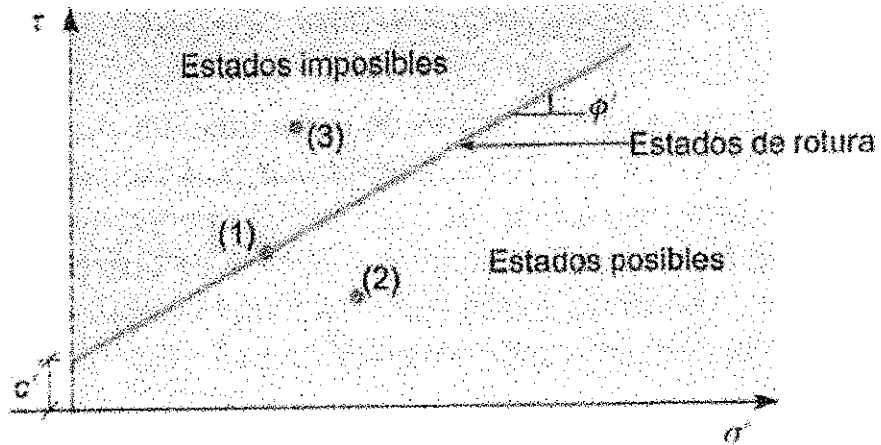
c' = cohesión efectiva

ϕ' = ángulo de rozamiento efectivo

El criterio implica que tiene lugar una fractura por corte al alcanzarse la resistencia de pico del material. Expresa la resistencia al corte a lo largo de un plano.

Resistencia residual: resistencia última

Círculos de Mohr



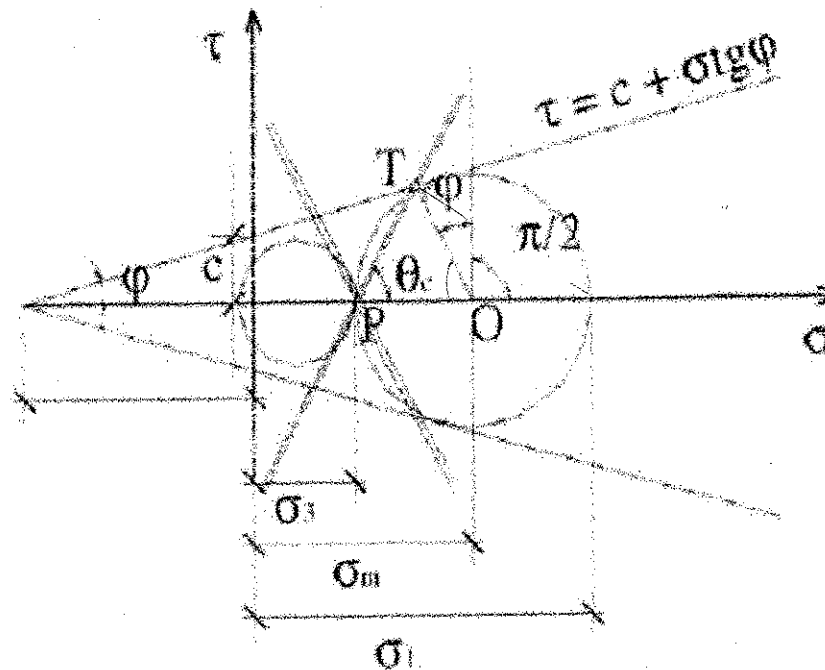
Si se expresa en función de las tensiones principales:

Resistencia en el plano definido por θ (orientación)

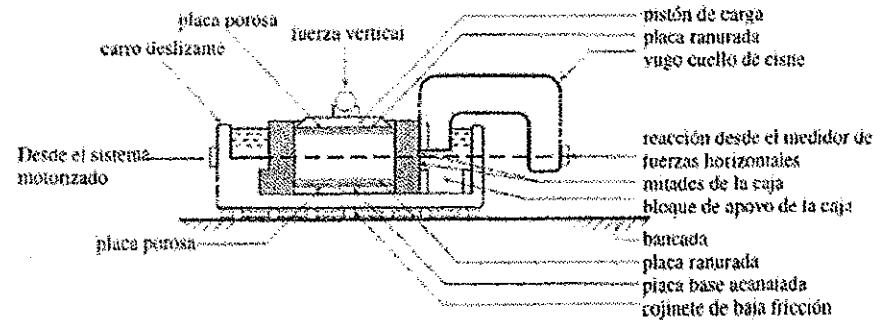
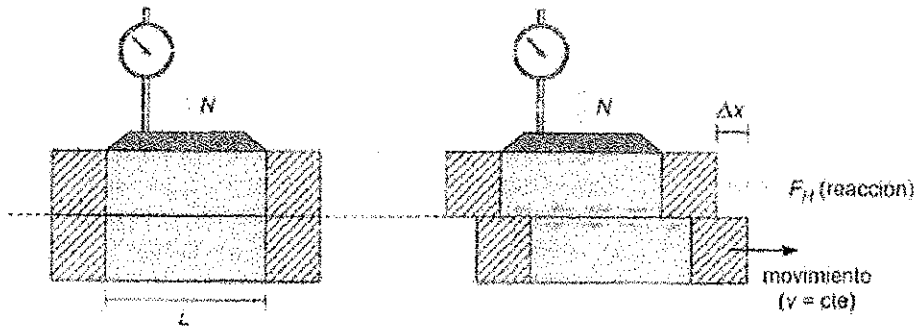
Plano crítico de rotura: $\theta = 45^\circ + \varphi'/2$, $2\theta = \pi/2 + \varphi'$

La expresión queda:

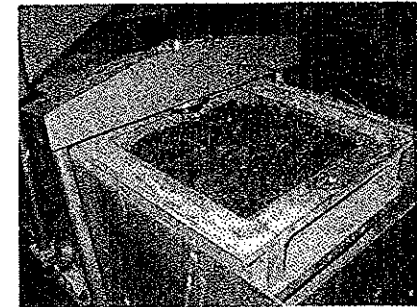
$$\sigma_1 = (2c' \cos \varphi' + \sigma_3(1 + \sin \varphi')) / (1 - \sin \varphi')$$



ENSAYO DE CORTE DIRECTO



Ensayar 3 muestras idénticas del mismo material, con 3 cargas verticales distintas (N_1 , N_2 , N_3). Tensión normal actuante: N/S

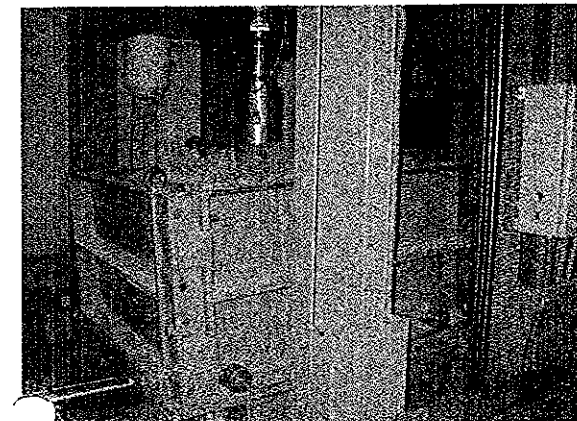
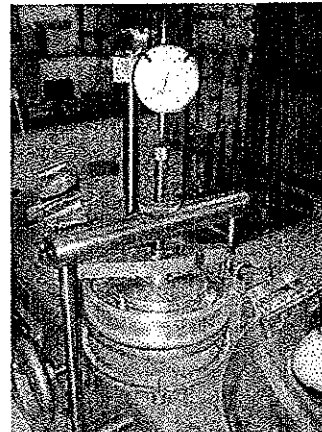


