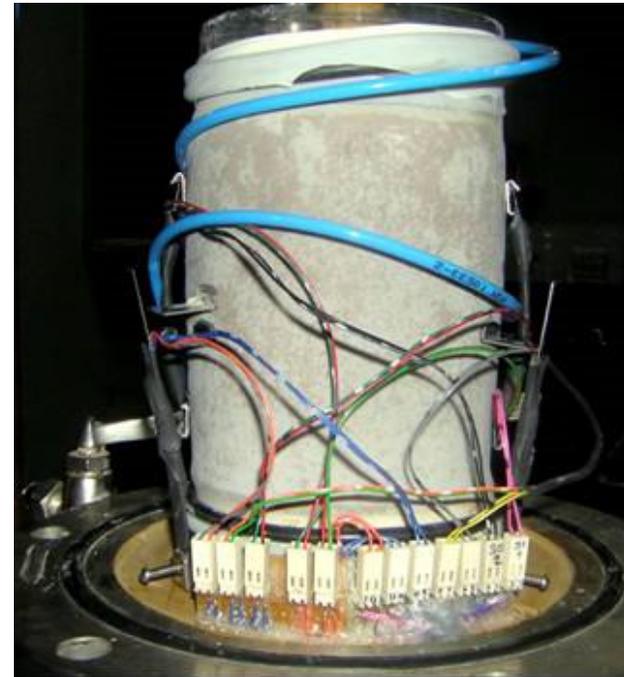
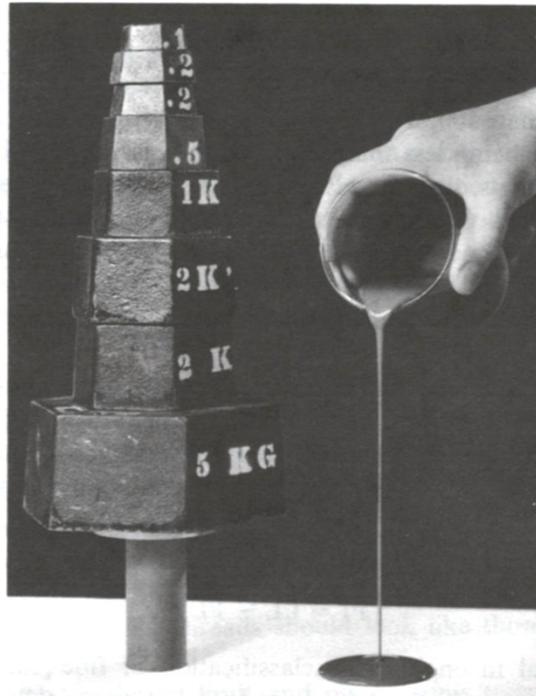


Resistencia y rigidez de arcillas



Mecánica de Suelos y Geología

Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires

Índice

- Resistencia al corte drenado
- Resistencia al corte no drenado
- Arcillas inalteradas
- Relación tensión-deformación
- Un ejercicio integrador



virtualuniversity.issmge.org

Seoul 2017 19th ICSMGE

19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering
19^{ème} Conférence Internationale de Mécanique des Sols et de Géotechnique



Honours Lecture - Bishop Lecture
Modelling and Testing

David Muir Wood
University of Dundee, UK

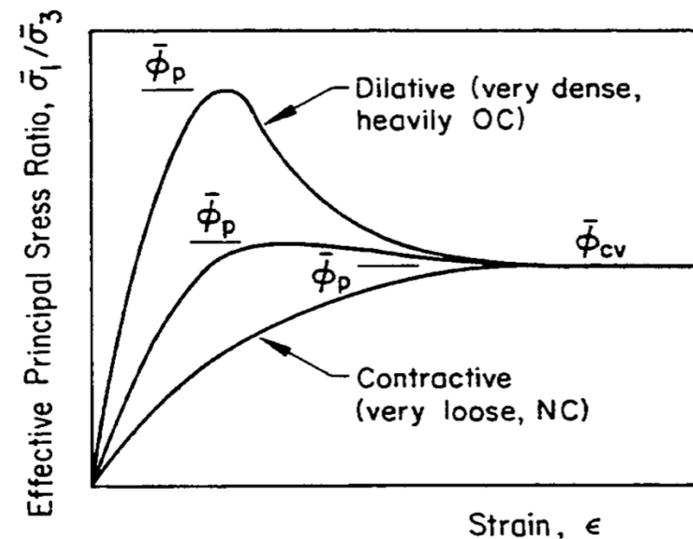


Resistencia al corte de arcillas amasadas vs arenas



Similitudes

- La resistencia al corte obedece a $s = \sigma \tan[\phi]$
- Tienen la misma relación tensión-dilatancia
 - Las arcillas compactas dilatan (como arenas densas)
 - Las arcillas blandas contraen (como arenas sueltas)
- Mismo efecto de trayectoria de tensiones
- Ambos materiales alcanzan el estado crítico ($\phi = \phi_{cv}$)

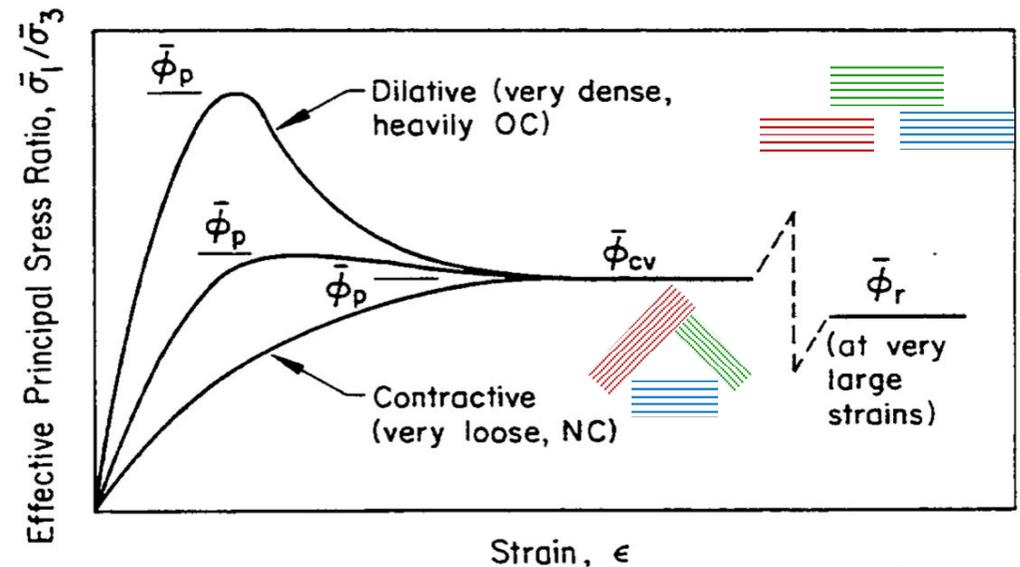


Resistencia al corte de arcillas amasadas vs arenas



Diferencias

- Las partículas de arcilla interaccionan por fuerzas eléctricas (no tienen contacto directo grano a grano)
- Las arcillas tienen memoria: ϕ depende de la historia de tensiones, porque el material “recuerda” cual fue la presión máxima que soportó (OCR) y en que dirección ocurrió
- Para enormes deformaciones, las arcillas tienen un ángulo de fricción interna residual ϕ_r menor que ϕ_{cv}

