

Mecánica Avanzada de Suelos

MCieTAT (UPCT)



Tema 7

Resistencia al corte de suelos

Prof. Gonzalo García Ros



ÍNDICE

- Introducción. Criterio de rotura.

Criterio de rotura de Mohr-Coulomb

Envolvente de rotura

Cálculo de la tensión tangencial y tensiones principales

- Ensayo de corte directo

Equipo de corte (caja de corte)

Realización del ensayo. Modalidades

Resultados y aspectos de interés

- Ensayo triaxial

Descripción del ensayo

Realización del ensayo. Modalidades

Resultados

- Ensayo de resistencia a compresión simple

Descripción del ensayo. Resultados

- Referencias



Al modificar el estado de tensiones de un suelo se producen deformaciones que pueden provocar su rotura. Aunque los suelos cohesivos rompen a veces a tracción, como es el caso de las grietas verticales que, en ocasiones, aparecen en la coronación de un talud deslizado, **la forma más habitual de rotura en suelos es por esfuerzo cortante (tensión tangencial)**.

Criterio de rotura de Mohr-Coulomb

Relaciona esfuerzos efectivos normales y esfuerzos tangenciales actuando sobre cualquier plano del suelo.

Así, para un suelo saturado, la resistencia al corte viene dada por la expresión:

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

Siendo:

τ = resistencia a corte del terreno en un determinado plano

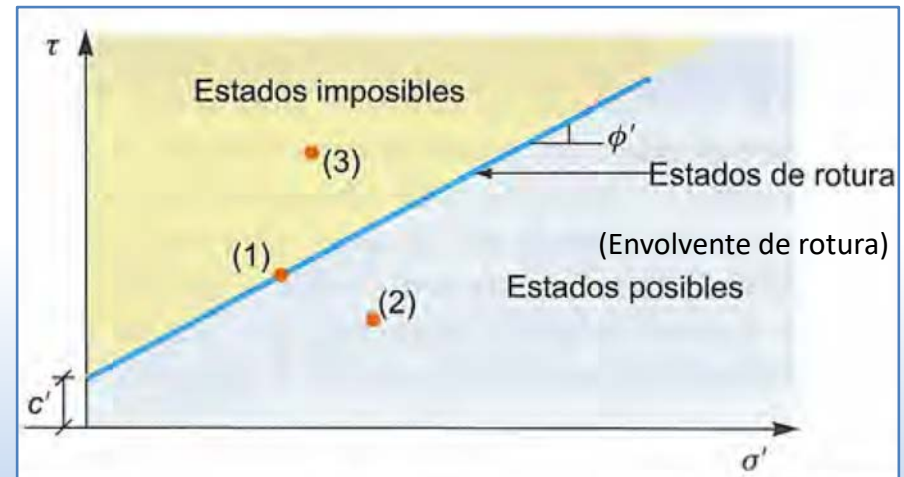
σ_n = esfuerzo normal que actúa sobre ese mismo plano

u = presión intersticial

c' = cohesión efectiva del terreno

ϕ' = ángulo de rozamiento interno efectivo del terreno

**Ensayos de
corte directo y
triaxial**



González de Vallejo et al. (2002)

Envolvente de rotura

El máximo esfuerzo tangencial movilizable (en un plano) es mayor a medida que aumenta el esfuerzo efectivo normal (que actúa sobre dicho plano).

Es decir, **el suelo es más resistente a corte conforme mayor es su nivel de esfuerzos efectivos.**