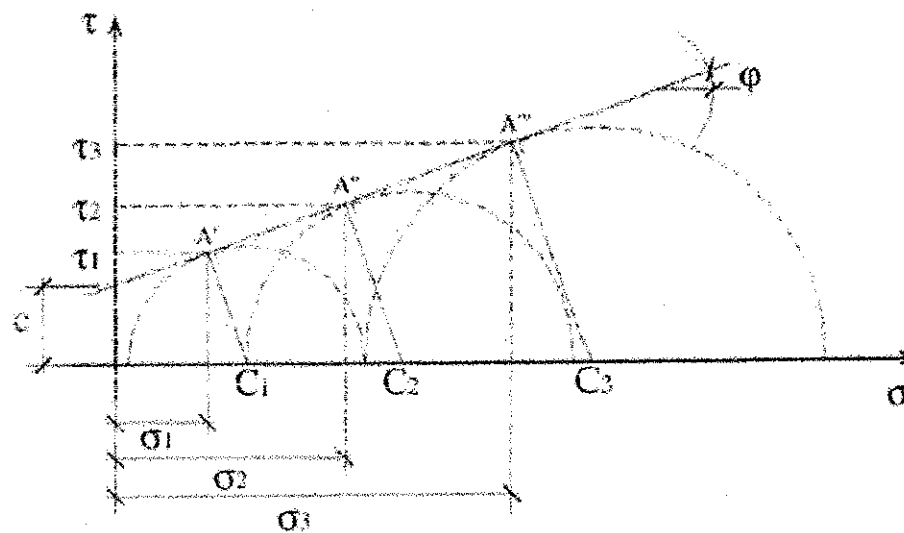
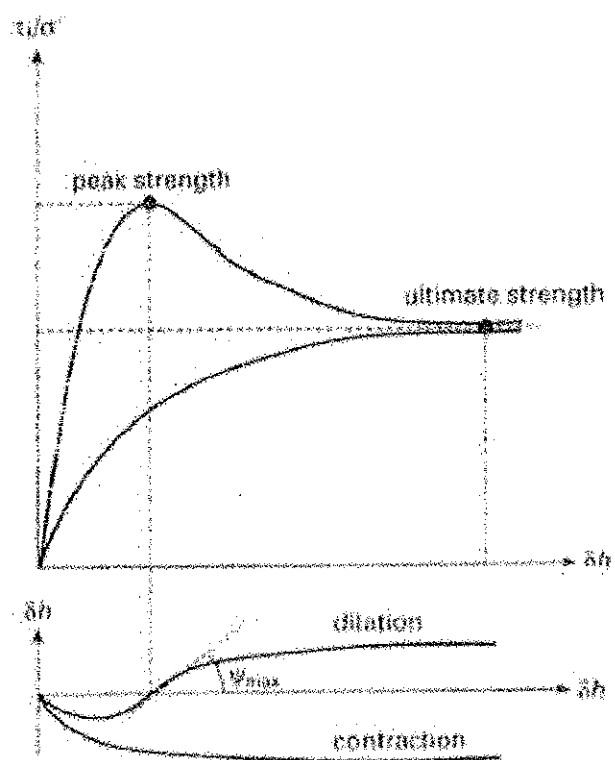
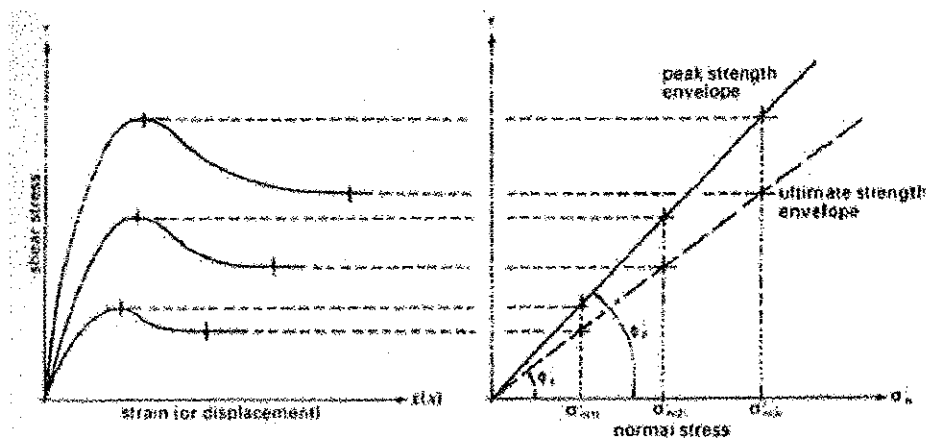
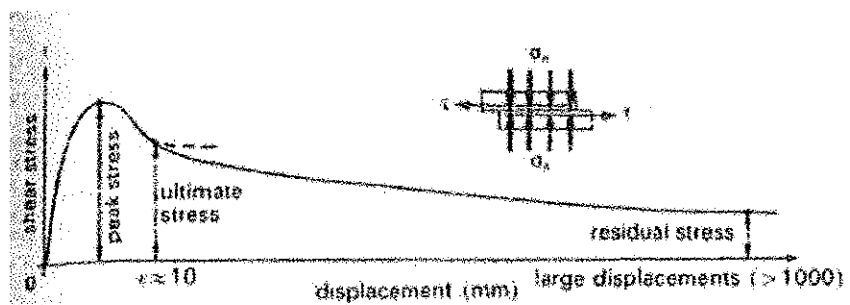
Parte inferior de la caja velocidad constante ($V = \text{cte}$)

$$\tau = F_H / L^2$$

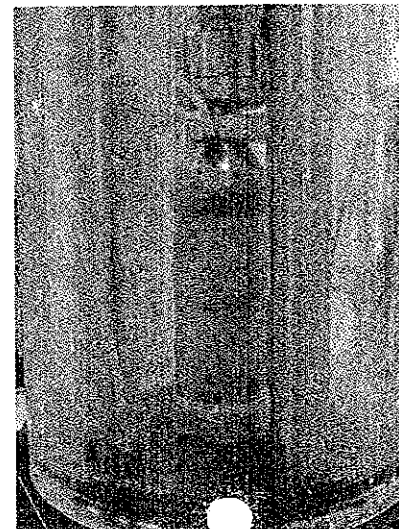
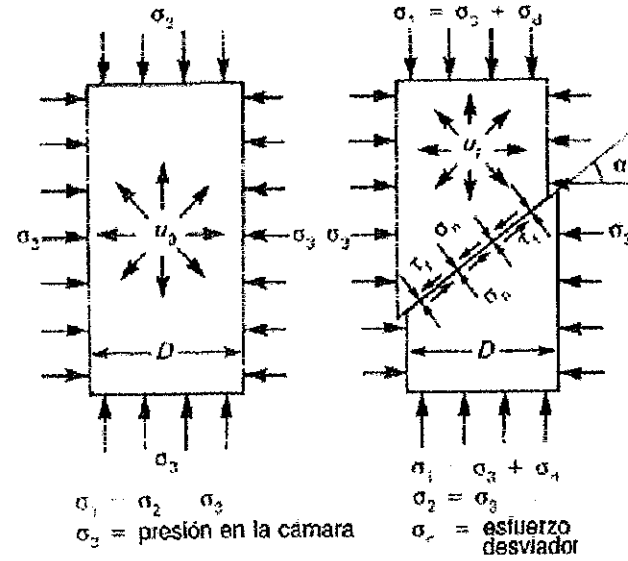
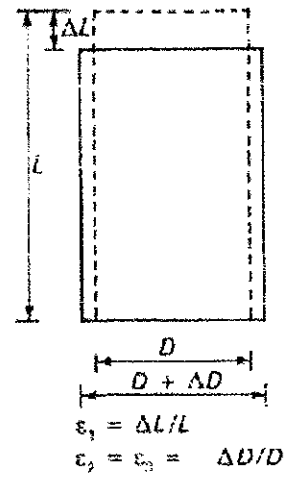
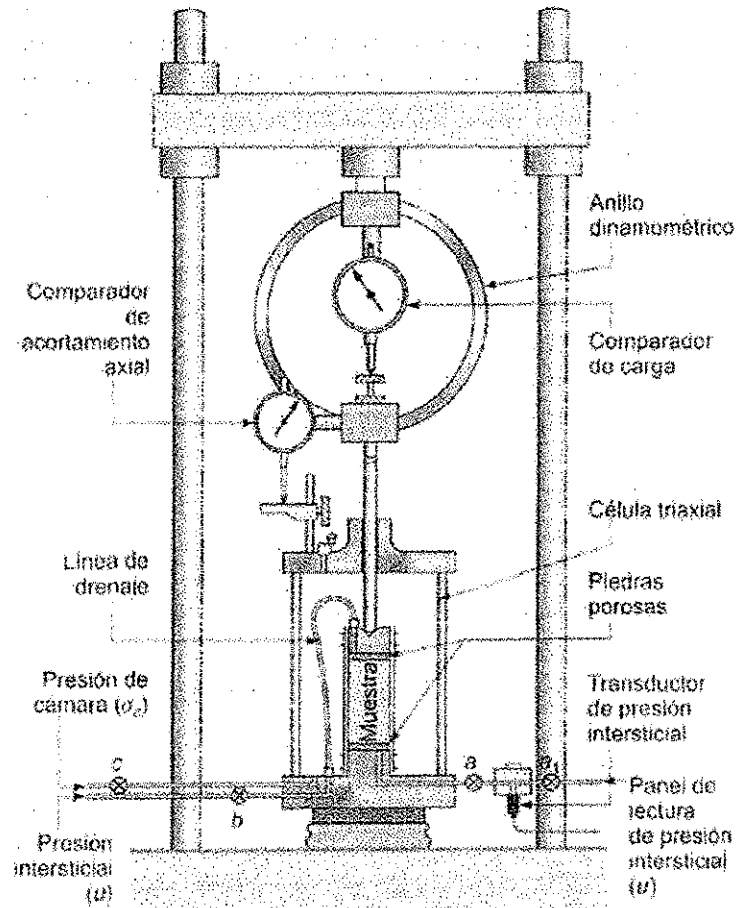
$$\delta \epsilon_v = \Delta H / H_0 = \Delta H \times S_0 / H_0 \times S_0$$