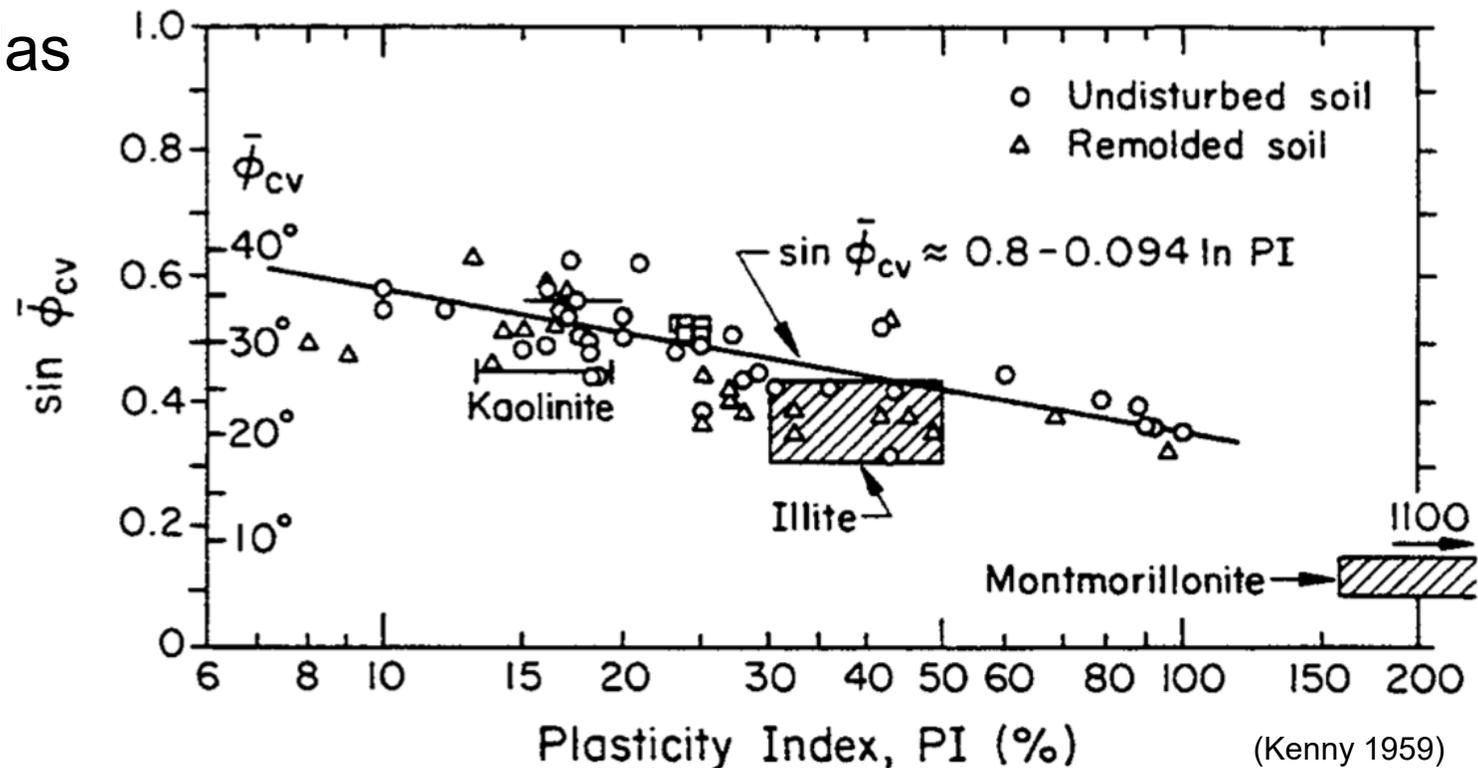
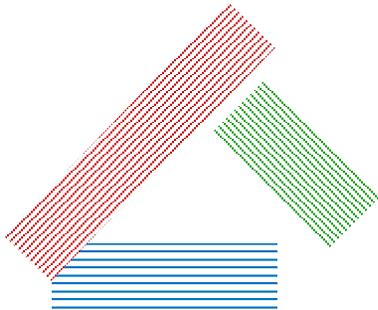




Ángulo de fricción interna de volumen constante ϕ_{cv} en suelos de grano fino

ϕ_{cv} decrece con el aumento de plasticidad

- Mayor actividad eléctrica
- Mayor distancia entre partículas





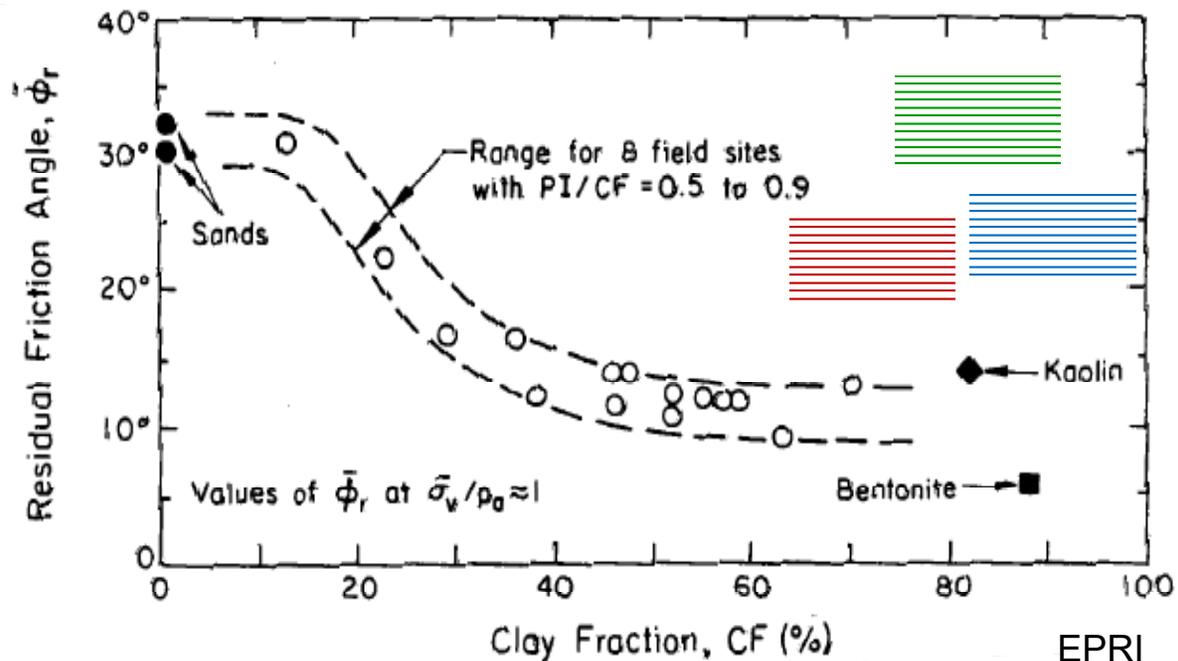
Angulo de fricción interna residual ϕ_r en suelos de grano fino

Para enormes deformaciones hay alineamiento de los planos débiles de las partículas

- Ángulo de fricción interna residual $\phi_r < \phi_{cv}$
- ϕ_r sólo vale en la dirección del reordenamiento de contactos
 - En todas las demás direcciones vale ϕ_{cv}

Que exista ϕ_r no invalida la teoría de estado crítico

- El proceso $\phi_{cv} \rightarrow \phi_r$ ocurre a volumen constante



Ejercicio



Dibuje a escala el ángulo de fricción interna de volumen constante y residual de:

- Arena suelta
- Caolinita
- Illita
- Montmorillonita

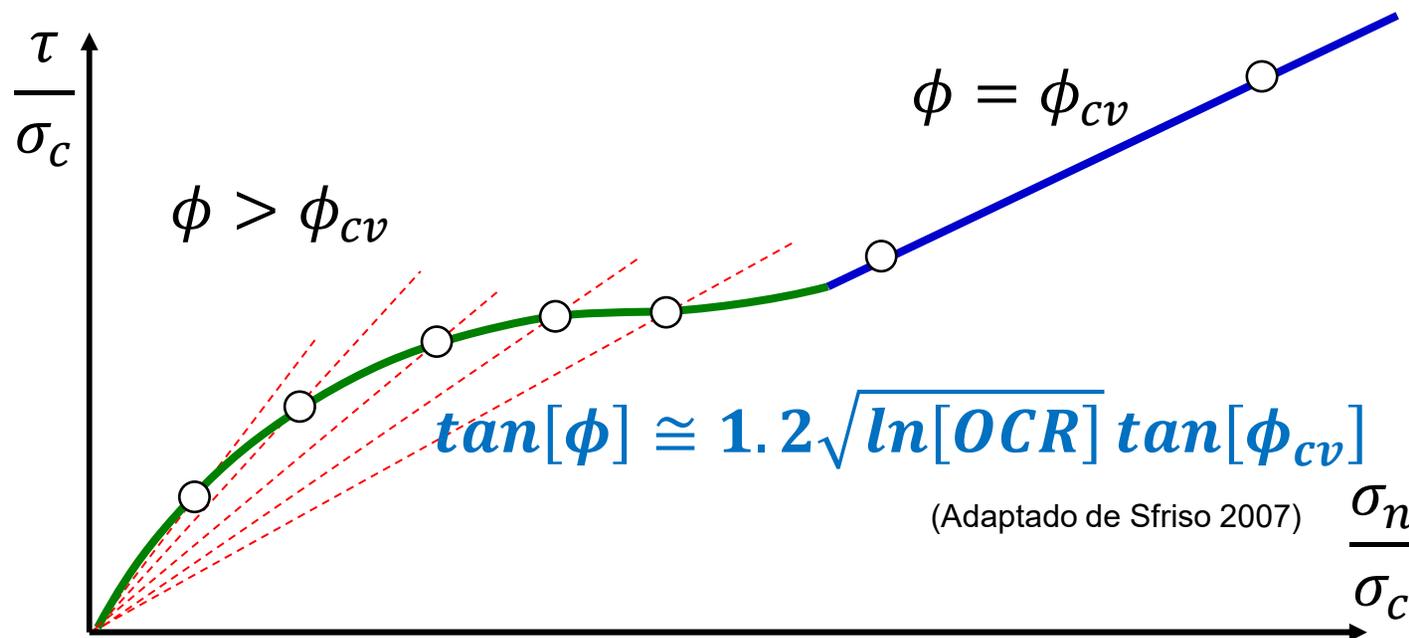
Se efectúa un ensayo S de una illita con $\sigma_3 = 100kPa$

- Calcule σ_1 para una deformación del 10%
- Calcule σ_1 para una deformación del 100%