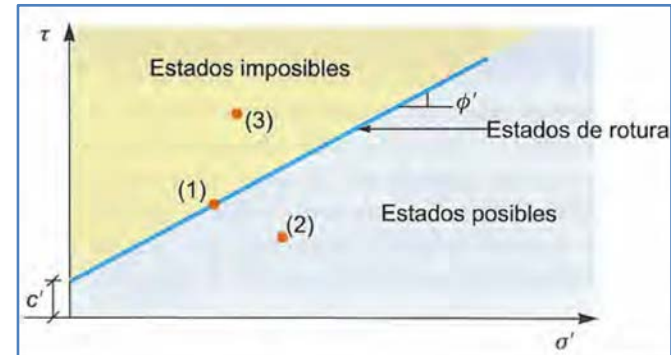
G. García. UPCT



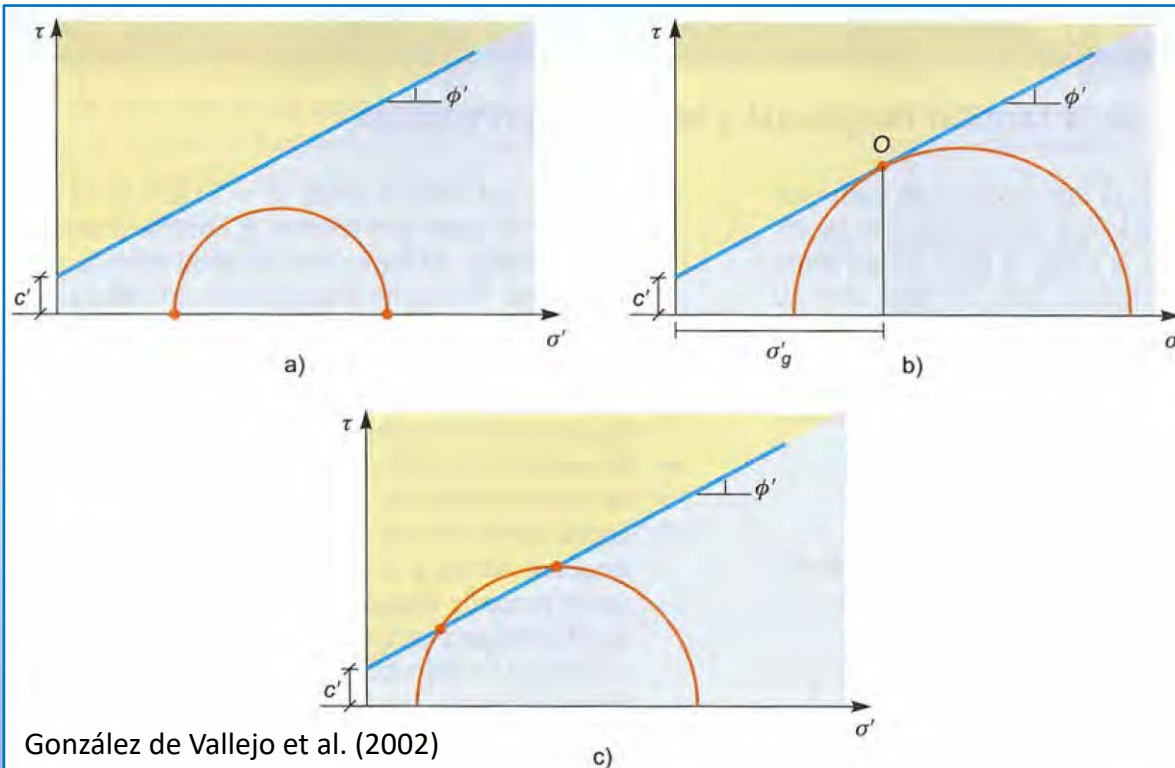
Criterio de rotura de Mohr-Coulomb

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

González de Vallejo et al. (2002)



La envolvente de rotura y el círculo de Mohr



Estados posibles:

- a: al no alcanzar la envolvente de rotura, se cuenta con cierto margen de seguridad
- b: situación de rotura

Estados imposibles

- c: hay planos en los que se exceden las condiciones de σ' y τ de rotura

González de Vallejo et al. (2002)



Cálculo de la tensión tangencial y tensiones principales: veámoslo con un ejemplo

Los parámetros de resistencia intrínseca de un suelo son $c' = 0$, $\phi' = 30^\circ$.

Suponiendo que en un elemento de dicho suelo se ha alcanzado la rotura a favor de un plano que forma 45° con la horizontal para un valor $= 10$ kPa, determinar:

- La tensión tangencial de rotura τ_f
- La orientación y magnitud de las tensiones principales en el elemento de suelo

Solución

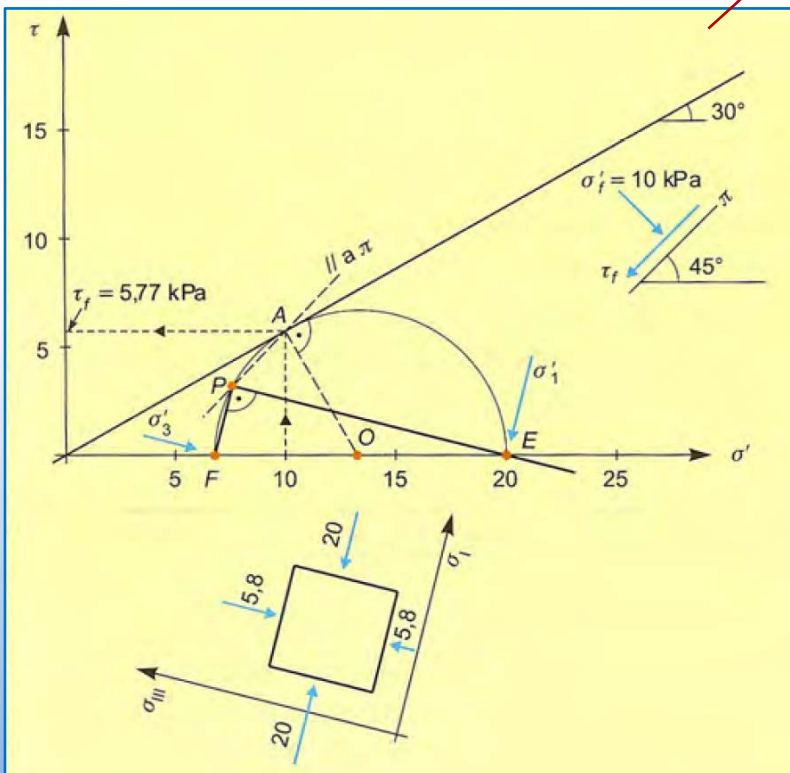
En la figura adjunta se representa de forma gráfica la solución del problema.

Los pasos a seguir son:

-Se traza una vertical desde $\sigma' = 10$ kPa en el eje de abscisas hasta que se corta la línea de resistencia intrínseca. El punto (A) obtenido permite deducir que la tensión tangencial de rotura es $\tau_f = 5,77$ kPa.

- (A) representa los esfuerzos del elemento suelo considerado en el plano de rotura. El círculo de Mohr será tangente en (A) a la línea de resistencia intrínseca. Por tanto, trazando desde (A) una perpendicular a dicha línea se obtiene el centro (O) del círculo, lo que permite trazarlo. La intersección del círculo con el eje de abscisas (puntos E y F) proporciona los valores de las tensiones principales en el elemento de suelo. Midiendo directamente en el gráfico se obtiene: $\sigma'_1 \approx 20$ kPa; $\sigma'_3 \approx 6,8$ kPa.