$$= \Delta V / V_0 = \delta v$$

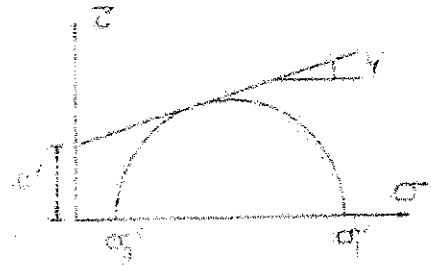




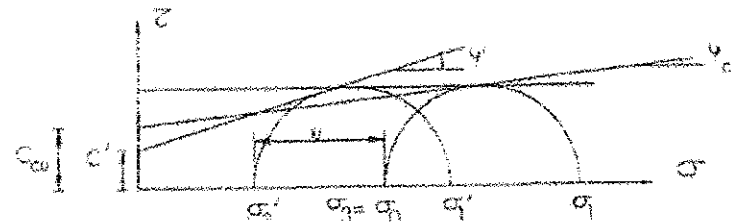
ENSAYO TRIAXIAL



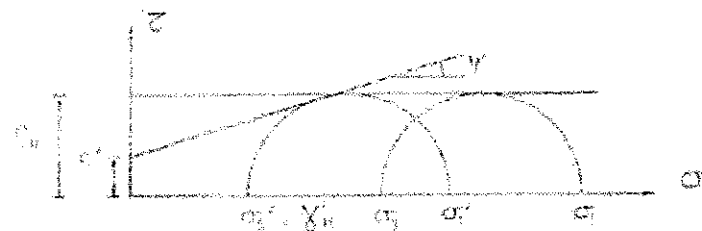
Ensayo consolidado drenado (CD):



Ensayo consolidado no drenado (CU):



Ensayo no consolidado no drenado (UU):



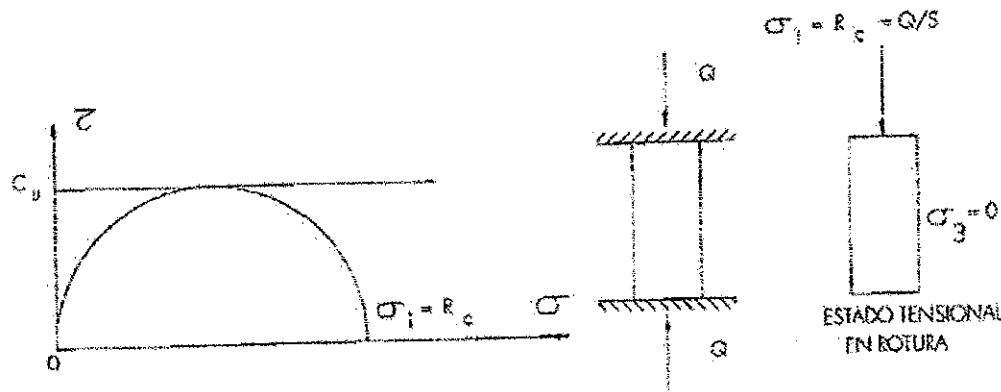
ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE

Ausencia de confinamiento lateral de la probeta, $\sigma_3 = 0$

Rotura rápida, no disipación de presión intersticial

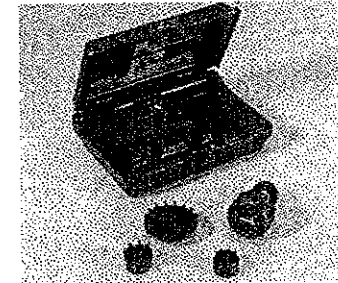
Desviador, $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_1 = q_u$

Radio, $(\sigma_1 - \sigma_3)/2 = c_u$, cohesión sin drenaje



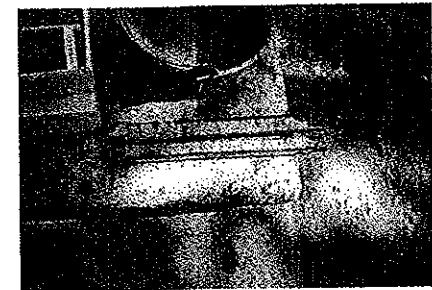
MÉTODOS INDIRECTOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DEL SUELO

Molinete: resistencia al corte sin drenaje ($c_u = q_u/2$)



Ensayo de penetración estándar, SPT:

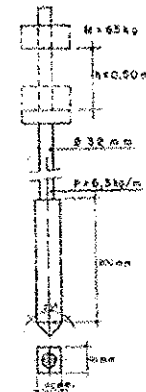
- Resistencia al corte sin drenaje a partir de q_u
- Angulo de rozamiento a partir de densidad relativa



Ensayo de penetración dinámica: correlación con SPT

Ensayo del cono penetrométrico, CPT:

- Resistencia al corte sin drenaje a partir de q_c
- Angulo de rozamiento a partir de q_c