Arcillas compactas: efecto de la dilatancia

- En arcillas, igual que en arenas: $\phi = \phi_{cv} + \psi$
- En arenas, ψ depende de D_r y de la presión: $\phi = \phi_{cv} + \psi[D_r, p]$
- En arcillas, ψ depende de OCR : $\phi = \phi_{cv} + \psi[OCR]$
- Efecto de la dirección de carga: arcillas = arenas

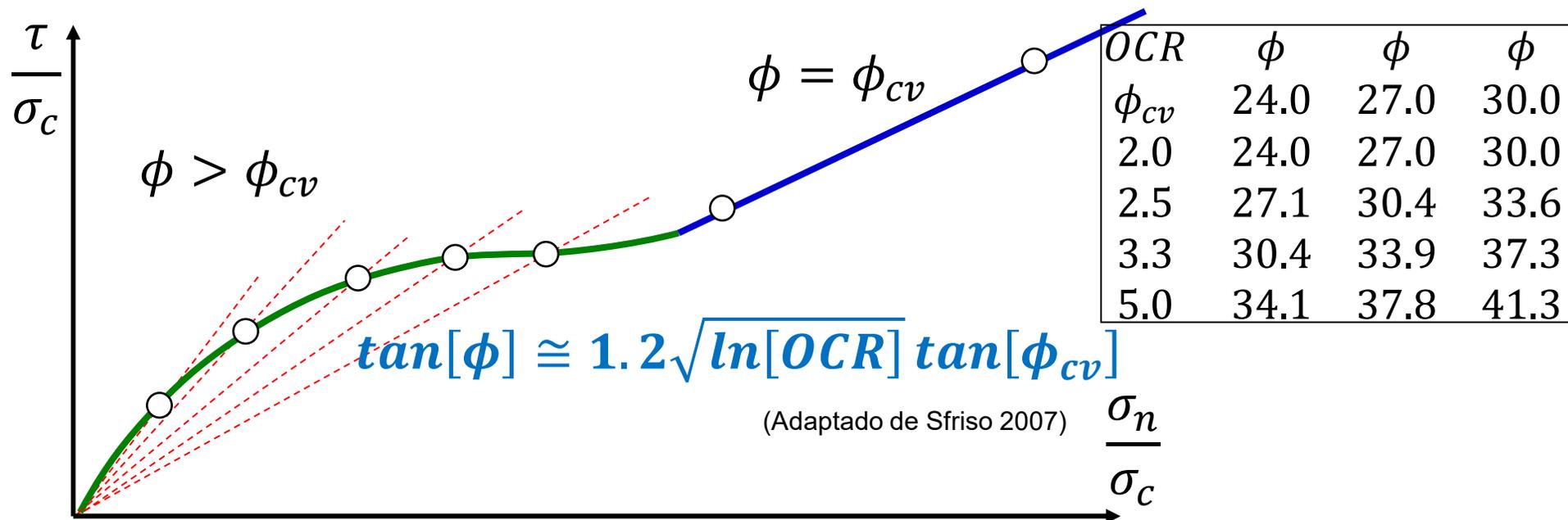




Comportamiento integrado: resistencia y rigidez

OCR mide la historia de tensiones y controla la rigidez

- $OCR \geq \sim 2.0 \rightarrow \phi[OCR] > \phi_{cv}$ y la arcilla tiene mayor rigidez
- $OCR < \sim 2.0 \rightarrow \phi = \phi_{cv}$ y la arcilla tiene menor rigidez



Ejercicio



Calcule el ángulo de fricción interna de una caolinita ($\phi_{cv} = 30^\circ$) para

- Compresión triaxial, normalmente consolidada
- Compresión triaxial, preconsolidada con $OCR = 3.0$
- Compresión plana, normalmente consolidada
- Compresión plana, preconsolidada con $OCR = 3.0$

Recordatorio

- Compresión triaxial $\phi_{tc} = 1.00 \phi$
- Compresión plana $\phi_{psc} = 1.10 \phi_{tc}$

Índice



- Resistencia al corte drenado
- **Resistencia al corte no drenado**
- Arcillas inalteradas
- Relación tensión-deformación
- Un ejercicio integrador

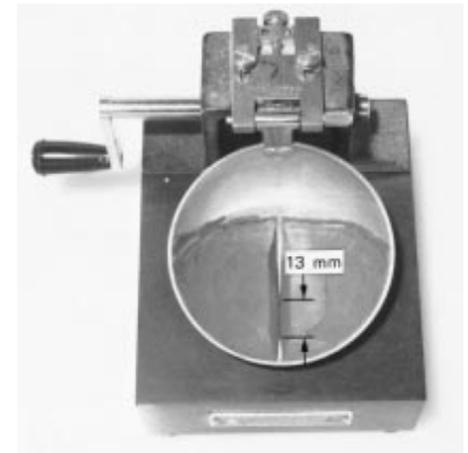
Resistencia al corte no drenado de arcillas amasadas



Arcilla amasada: mezcla homogénea de partículas y agua (no tiene: edad, estructura, cementación, anisotropía...)

Su resistencia al corte no drenado es puramente función de la humedad

- Límite líquido: se aplican siempre los mismos 25 golpes, siempre falla igual
 - Todos los suelos tienen la misma resistencia al corte en el LL
- A una misma humedad, dos arcillas con LL muy distintos tienen resistencias al corte muy distintas: se mide con $I_L = (\omega - LP)/(LL - LP)$



$$s_u = f[IL] = f[p, OCR]$$

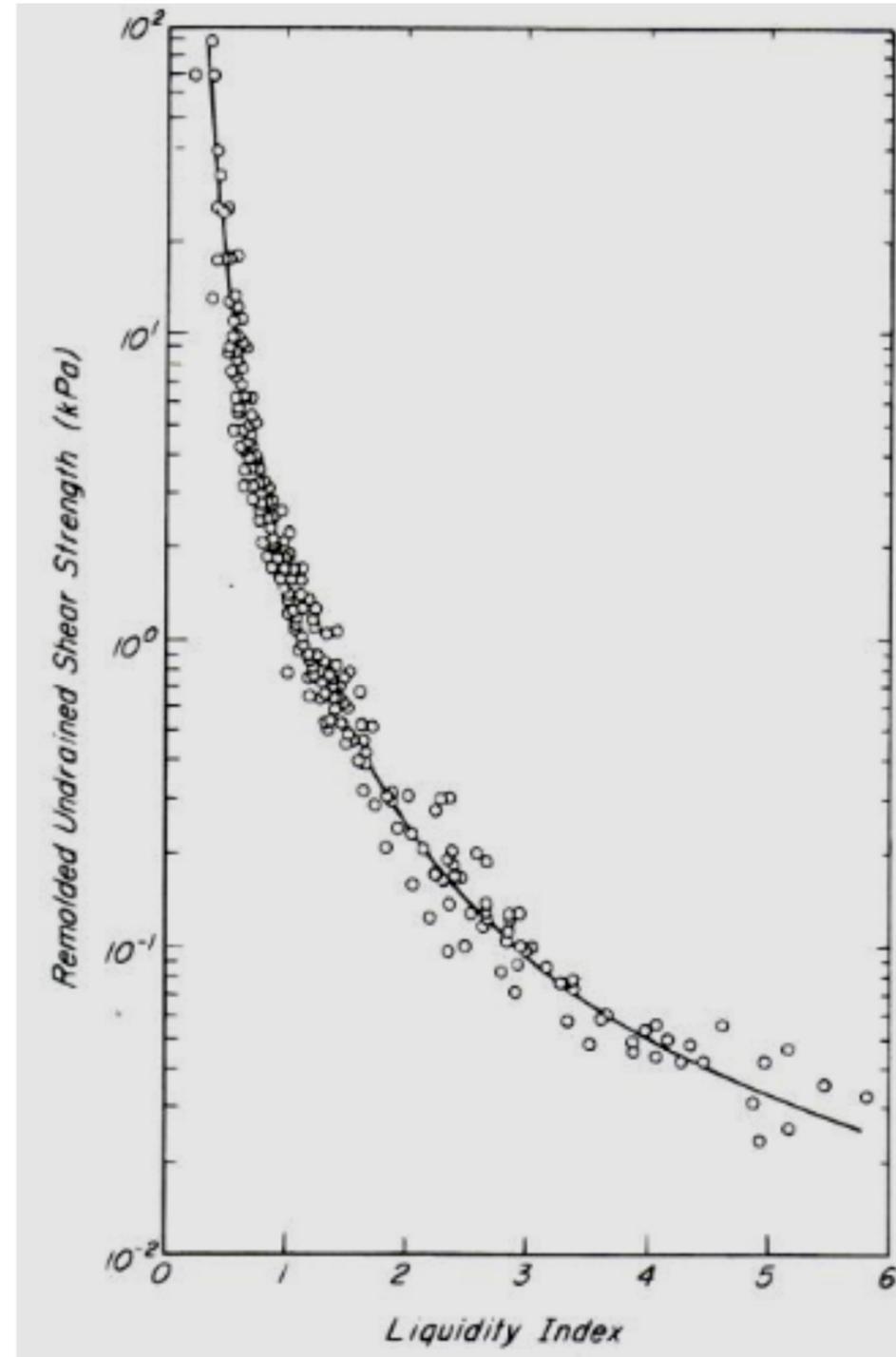
Evidencia experimental

- $s_u = f[\omega] \cong 1.7e^{-4.6 I_L} p_{atm}$
 - $LL \rightarrow (I_L = 1) \rightarrow s_u \cong 1.7\text{kPa}$
 - $LP \rightarrow (I_L = 0) \rightarrow s_u \cong 170\text{kPa}$