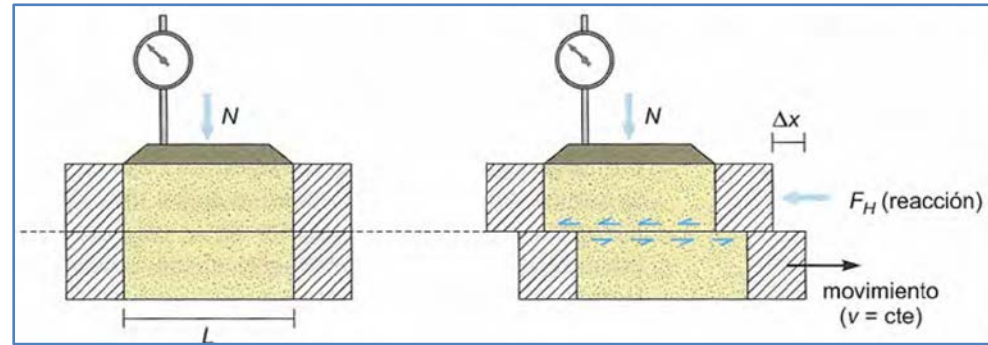
-Dado que (A) representa los esfuerzos del elemento de suelo considerado en un plano que forma 45° con la horizontal, se traza desde (A) una paralela a dicho plano (línea AP, que hace 45° con la horizontal), cortando al círculo de Mohr en el punto (P), que es el polo. Ahora, desde (P) se trazan las rectas (PE) y (PF), obteniéndose las orientaciones de los planos principales mayor y menor respectivamente (las direcciones de las tensiones principales serán perpendiculares a dichos planos). El estado tensional del elemento de suelo en un sistema cartesiano formado por los ejes principales es el mostrado en la figura complementaria.





Equipo de corte (caja de corte)

La muestra se coloca en el interior de una caja rígida de acero, habitualmente de sección cuadrada, que se encuentra dividida en dos mitades. Encima de ésta se dispone una placa de reparto rígida sobre la que se puede aplicar una carga vertical N .



González de Vallejo et al. (2002)

La inducción de tensiones cortantes en la muestra se logra desplazando horizontalmente (a velocidad constante) la parte inferior de la caja de corte, dejando fija la mitad superior. El conjunto se introduce en un recipiente de mayores dimensiones, que puede llenarse de agua para realizar el ensayo en condiciones de saturación (disponiéndose, en este caso, piedras porosas encima y debajo de la muestra para facilitar el drenaje).



Realización del ensayo

Una prueba completa consiste en ensayar tres muestras idénticas del mismo material bajo tres cargas verticales distintas N_1 , N_2 , y N_3 . Esto es, tras dividir por la sección de la muestra (S_o), bajo tres tensiones normales distintas $\sigma'_{n,1}$, $\sigma'_{n,2}$ y $\sigma'_{n,3}$.

En cada uno de los tres ensayos individuales, a medida que se desplaza la parte inferior de la caja a velocidad constante, se va midiendo:

- La fuerza F_H necesaria para impedir el movimiento de la parte superior. Dividiendo dicha fuerza por la sección de la muestra se obtiene la tensión tangencial (τ) actuante en cada momento sobre el plano de corte.
- El desplazamiento vertical de la muestra. Teniendo en cuenta que las paredes de la caja de corte son rígidas, como en el edómetro, la deformación vertical medida proporciona directamente el cambio de volumen de la muestra.

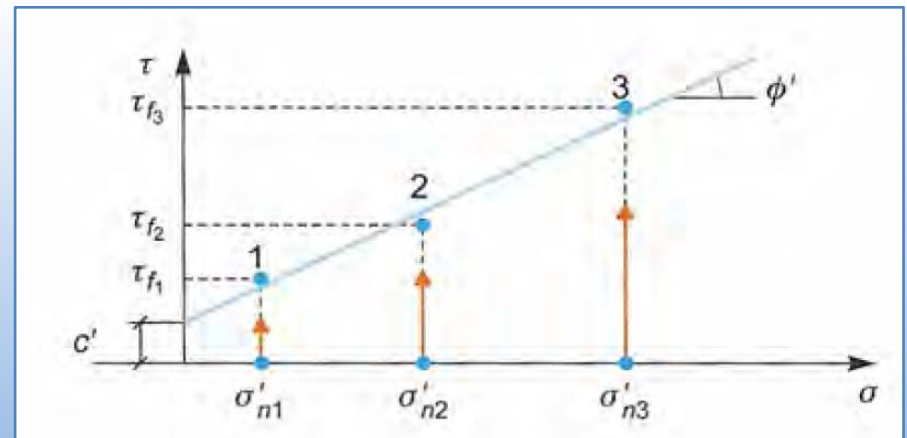
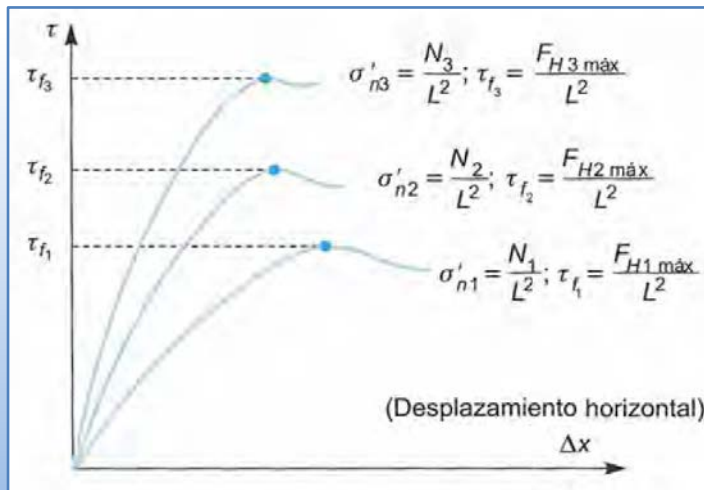


Realización del ensayo. Modalidades

Se pueden efectuar los siguientes tipos de ensayos:

- **Ensayo consolidado-drenado (CD).** Se aplica la presión normal, permitiendo el drenaje del suelo hasta finalizar la consolidación primaria. A continuación se procede a la rotura de la probeta a una velocidad lo suficientemente lenta como para que no se originen presiones intersticiales, permitiendo el libre drenaje del agua de los poros (es aplicable tanto a suelos cohesivos como granulares). De este ensayo se obtienen los parámetros resistentes efectivos, cohesión efectiva, c' , y ángulo de rozamiento interno efectivo, ϕ' .
- **Ensayo consolidado-no drenado (CU).** Se aplica la presión normal, permitiendo el drenaje del suelo hasta finalizar la consolidación primaria. A continuación se procede a la rotura de la probeta a una velocidad lo suficientemente rápida para que no se produzca el drenaje (es aplicable a suelos cohesivos). De este ensayo se obtienen los parámetros resistentes, c_{cu} y ϕ_{cu} .
- **Ensayo no consolidado-no drenado (UU).** La rotura se inicia nada más aplicar la presión normal correspondiente y a una velocidad lo suficientemente rápida para que no se produzca el drenaje (es aplicable a suelos cohesivos). De este ensayo se obtienen los parámetros resistentes, c_u y ϕ_u .
- **Ensayo con varias pasadas después de la rotura.** Se somete la probeta de suelo a varias pasadas una vez finalizado el ensayo normal, para determinar así los parámetros resistentes residuales, c_R y ϕ_R .

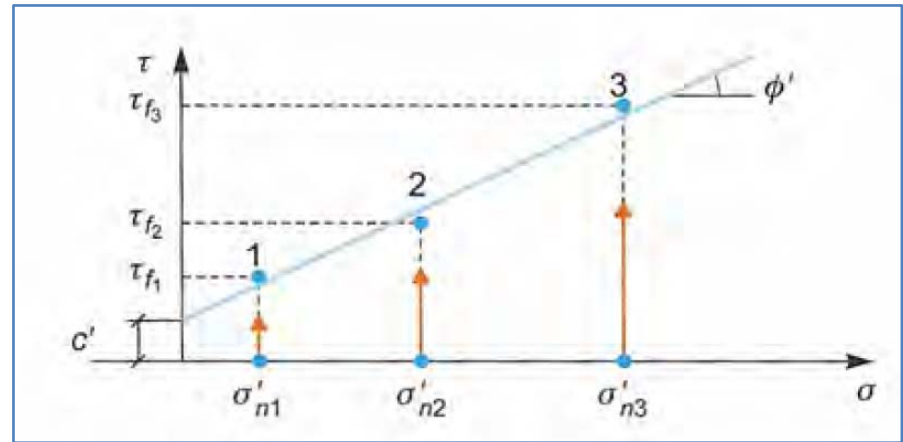
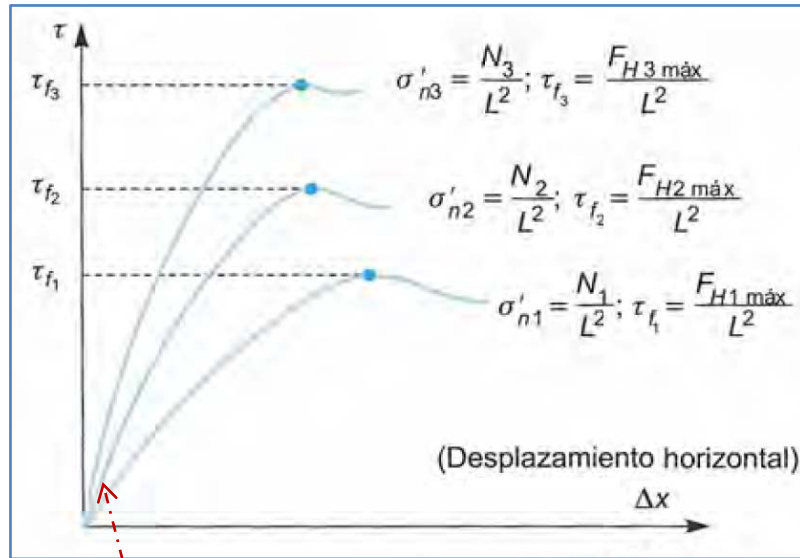
AENOR (1998)



Obtención de la envolvente de rotura y los parámetros de resistencia al corte (c' , ϕ') a partir de un ensayo de corte directo drenado
González de Vallejo et al. (2002)



Realización del ensayo. Resultados y aspectos de interés



Obtención de la envolvente de rotura y los parámetros de resistencia al corte (c' , ϕ') a partir de un ensayo de corte directo drenado. González de Vallejo et al. (2002)

A partir de la envolvente de rotura (figura de la derecha), obtenemos los parámetros resistentes c' y ϕ' , los cuales nos permitirán conocer cuál es la tensión tangencial máxima (τ_f) que resistirá un terreno en función de la tensión efectiva normal aplicada σ'_f .