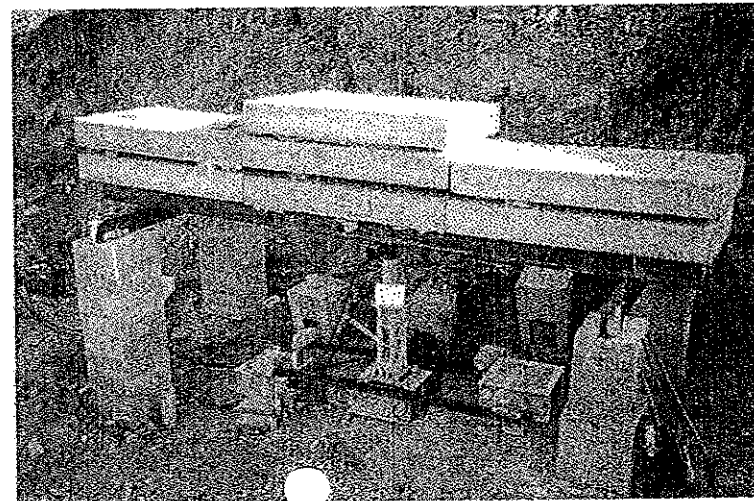


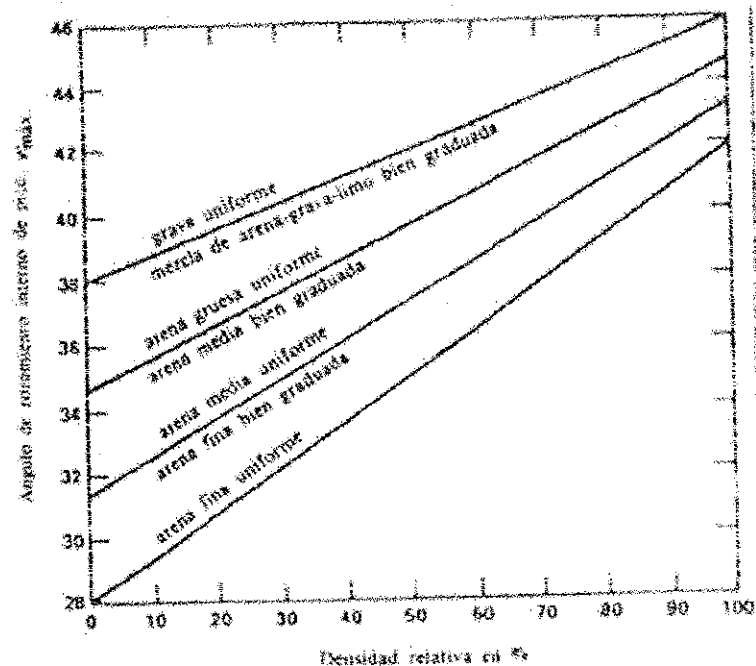
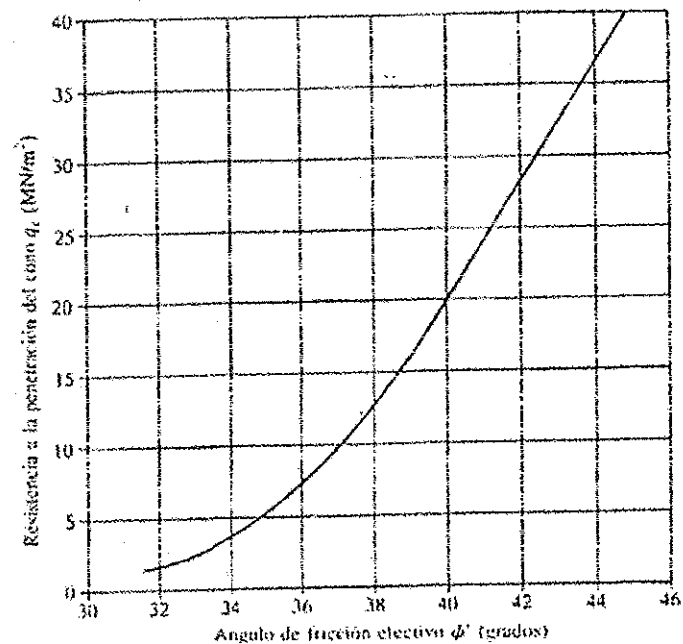
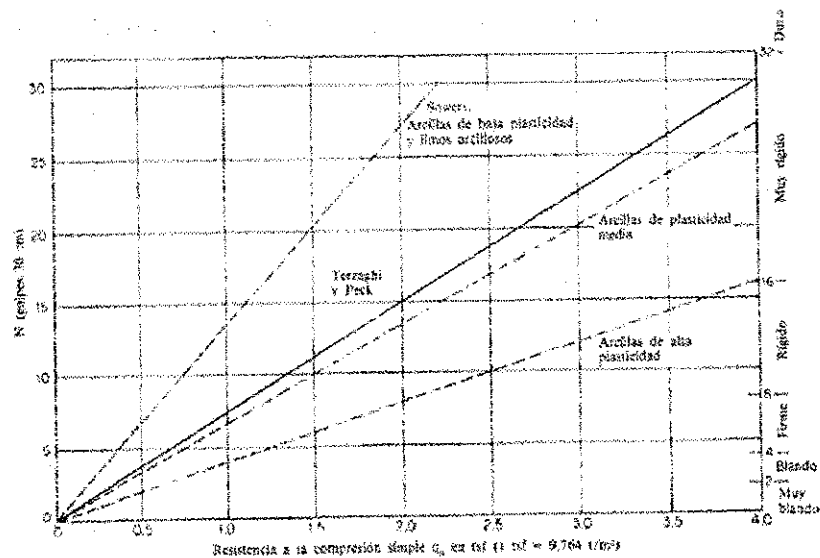
Otras correlaciones

Ensayo	Parámetros medidos	Comentarios
<i>Molinete</i>	S_u	No olvidar la posible anisotropía del material.
<i>SPT</i> (<i>N</i>)	φ' (indirectamente) S_u	Se suele estimar primero la densidad relativa (D_r) para luego correlacionar con φ' Se determina la consistencia a partir de N , para obtener q_u , resistencia a la compresión simple, en función de la plasticidad.
<i>CPT</i> (q_c)	φ' S_u	Poco utilizado en España. Hay correlaciones empíricas para obtener los valores deseados.
<i>Borros</i> (N_B)	φ' , S_u	El valor de N_B se correlaciona con el N del SPT y se utilizan relaciones estimadas.
<i>Ensayo corte «in situ»</i>	S_u , c' , φ'	Caro y costoso pero resultados de muy buena calidad.

$$S_u = \frac{q_c - \sum \gamma \cdot z}{N_c}$$

(SCHMERTMANN, 1977)





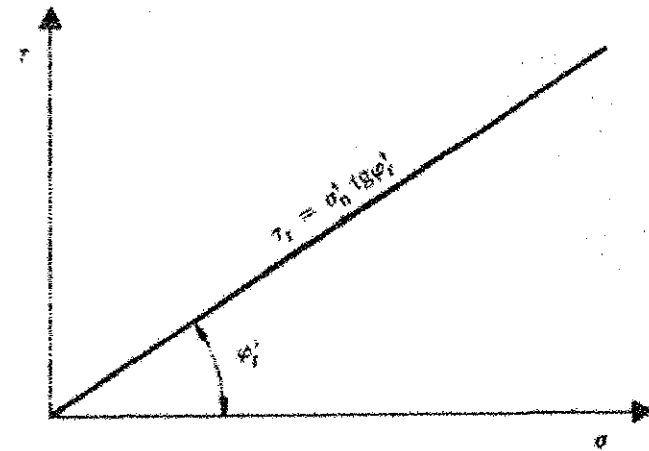
Correlación entre el SPT y el ángulo de rozamiento interno de suelos granulares

N(SPT)	Compacidad	ϕ' (°)
0-4	Muy floja	28
4-10	Floja	28-30
10-30	Medianamente densa	30-36
30-50	Densa	36-41
> 50	Muy densa	> 41

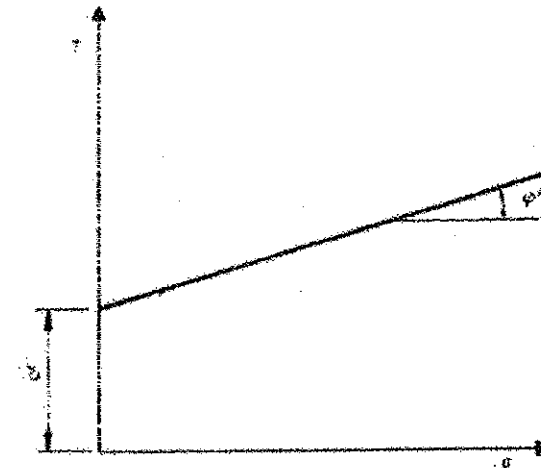
Suelo:

- Diversas posibles definiciones
- Una posible: materiales naturales fácilmente disgregables bien por agitación física bien mediante agentes químicos
- Diversas clasificaciones: Casagrande, USCS
- **Suelos cohesivos (coherentes):** aquellos materiales naturales en los que, gracias a sus características físico-químicas, es necesario aplicar alguna fuerza para separar los granos. En general suelos finos arcillosos con tamaño $\leq$ Tamiz 200 (0.08 mm)
- **Suelos no cohesivos (incoherentes, granulares):** en los que ocurre lo contrario. Sólomente se asocian cuando están húmedos, por efecto de la tensión superficial del agua que rellena parcialmente los poros. En general suelos no plásticos

Suelos normalmente consolidados: cuando las presiones verticales efectivas existentes in situ son las máximas que ha sufrido a lo largo de su historia geológica

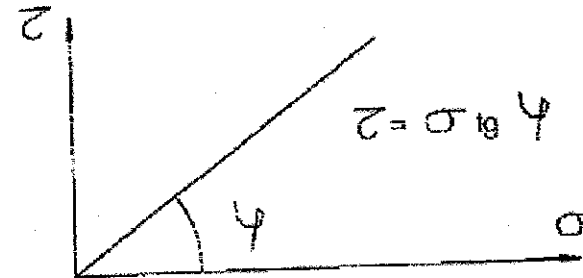


Suelos sobreconsolidados (o preconsolidados): es el caso contrario, y se conoce como razón de sobreconsolidación (OCR, Over Consolidation Ratio) al cociente entre la máxima presión a la que ha estado sometido un suelo en el pasado y la que soporta in situ.