De la teoría de compresión edométrica: $\omega = f[p, OCR]$

Uniendo ambas fuentes

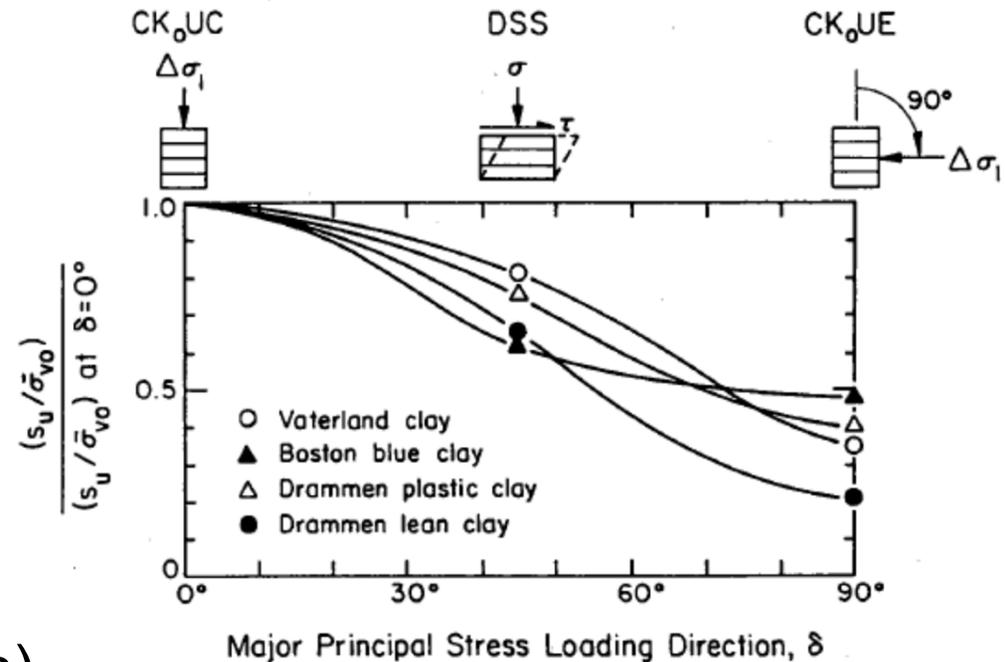
- $s_u \cong 0.23(\sigma'_v)^{C_s/C_c} (\sigma'_p)^{1-C_s/C_c}$
- $s_u \cong 0.23\sigma'_v(OCR)^{1-C_s/C_c}$



Otras influencias en la resistencia al corte no drenado de arcillas amasadas



- Dirección de tensión de corte vs dirección de consolidación
 - Efecto distinto que en deformación drenada
 - Depende de relación tensión-deformación
- Velocidad de carga (siempre no drenado, válvulas cerradas)
 - Aumento de 10 veces de la velocidad de deformación: aumento de 10% de s_u
 - Efectos viscosos



CK₀UC: consolidación anisotrópica, compresión no drenada

DSS: corte directo simple

CK₀UE: consolidación anisotrópica, extensión no drenada

Ejercicio



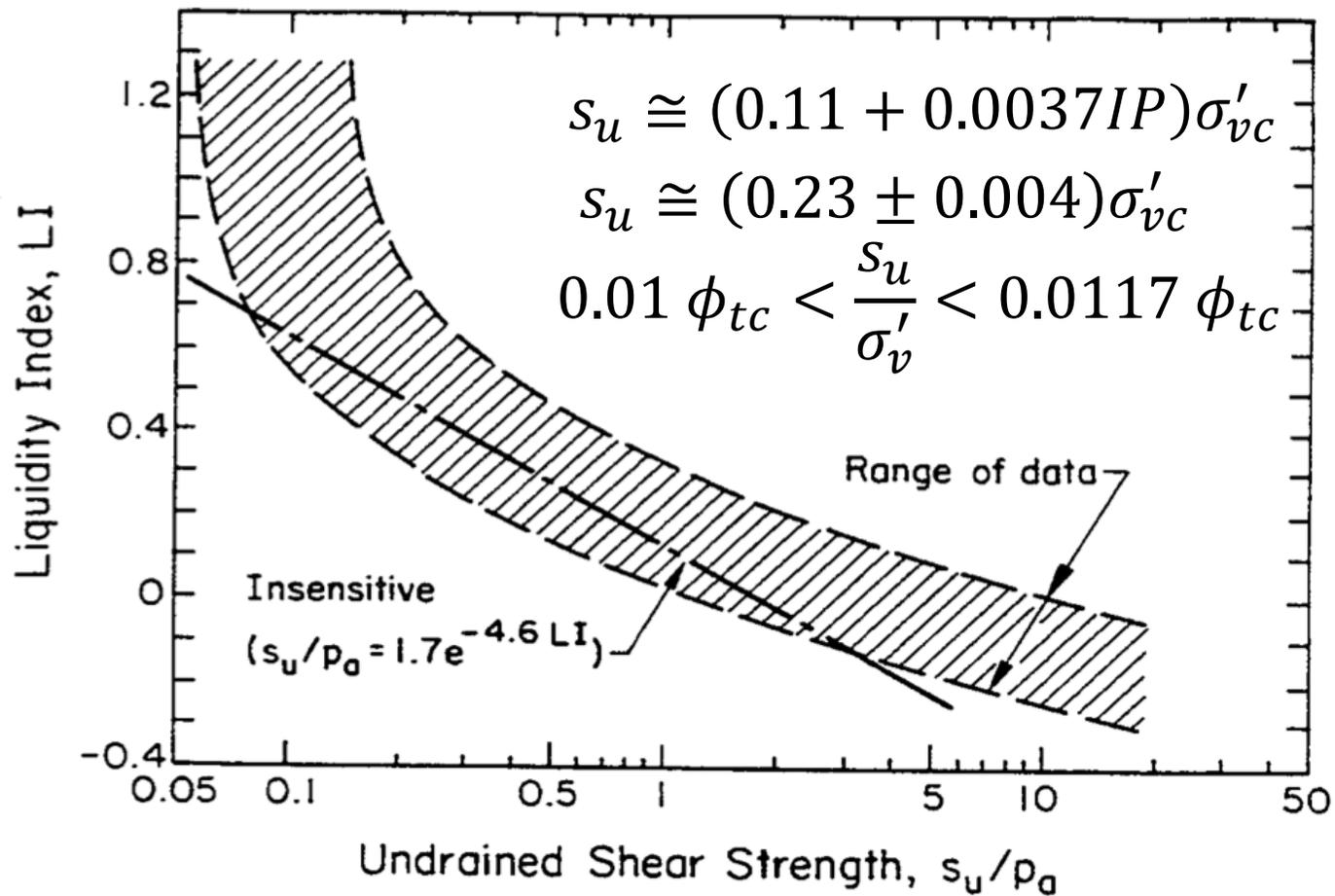
Calcule la resistencia al corte no drenada de una caolinita ($LL = 40$, $LP = 29$)

- en compresión triaxial para $\omega = 50\%$, 40% , 30% , 20%
- en extensión triaxial para $\omega = 50\%$, 40% , 30% , 20%
- en deformación plana para $\omega = 50\%$, 40% , 30% , 20%

Índice



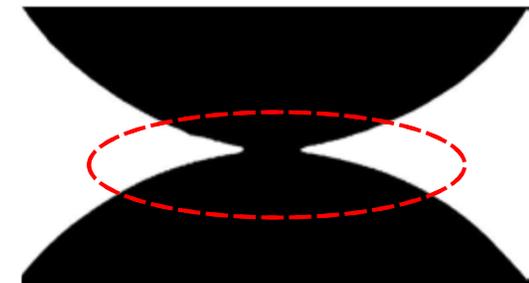
- Resistencia al corte drenado
- Resistencia al corte no drenado
- **Arcillas inalteradas**
- Relación tensión-deformación
- Un ejercicio integrador

Arcillas inalteradas: s_u 

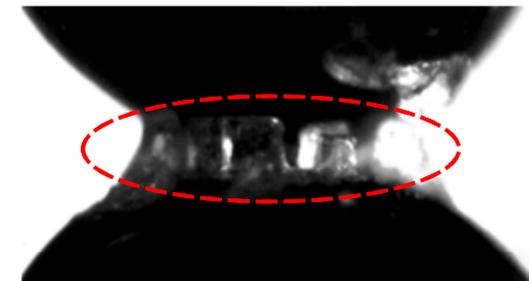
Arcillas inalteradas: Cementación



Agua destilada (deionizada)



Agua con sales



drying

Figure 5. Evolution of unsaturation – Pendular regime. The lower spherical glass bead ($d=2\text{mm}$) is being held by the meniscus. Top sequence: de-ionized water. Lower sequence: water has salt in solution, salts eventually precipitate rendering inter-particle cementation (Gathered with D. Fratta).