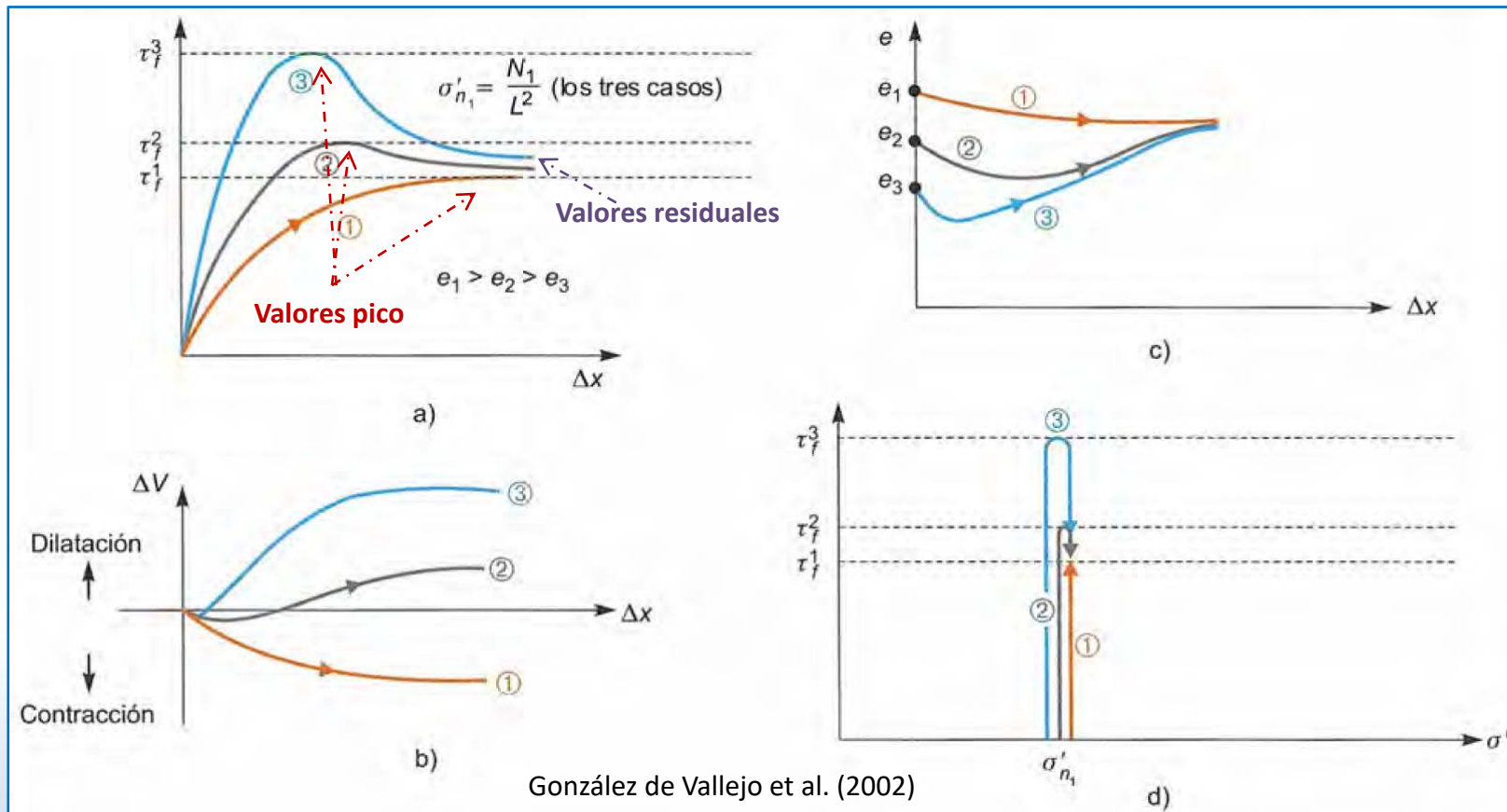
-Sea cual sea la tensión efectiva normal aplicada (en la figura, $\sigma'_{n,1}$, $\sigma'_{n,2}$ o $\sigma'_{n,3}$), la tensión tangencial movilizada aumenta progresivamente a medida que progresa el desplazamiento horizontal de la caja de corte, hasta que se alcanza un máximo (τ_{fi}), tal y como se ve en la figura de la izquierda (curva tensión tangencial-desplazamiento horizontal).

-Cuanto mayor es la tensión efectiva normal inicial, mayor es la tensión tangencial máxima alcanzada, tal y como se ve en la figura de la derecha (envolvente de rotura).

-La pendiente inicial de la curva tensión tangencial-desplazamiento horizontal es más pronunciada cuanto mayor es el esfuerzo efectivo normal inicial, lo que indica que el suelo aumenta la rigidez con el nivel de tensiones.



Realización del ensayo. Resultados y aspectos de interés



Curvas de ensayos de corte drenado sobre muestras granulares con distinta densidad inicial. Muestra 1 en estado muy flojo. Muestra 2 en estado algo más denso. Muestra 3 en estado muy denso.

Figura a: tensión tangencial movilizadora vs. desplazamiento horizontal.

Figura b: cambio de volumen vs. desplazamiento horizontal.

Figura c: índice de poros vs. desplazamiento horizontal.

Figura d: recorrido tensional (σ', τ) sufrido en un plano.

nota

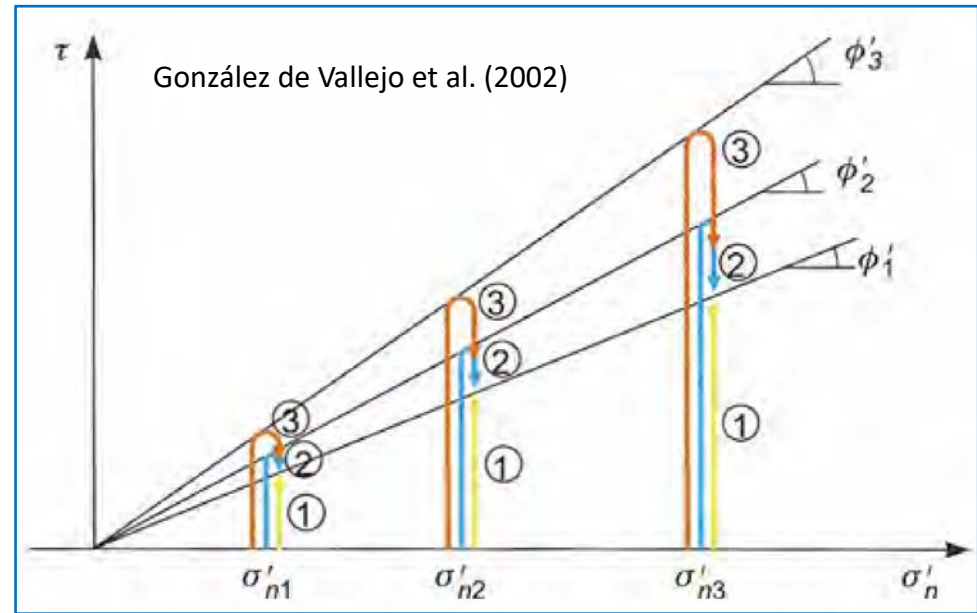
Representación cualitativa, para un determinado valor de la tensión efectiva normal aplicada σ'_n