RESISTENCIA AL CORTE EN SUELOS GRANULARES

Compacidad:



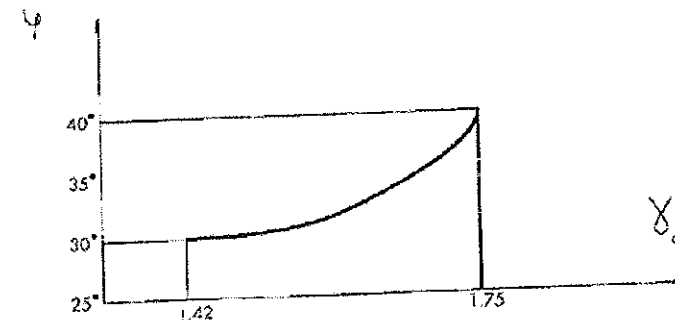
Indice de densidad, $I_D = (e_{\max} - e) / (e_{\max} - e_{\min})$

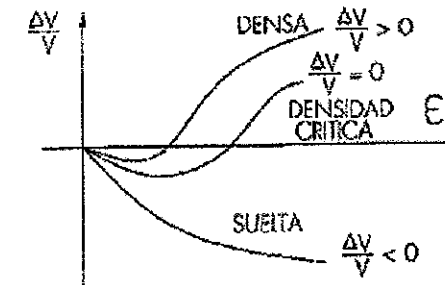
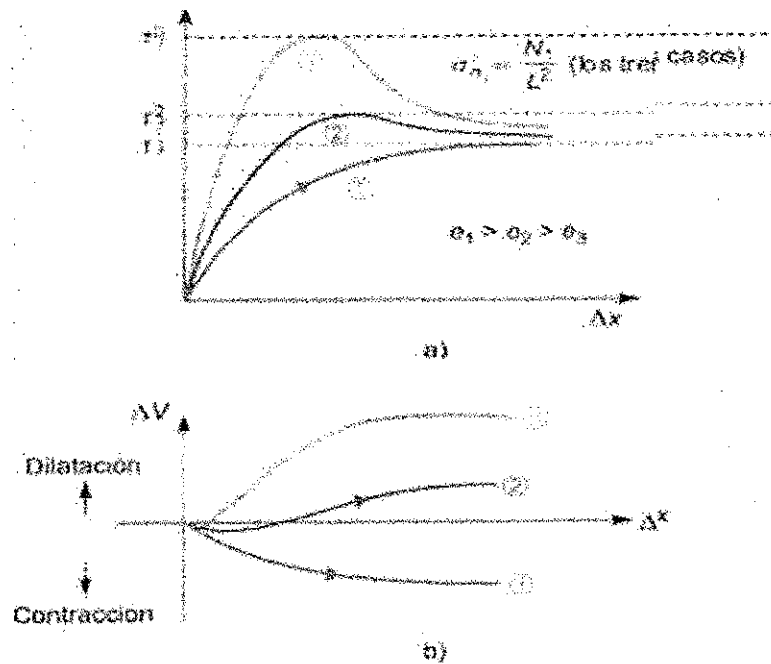
$$I_D = (\gamma_{\max} / \gamma_d) \times ((\gamma_d - \gamma_{\min}) / (\gamma_{\max} - \gamma_{\min}))$$

Densidad baja: $I_D \leq 40\%$

Densidad media: $40\% < I_D \leq 80\%$

Densidad alta: $I_D > 80\%$





Densidad baja: Curva tensión- deformación no presenta pico y variación de volumen negativa (contracción o dilatación negativa)

Densidad media: Curva tensión deformación presenta un pequeño pico y una ligera variación de volumen positiva

Densidad alta: Curva tensión-deformación presenta un máximo y una variación de volumen positiva (dilatación)

Densidad crítica: Incremento de volumen nulo. Tendencia a alcanzar un mismo valor de la tensión tangencial, τ , en rotura

Características que influyen en la resistencia de un material granular:

- Compacidad
- Forma de los granos
- Distribución granulométrica
- Resistencia individual de las partículas
- Tamaño de las partículas

tabla 2.º Congreso Internacional de Rotterdam en 1948

$$\phi' = 36^\circ + \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4$$

Compacidad.....	ϕ_1	suelta media compacta	- 6° 0 + 6°
Forma y rugosidad de los granos	ϕ_2	aguda media redondeada muy redondeada	+ 1° 0 - 3° - 5°
Grosor de los granos	ϕ_3	arena grava fina grava gruesa	0 + 1° + 2°
Granulometría	ϕ_4	uniforme media abierta	- 3° 0 + 3°

ANGULO DE ROZAMIENTO INTERNO DE
SUELOS NO COHESIVOS COMPUESTOS
PRINCIPALMENTE DE CUARZO
(SOWERS Y SOWERS, 1951. Cortesía
de MacMillan)

Descripción	Angulo de rozam. intern. (°)	
	$D_r < 20\%$	$D_r > 70\%$
Redondo, uniforme	29	35
Redondo, buena graduación	32	38
Angular, uniforme	35	43
Angular, buena graduación	37	45

Tipo de suelo	Ángulo de rozamiento interno en función de la densidad inicial (°)		
	Flojo	Medianamente denso	Denso
Limo no plástico	26 a 30	28 a 32	30 a 34
Arena uniforme fina a media	26 a 30	30 a 34	32 a 36
Arena bien graduada	30 a 34	34 a 40	38 a 46
Mezclas de arena y grava	32 a 36	36 a 42	40 a 48

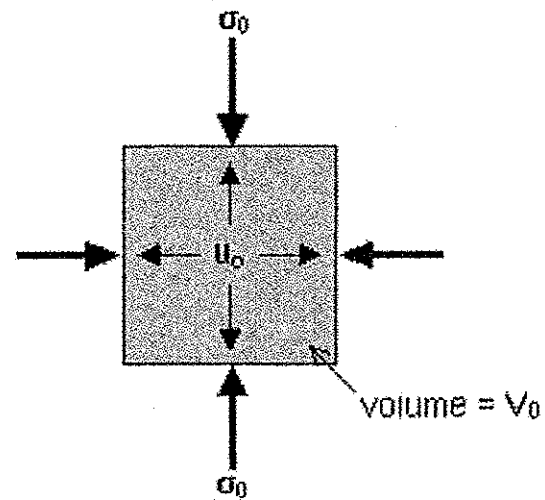
RESISTENCIA AL CORTE EN SUELOS COHESIVOS

El comportamiento al corte de los suelos cohesivos es, ante todo, función de su comportamiento a corto y largo plazo, es decir de la capacidad del suelo a drenar o no el agua intersticial.