Arcillas inalteradas: Sensitividad

$$S = \frac{s_u \text{ intacta}}{s_u \text{ remoldeada}}$$

Clay Description	S_t
Insensitive	≈ 1
Slightly sensitive	1 to 2
Medium sensitive	2 to 4
Very sensitive	4 to 8
Slightly quick	8 to 16
Medium quick	16 to 32
Very quick	32 to 64
Extra quick	> 64

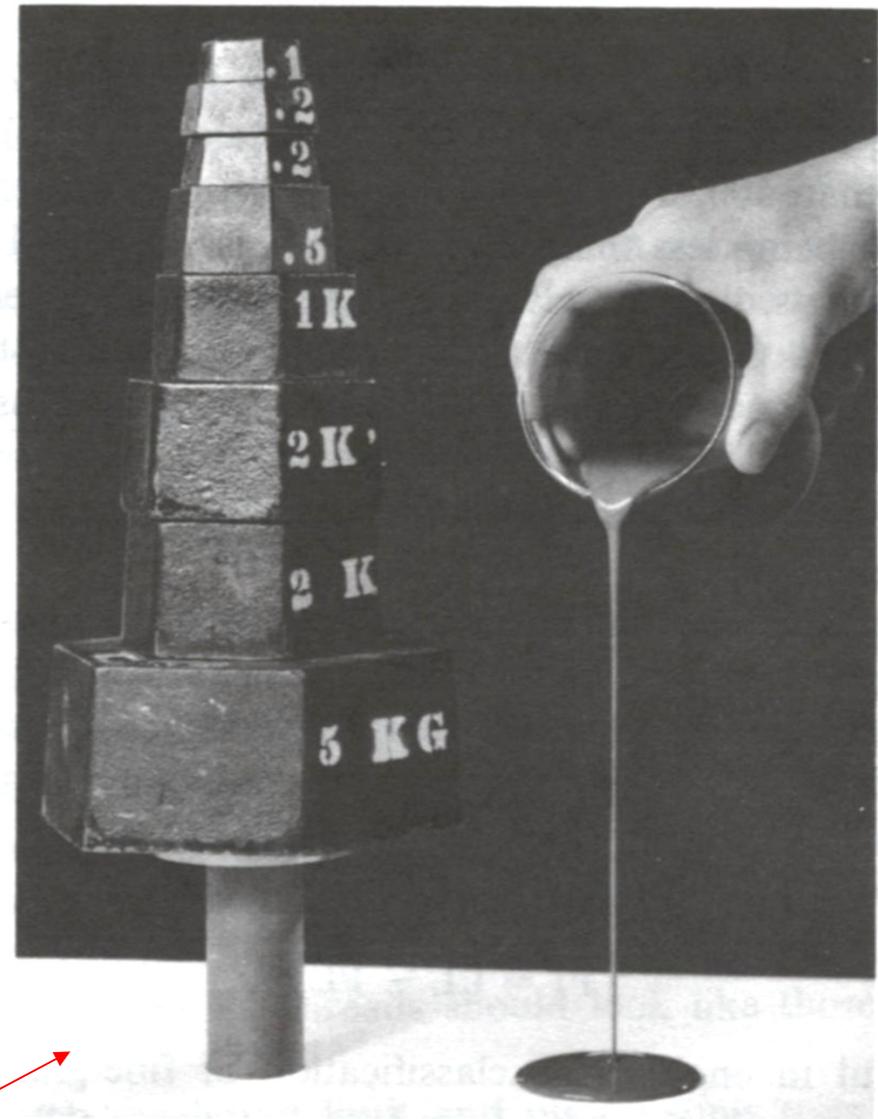


Fig. 2.9 (a) Undisturbed and (b) thoroughly remolded sample of Leda clay from Ottawa, Ontario. (Photograph courtesy of the Division of Building Research, National Research Council of Canada. Hand by D. C. MacMillan.)

Índice



- Resistencia al corte drenado
- Resistencia al corte no drenado
- Arcillas inalteradas
- **Relación tensión-deformación**
- Un ejercicio integrador

Módulo secante no drenado E_u



- Valores típicos
 - No drenado $\nu = 0.50 \rightarrow E = 3G$

Consistency	Normalized Undrained Modulus, E_u/p_a
soft	15 to 40
medium	40 to 80
stiff	80 to 200

Módulo inicial no drenado E_{ui} : correlación E_{ui} vs OCR

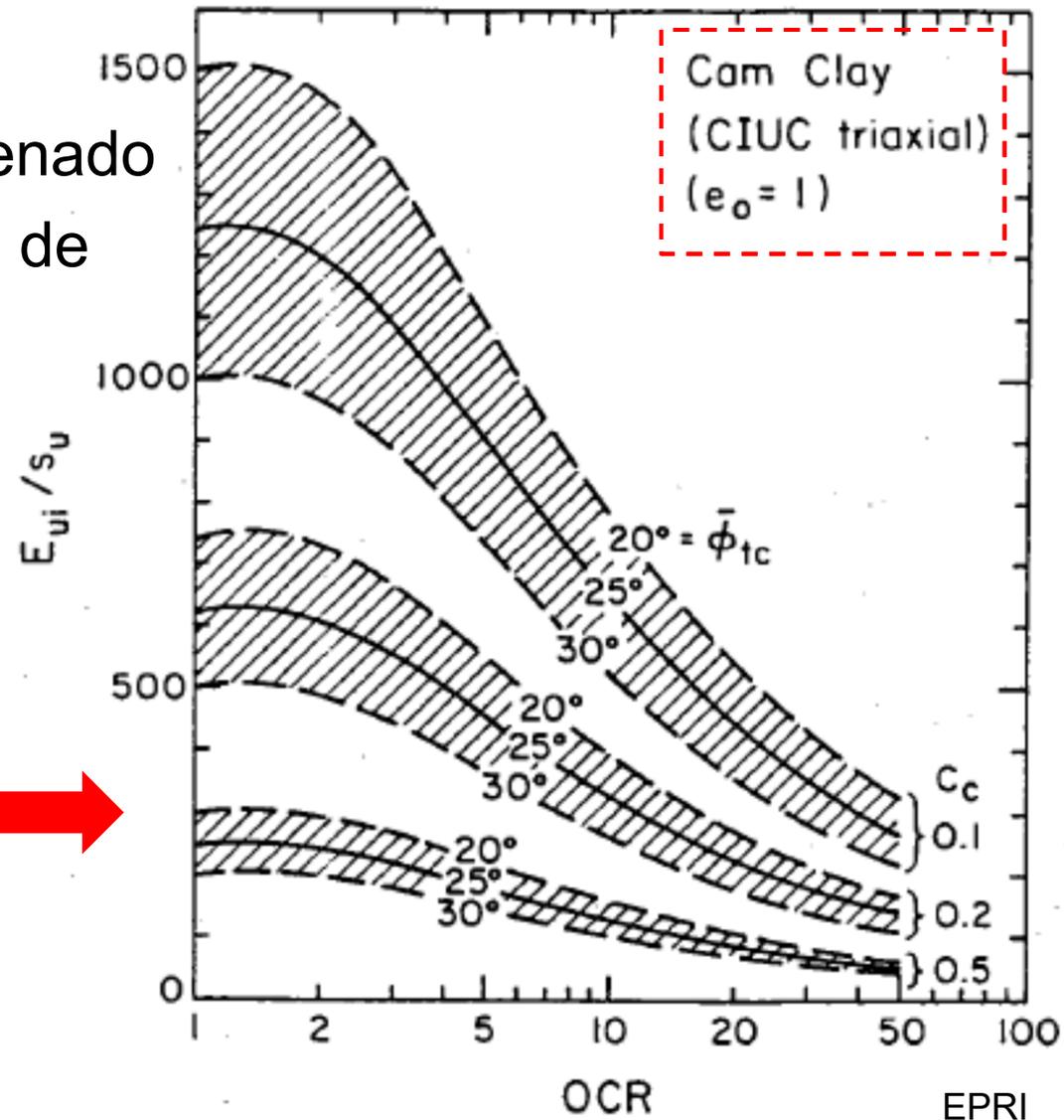


La rigidez al corte inicial no drenado de arcillas amasadas depende de

- Resistencia al corte
- Sobreconsolidación

Predicción de Cam-Clay
(modelo constitutivo arcillas)