Realización del ensayo. Resultados y aspectos de interés

Los tres ensayos de corte anteriores (para las muestras 1, 2 y 3) podrían repetirse en muestras idénticas a las anteriores pero sometidas a tensiones efectivas normales mayores (por ejemplo, $\sigma'_{n,1}$, $\sigma'_{n,2}$ y $\sigma'_{n,3}$).

La Figura representa esquemáticamente las **tres envolventes de rotura resultantes**, mostrando cómo el **ángulo de rozamiento (de pico)** depende directamente de la densidad inicial del suelo.



Correlaciones de interés para suelos granulares

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

Valores del ángulo de rozamiento interno en suelos granulares no plásticos en función de la granulometría y la compacidad (*)

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

(*) Hough (1957) sugiere emplear los valores más bajos de cada rango para los suelos redondeados o para aquellos que posean partículas débiles (micas, esquistos), y los más elevados para suelos con partículas angulosas y resistentes.



Descripción del ensayo

Es el ensayo de laboratorio más difundido para el estudio de la resistencia al corte de los suelos.

En el mismo, una probeta cilíndrica de suelo, de altura (H) el doble que el diámetro (D), se rodea de una membrana impermeable y se introduce en una cámara de agua en la que podemos controlar (válvula c de la figura) la presión de cámara (σ_c).

De esta manera, las tres tensiones principales iniciales a las que se encuentra sometida la muestra ($\sigma_{1,0}$, $\sigma_{2,0}$ y $\sigma_{3,0}$), debidas a esta presión de la cámara (σ_c), son iguales: $\sigma_{1,0} = \sigma_{2,0} = \sigma_{3,0} = \sigma_c$, no existiendo, de momento, tensiones tangenciales.

Para introducir tensiones tangenciales, al igual que en el ensayo de corte directo, lo que se hace es imponer un modo de deformación (vertical) que acarrea la creación de tensiones de corte, que finalmente pueden medirse como una determinada reacción que se opone al movimiento (un incremento de la tensión vertical, $\Delta\sigma_1$).

De esta forma, ahora, las tensiones principales valdrán:

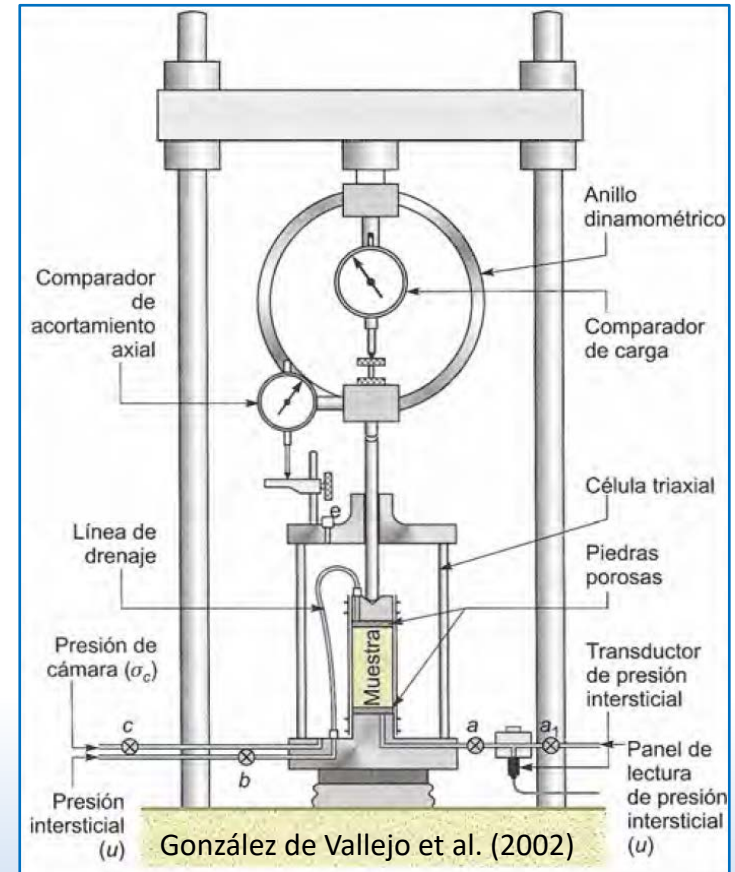
$$\sigma_1 = \sigma_c + \Delta\sigma_1; \quad \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_c$$

Como puede apreciarse a partir de las expresiones anteriores:

El sistema de carga aplicado no es completamente general, sino de simetría axial ($\sigma_2 = \sigma_3$)

La tensión tangencial máxima en cada instante del ensayo viene dada por:

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$



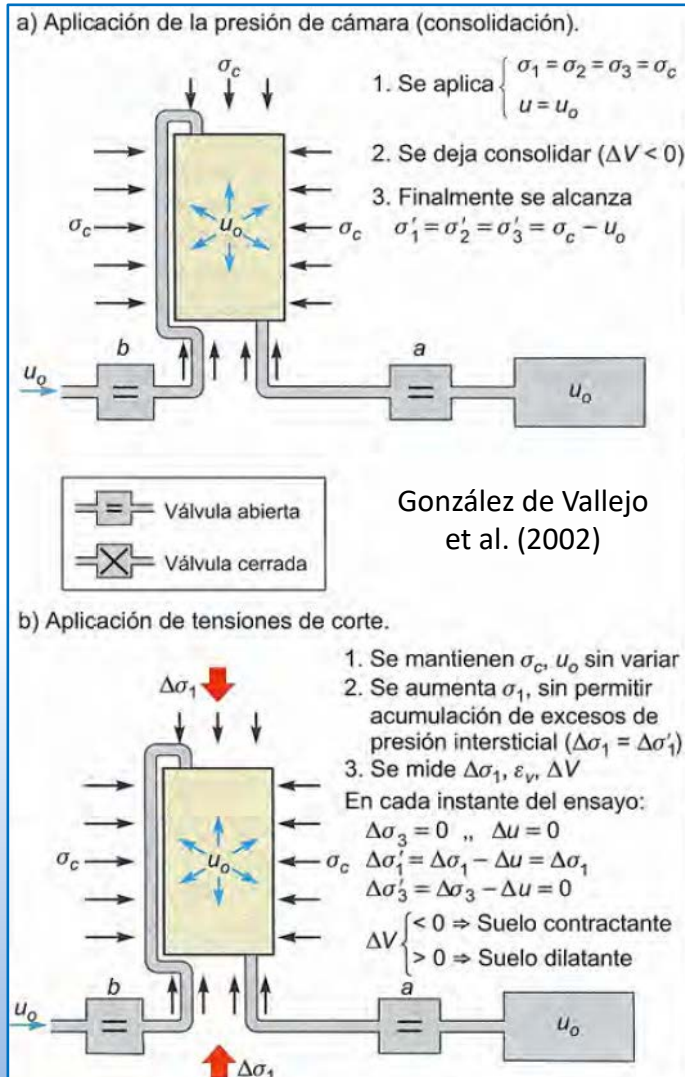
Importante

También es posible aplicar al agua que rellena los huecos del suelo una presión intersticial u (válvula b de la figura). De esta forma, podemos calcular los esfuerzos efectivos como:

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - u = \sigma_c - u + \Delta\sigma_1 \quad \sigma'_2 = \sigma'_3 = \sigma_c - u$$

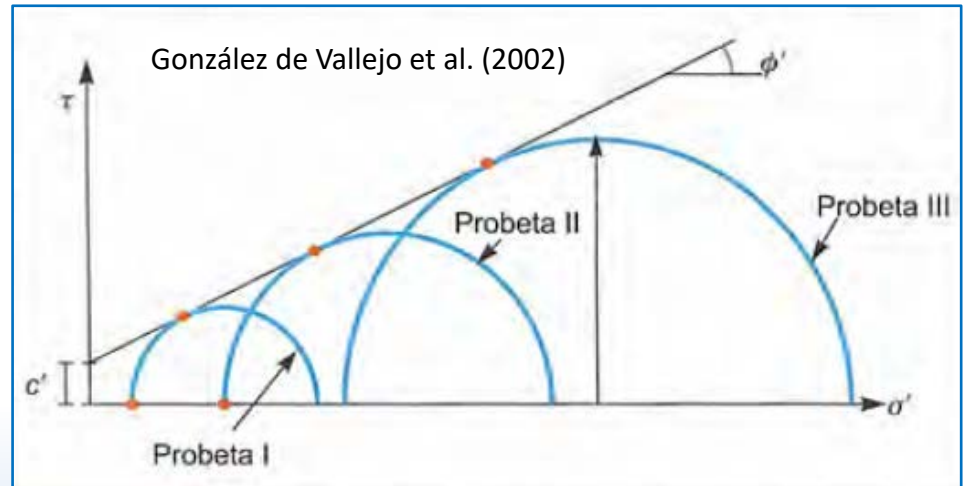
Realización del ensayo. Modalidades. Resultados

Ensayo consolidado drenado (CD)



Fases de un ensayo triaxial CD

Ensayo consolidado drenado (CD)

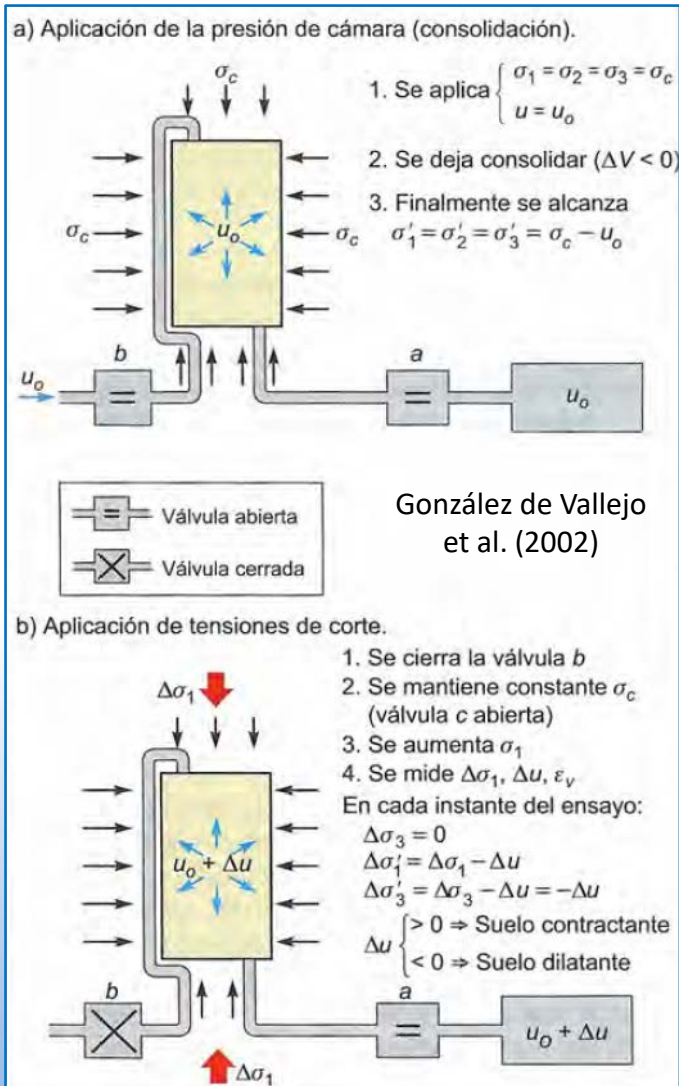


Círculos de Mohr en rotura en ensayos CD (tensiones efectivas)