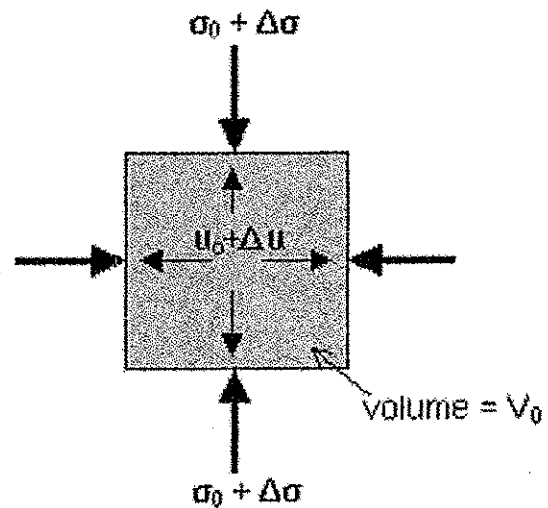
Corto Plazo: Este tipo de cálculo implica una aplicación de la carga lo suficientemente rápida, en un periodo de tiempo breve con relación a la permeabilidad del suelo para que la presión intersticial originada no se disipe. De forma general se denomina **resistencia al corte sin drenaje**

Largo plazo: Una vez aplicada la carga, a medida que pasa el tiempo, las presiones intersticiales creadas por el cambio de tensiones se van disipando, con una tendencia a alcanzar una situación de equilibrio. De forma general se denomina **resistencia al corte con drenaje**

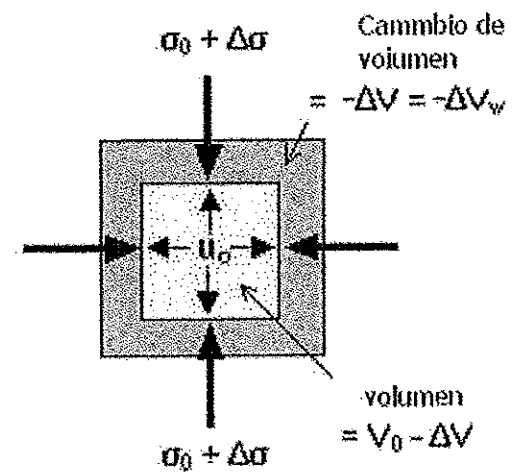
CARGA



CORTO PLAZO



LARGO PLAZO

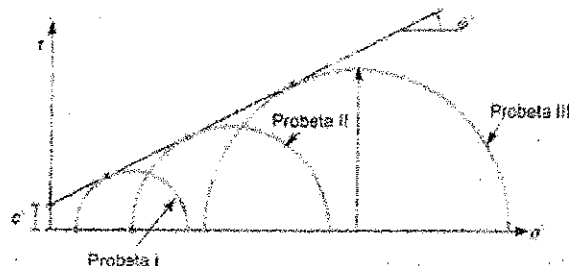


Ensayo consolidado drenado (CD):

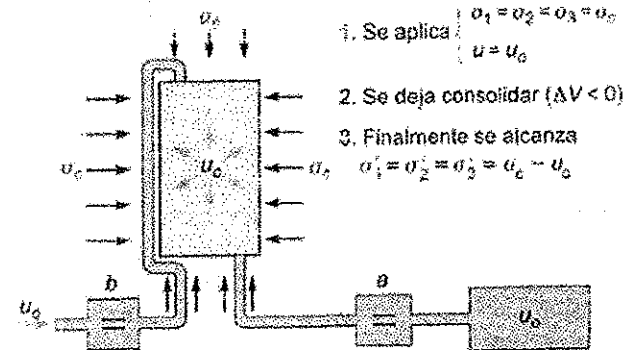
Permite obtener los parámetros resistentes, c' y ϕ' , representativos del comportamiento a largo plazo del suelo

- Fase de consolidación: presión de célula, σ_3 , presión intersticial, u_0 , y la muestra drena libremente
- Fase de corte: Se aplica desviador, $\sigma_1 - \sigma_3 = \Delta \sigma_1 = \Delta \sigma_1'$, manteniendo el drenaje.

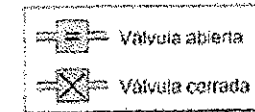
Curvas: $(\Delta \sigma_1', \epsilon_v)$ y $(\Delta V, \epsilon_v)$



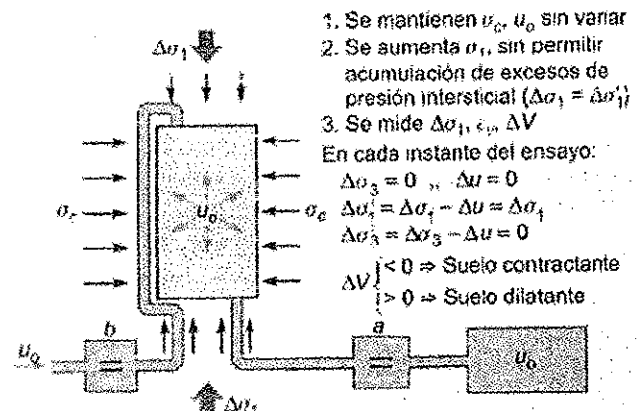
a) Aplicación de la presión de cámara (consolidación).



1. Se aplica $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_c$
 $u = u_0$
2. Se deja consolidar ($\Delta V < 0$)
3. Finalmente se alcanza $\sigma_1' = \sigma_2' = \sigma_3' = \sigma_c - u_0$



b) Aplicación de tensiones de corte.



1. Se mantienen u_0, u_0 sin variar
2. Se aumenta σ_1 , sin permitir acumulación de excesos de presión intersticial ($\Delta \sigma_1 = \Delta \sigma_1'$)
3. Se mide $\Delta \sigma_1, \epsilon_v, \Delta V$

En cada instante del ensayo:

$$\begin{aligned}
 \Delta \sigma_3 &= 0 \quad \Delta u = 0 \\
 \Delta \sigma_1' &= \Delta \sigma_1 - \Delta u = \Delta \sigma_1 \\
 \Delta \sigma_3' &= \Delta \sigma_3 - \Delta u = 0 \\
 \Delta V &\begin{cases} < 0 \Rightarrow \text{Suelo contractante} \\ > 0 \Rightarrow \text{Suelo dilatante} \end{cases}
 \end{aligned}$$

Otros factores que influyen en la resistencia al corte de los suelos cohesivos

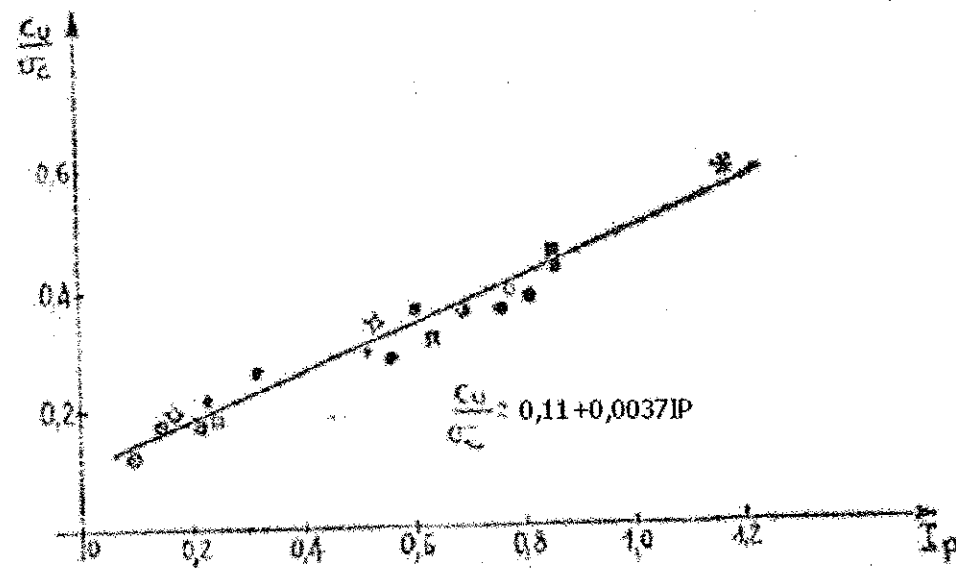
Además de la permeabilidad (corto largo plazo) influye la estructura:

- Presencia de microfisuras
- Anisotropía de la constitución y/o de la consolidación
- Heterogeneidad de la formación

Muestras remoldeadas presentan propiedades más regulares, ya que el amasado destruye las estructuras, asegurando una mayor homogeneidad.

La resistencia al corte sin drenaje depende de la profundidad (presión de consolidación, y por tanto de la humedad). En general se utilizan correlaciones que la ligan con la presión de consolidación y la plasticidad.