$$\frac{E_{ui}}{s_u} \cong \frac{64M(1+e)}{C_c OCR^{0.8}} (1 + \ln[OCR])$$



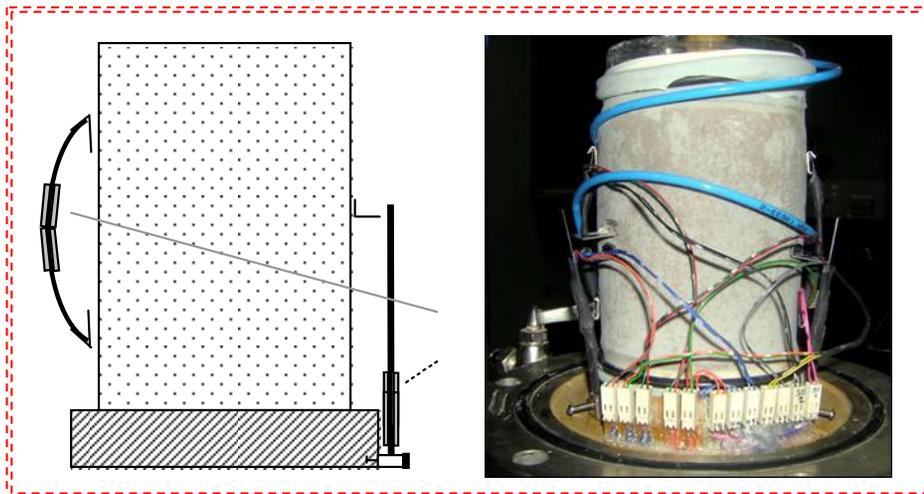


El modelo hiperbólico en función de s_u

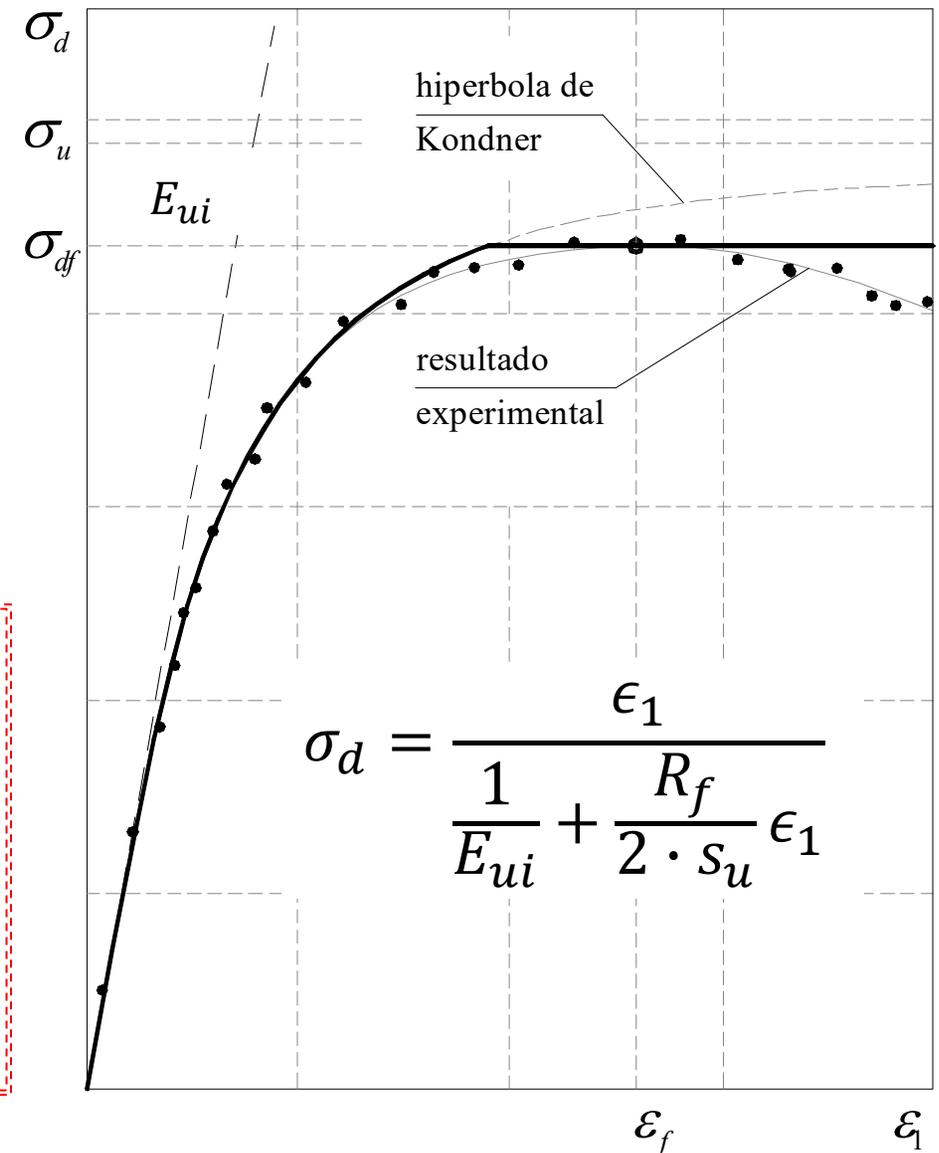
$$\sigma_d = \frac{\epsilon_1}{\frac{1}{E_{ui}} + \frac{R_f}{2 \cdot s_u} \epsilon_1}$$

$$E_{ui} = (500|600)s_u$$

$$R_f \cong 0.7|0.9$$



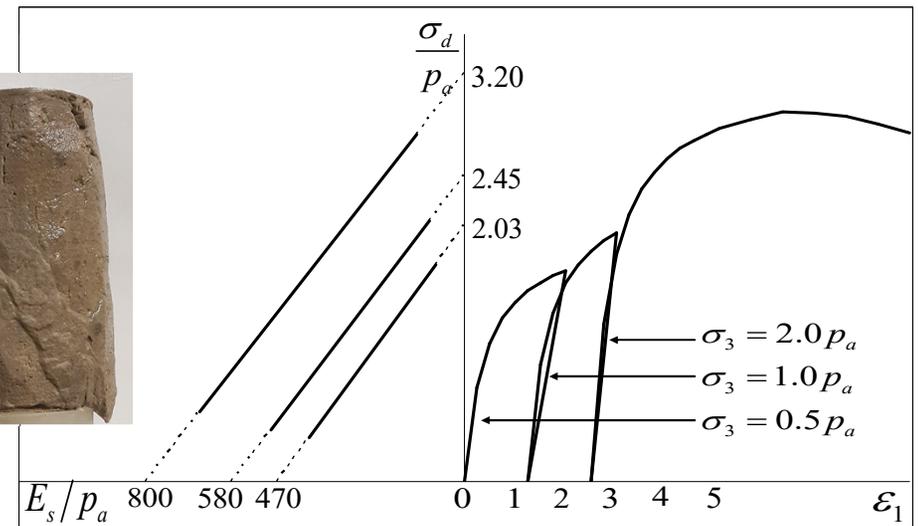
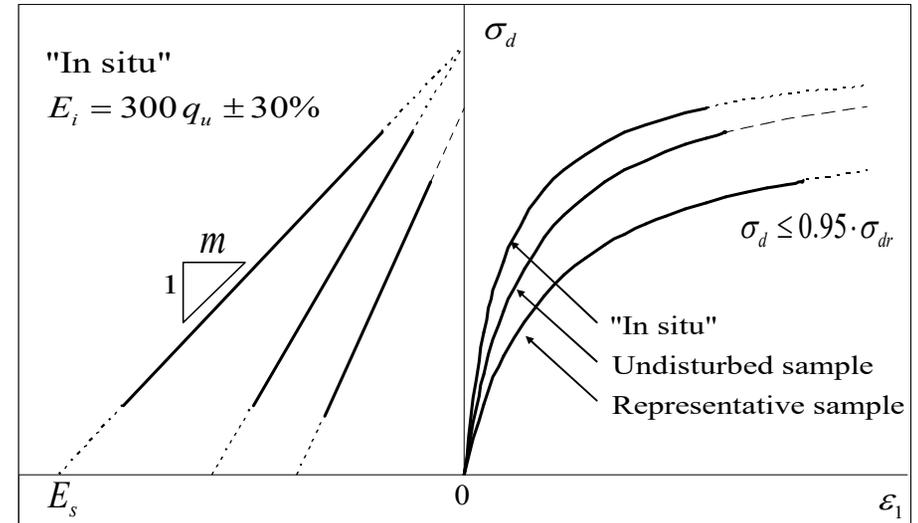
(Tesis P. Sagues, 2007)



Suelos cementados ($c' > 0$): ensayo triaxial escalonado



- En suelos cementados hay mucha dispersión de resultados
- (A veces) es mejor hacer 2 ó 3 escalones de carga sobre una misma muestra
- Un ensayo CIUC o CIDC con 3 escalones de carga puede durar por lo menos 4-5 días

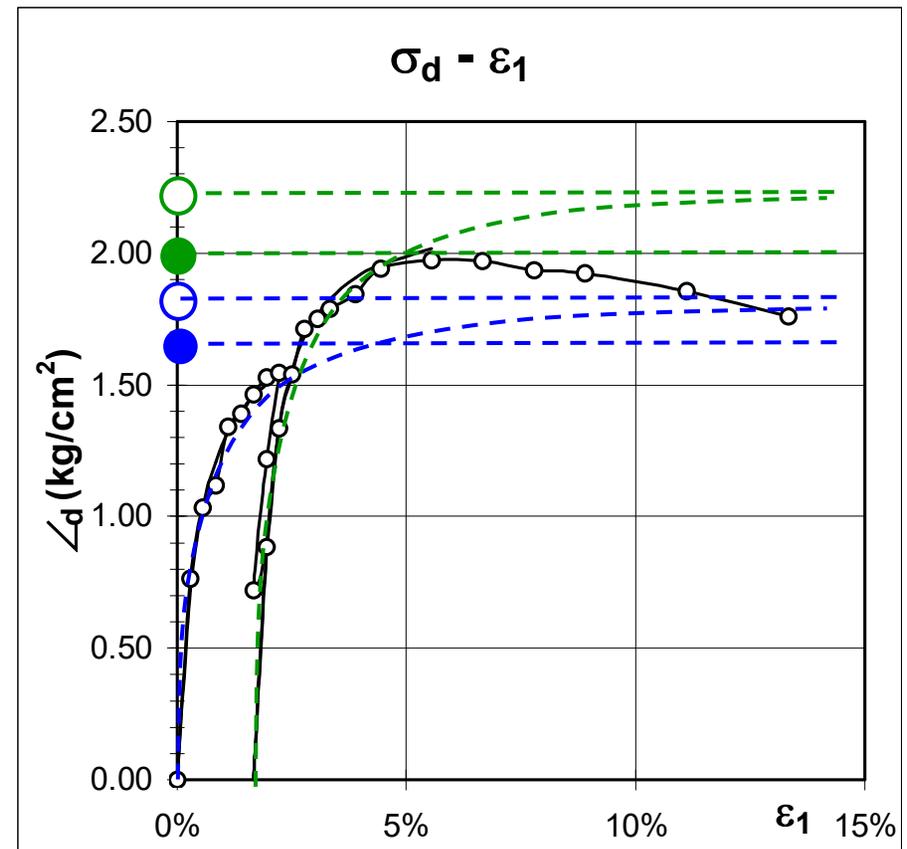
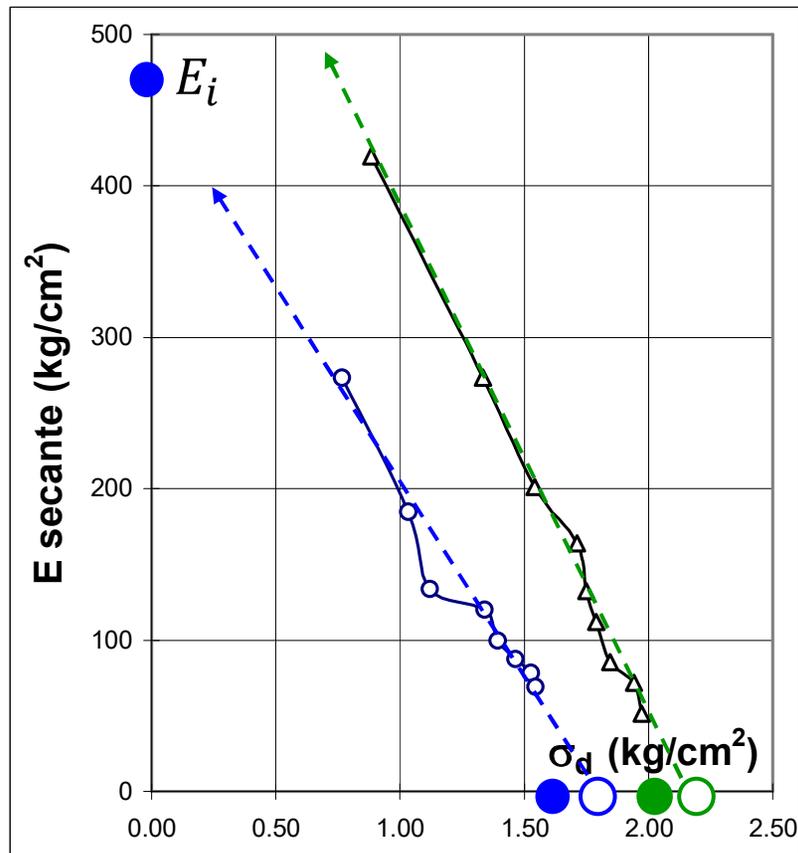




Suelos cementados ($c' > 0$): ensayo triaxial escalonado

Etapa 1: Se avanza hasta que la **línea** es clara

Etapa 2: Se llega a rotura



Índice



- Resistencia al corte drenado
- Resistencia al corte no drenado
- Arcillas inalteradas
- Relación tensión-deformación
- **Un ejercicio integrador**



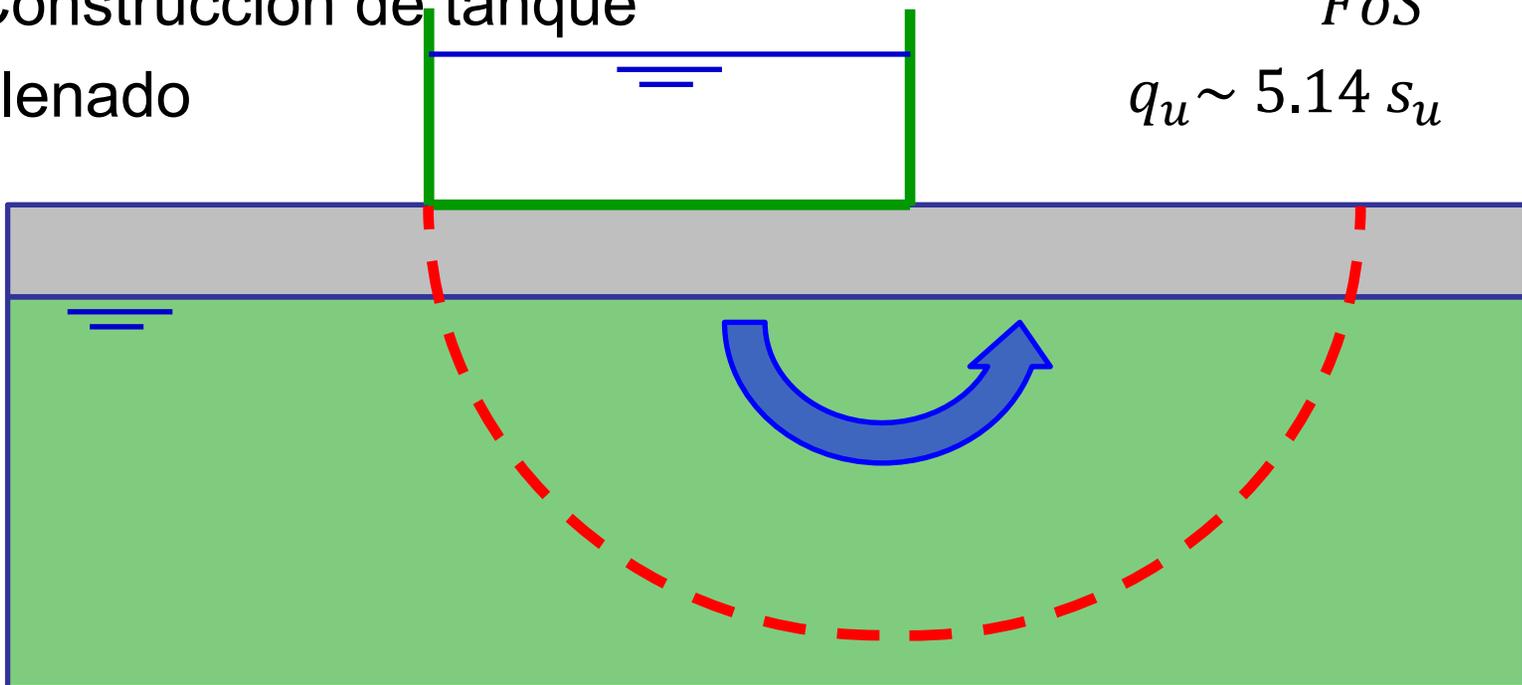
Ejercicio: construcción de tanque sobre relleno de arcilla

Etapas

- 1º Construcción de terraplén compactado
- 2º Construcción de tanque
- 3º Llenado

$$q_{adm} = \frac{q_u}{FoS}$$

$$q_u \sim 5.14 s_u$$





El silo Transcona, 1913





Ejercicio: construcción de tanque sobre relleno de arcilla

Construcción de terraplén compactado (gris) sobre terreno natural (verde= “blando” + bordó= “duro”)