El ángulo de rozamiento está relacionado con el índice de plasticidad

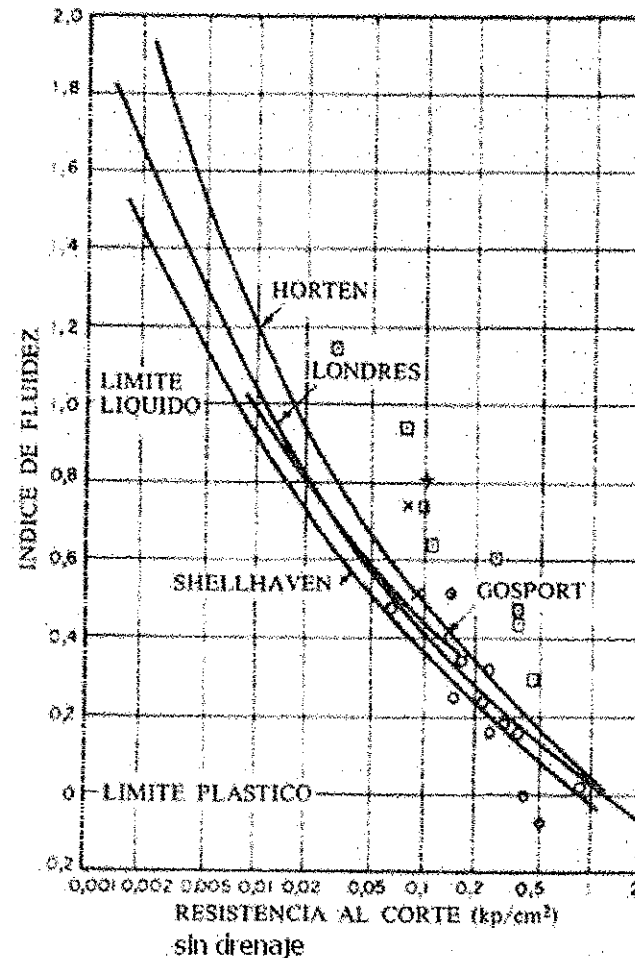


**Skempton, c_u vs I_p . Muestras
normalmente consolidadas**

Indice de fluidez

$$IL = \frac{\omega - LP}{IP}$$

Correlaciones Suelos Arcillosos



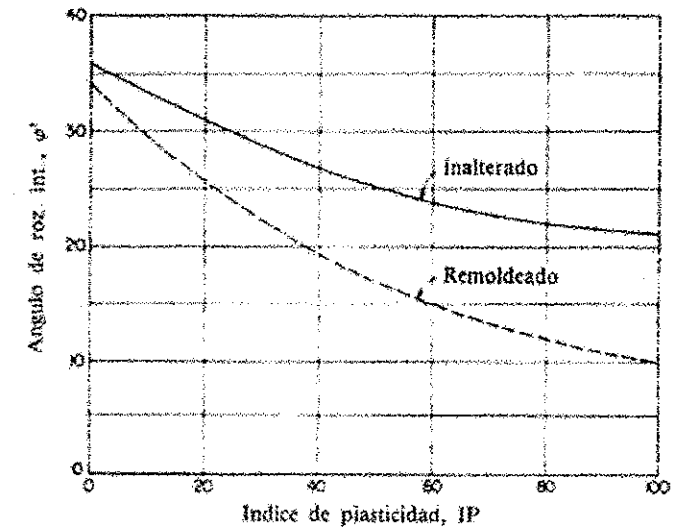
- FANGOS DE LA RIA DE AVILES (ESPAÑA)
- × ARCILLA AZUL DE BOSTON
- + ARCILLA DE CIUDAD DE MEXICO
- ⊕ ARCILLA DE CHICAGO
- ⊠ DIVERSAS ARCILLAS DE EE. UU.

Para suelos españoles inalterados, arcillosos y limosos, con contenidos de CO₂ < 12% JIMENEZ SALAS y JUSTO ALPAÑES (1975) proponen la siguiente expresión:

$$\varphi' = 34,9 - 0,338 IP$$

Para suelos compactados al 95% de la densidad máxima del Próctor Normal, los mismos autores proponen:

$$\varphi' = 36,3 - 0,567 IP$$

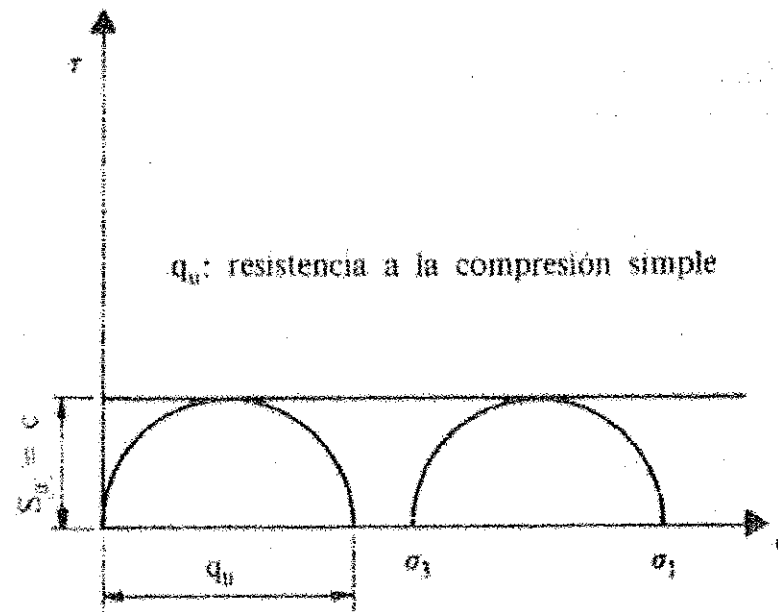


BJERRUM y SIMONS, 1960.

Ensayo no consolidado no drenado (UU):

Corresponde al comportamiento a corto plazo de un suelo

- Válvula de drenaje siempre cerrada



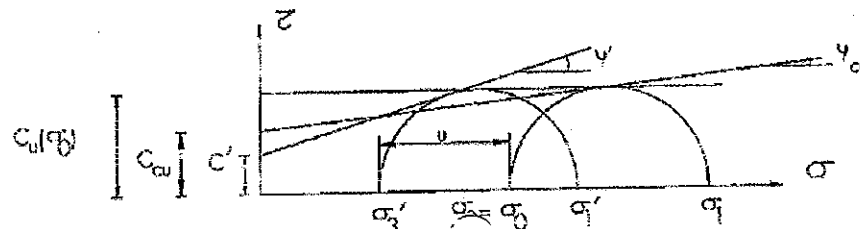
Ensayo consolidado no drenado (CU):

Permite obtener la resistencia al corte a largo plazo del suelo en parámetros efectivos, c' y ϕ' , a partir de los parámetros en totales, c y ϕ , y de los valores de presión intersticial, u .

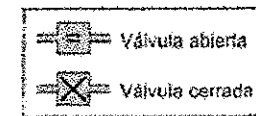
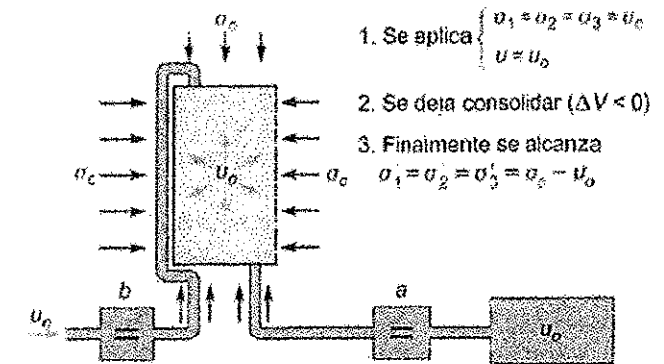
- Fase de consolidación
- Fase de corte: Se cierra el drenaje.

Se aplica el desviador, $\sigma_1 - \sigma_3 = \Delta \sigma_1$,
midiendo el incremento de
presión intersticial, ΔU . $\Delta \sigma_1' = \Delta \sigma_1 - \Delta U$.

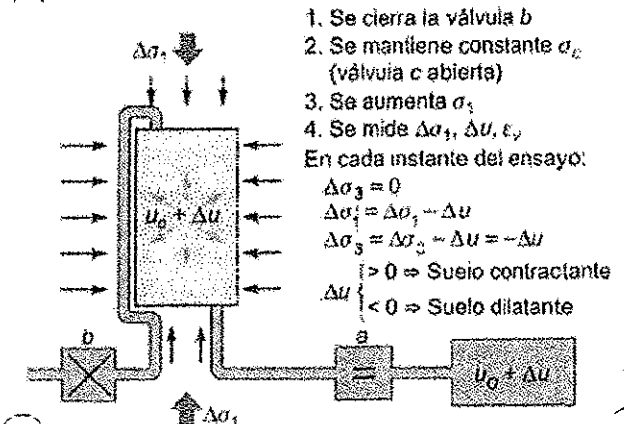
Curvas: $(\Delta \sigma_1', \epsilon_v)$ y $(\Delta U, \epsilon_v)$



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

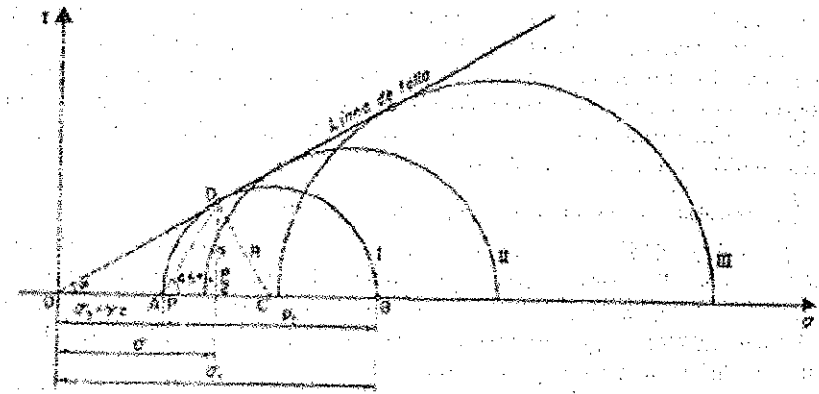
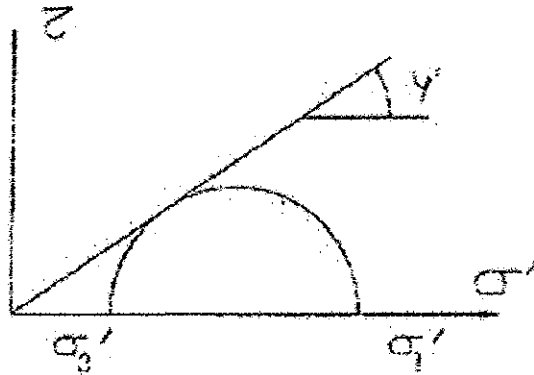


b) Aplicación de tensiones de corte.



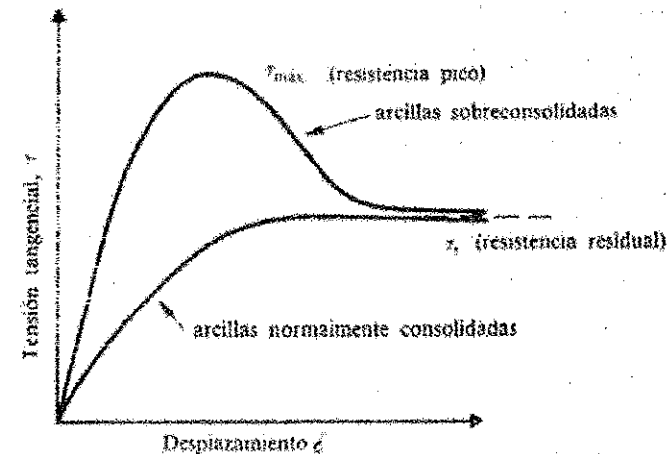
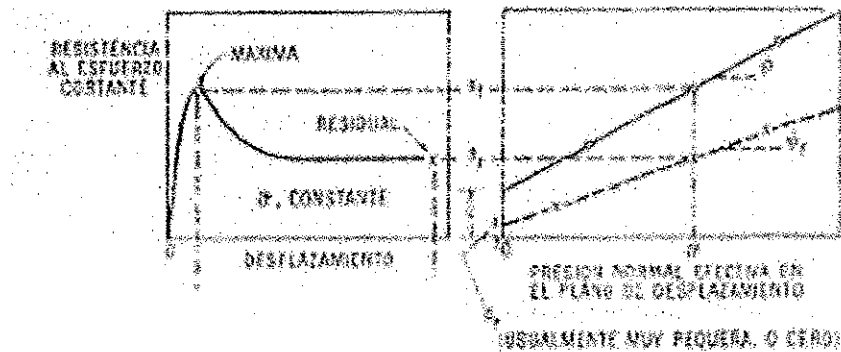
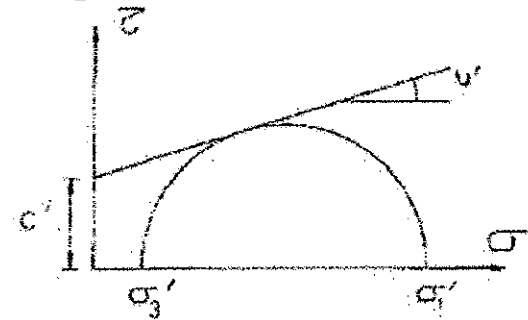
ARCILLA NORMALMENTE CONSOLIDADA

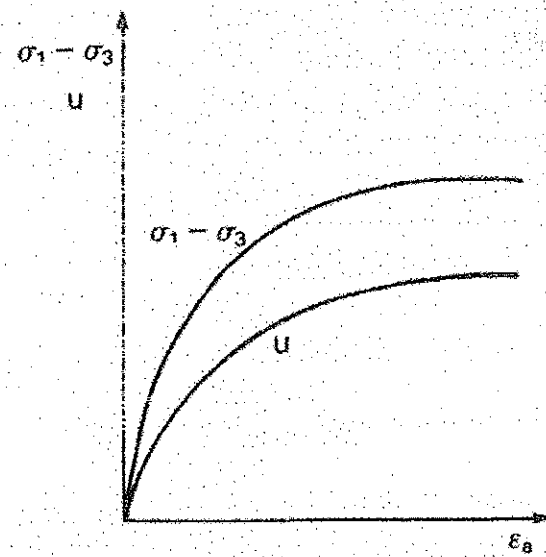
- La tensión tangencial movilizada aumenta con el desplazamiento horizontal hasta alcanzar un pico apenas perceptible
- La envolvente de rotura se define por un ángulo de rozamiento interno y una cohesión efectiva nula



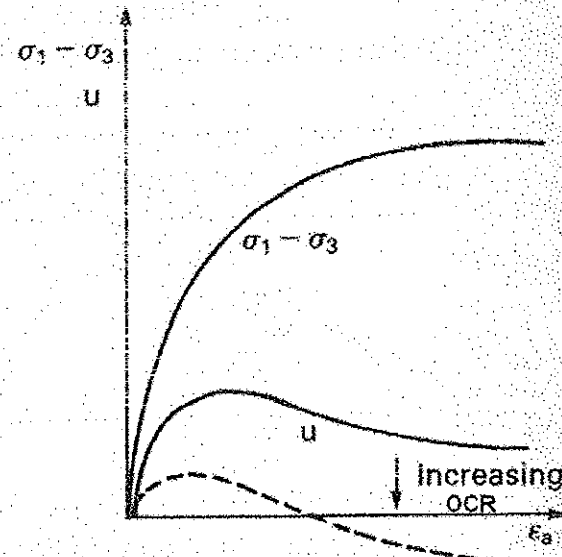
ARCILLA SOBRECONSOLIDADA

- Tensión tangencial máxima superior a una arcilla normalmente consolidada bajo las mismas condiciones de tensiones normales iniciales
- Más rígidas
- Una vez pasado el valor pico, disminuye hacia valores de suelo normalmente consolidado





(a) Consolidated-undrained test normally consolidated clay



(b) Consolidated-undrained test overconsolidated clay