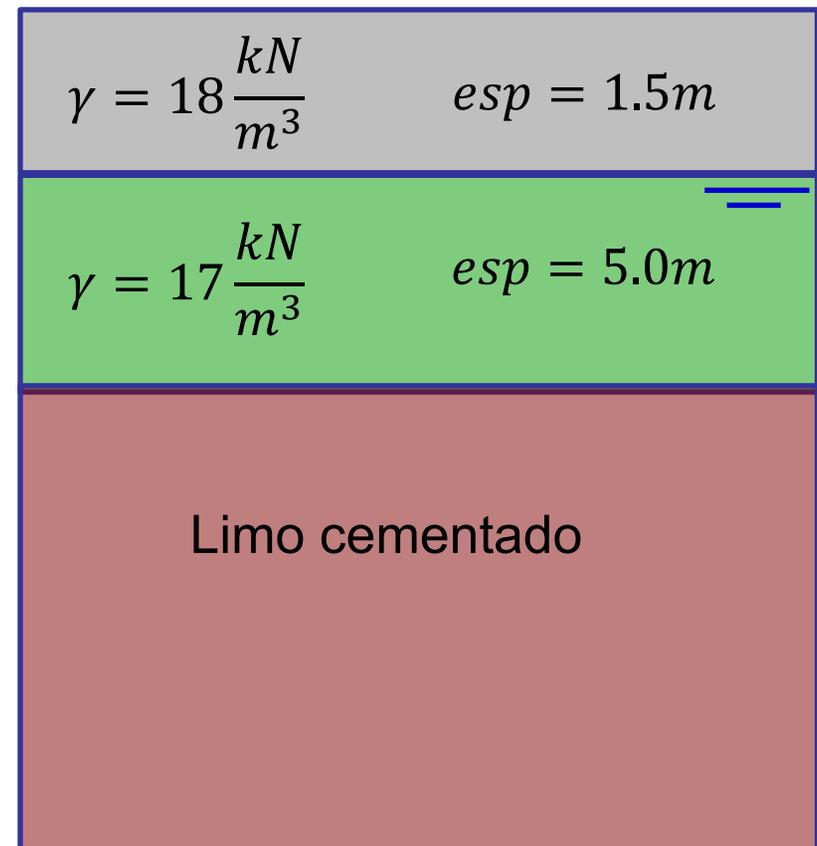
$$\sigma'_v = 18 \frac{kN}{m^3} 1.5m + 7 \frac{kN}{m^3} \frac{5.0m}{2}$$

$$\sigma'_v = 44kPa$$

$$s_u = 0.23\sigma'_v = 10.2kPa$$

$$q_u = 5.14 s_u = 52.4kPa$$

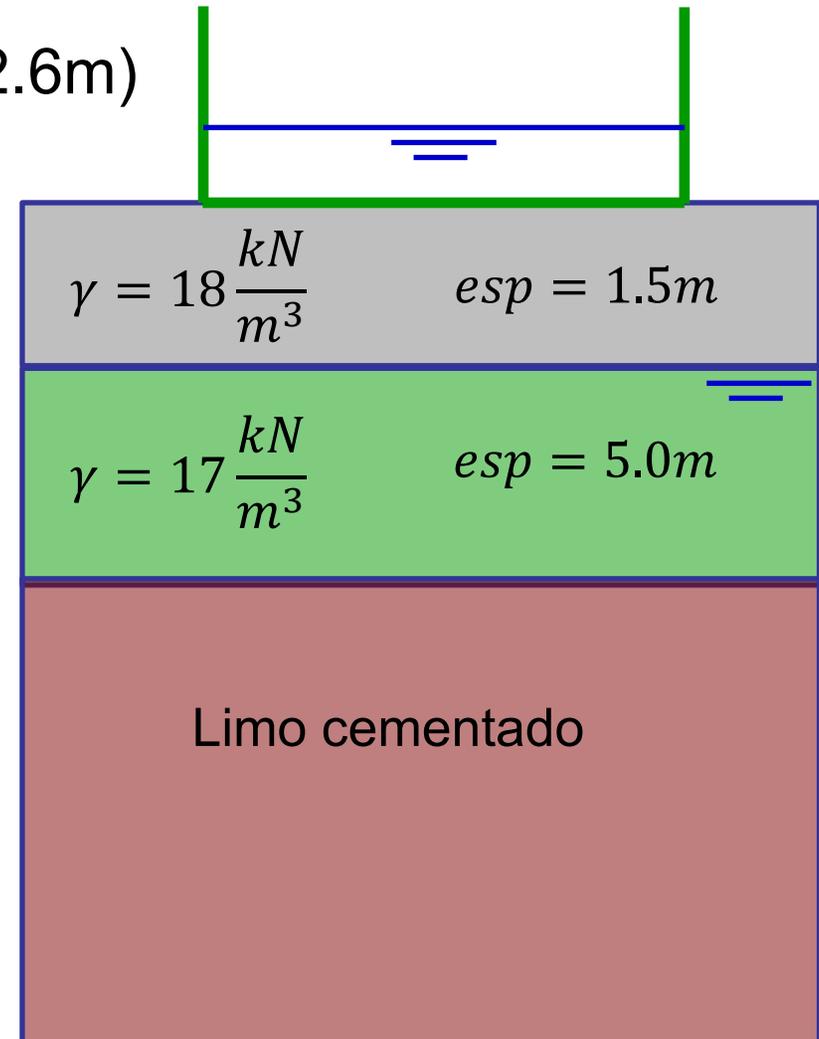
$$q_{adm} = \frac{q_u}{2} = 26.2kPa$$





Ejercicio: construcción de tanque sobre relleno de arcilla

Construcción y llenado de tanque (2.6m)



$$\sigma'_v = 44.5kPa + 10 \frac{kN}{m^3} 2.6m$$

$$\sigma'_v = 70.5kPa$$

$$s_u = 0.23\sigma'_v = 16.2kPa \uparrow$$

$$q_u = 5.14 s_u = 83.3kPa$$

$$q_{adm} = \frac{q_u}{2} = 41.6kPa \uparrow$$



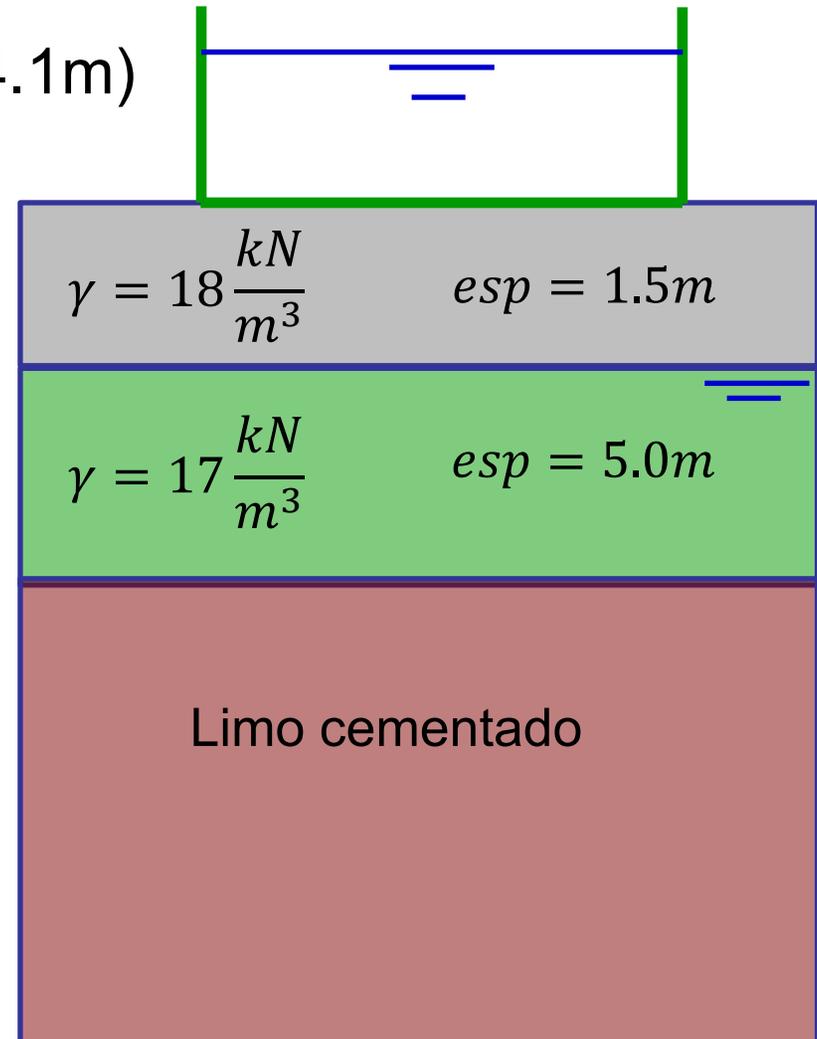
Ejercicio: construcción de tanque sobre relleno de arcilla

Llenado del tanque final ($2.6+1.5= 4.1m$)

$$q_{adm} = \frac{q_u}{2} = 41.6kPa$$

Se puede llenar el tanque hasta su altura final porque la presión aplicada en la primera etapa (2.6m) redujo la relación de vacíos y con ello aumentó la resistencia al corte no drenado del terreno

(el cálculo real es más complejo, lo veremos más adelante)



Bibliografía



Básica

- Powrie. Soil Mechanics. 2^{da} Ed. Spon Press

Complementaria

- Mitchell. Fundamentals of soil behavior. Wiley.
- Terzaghi, Peck, Mesri. Soil Mechanics in Engineering Practice. 3^{ra} Ed. Wiley
- Fredlund y otros. Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. Wiley