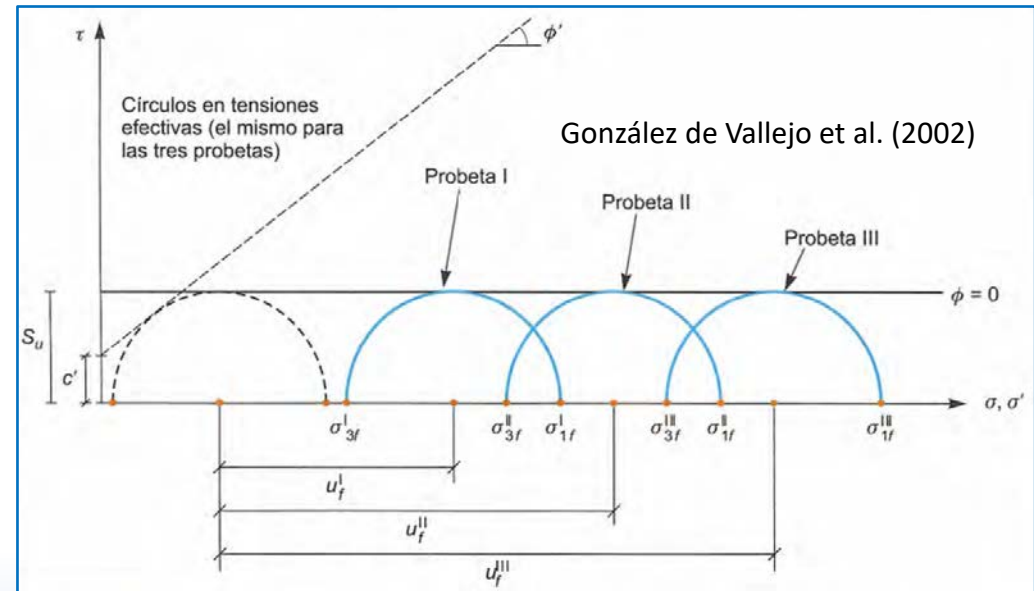
Realización del ensayo. Modalidades. Resultados

Ensayo consolidado no drenado (CU)



Fases de un ensayo triaxial CU

Ensayo no consolidado no drenado (UU)



Círculos de Mohr en rotura en un ensayos UU (tensiones totales)



Descripción del ensayo. Resultados

Este ensayo consiste en colocar una probeta de suelo cilíndrica o prismática en una prensa ordinaria y romperla a compresión, sin ningún confinamiento lateral, es decir con $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$.

Por esto último, sólo puede llevarse a cabo sobre arcillas, limos o suelos predominantemente cohesivos dado que, de no ser así, la ausencia de confinamiento lateral conllevaría al desmoronamiento de la probeta.

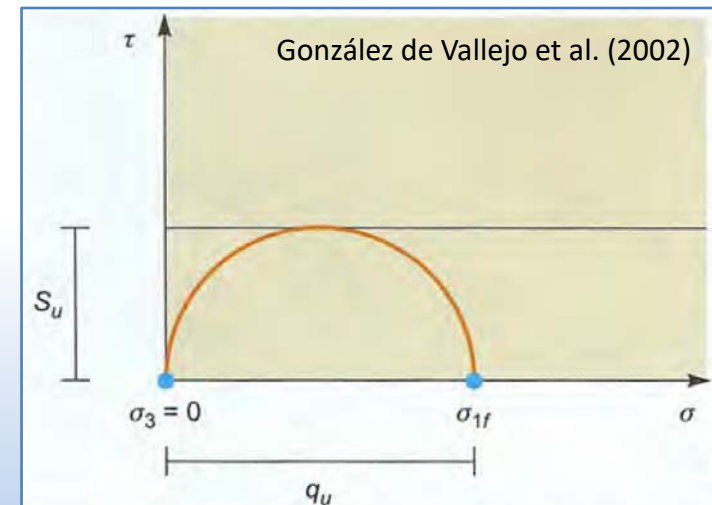
El ensayo se realiza de forma muy rápida, de formar que no se produce disipación de las presiones intersticiales que se generen en el interior de la muestra (es un **ensayo no drenado**).



estudiosgeotecnicos.info

En la Figura de la derecha se observa el círculo de Mohr en tensiones totales que se obtiene para este tipo de ensayos. La tensión total menor σ_3 es nula, y la **resistencia a la compresión simple** (denominada habitualmente q_u), es el desviador de tensiones ($\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_1 - 0 = \sigma_1 = q_u$).

El radio del círculo de Mohr será la **resistencia al corte sin drenaje** S_u , es decir, $S_u = q_u/2$, siempre que el suelo esté normalmente consolidado y saturado.



Clasificación de las arcillas en función de su resistencia

González de Vallejo et al. (2002)

Consistencia de la arcilla	Resistencia a la compresión simple (kPa)
Muy blanda	< 25
Blanda	25-50
Medianamente firme	50-100
Firme	100-200
Muy firme	200-400
Dura	> 400

En función de la resistencia a la compresión simple, las arcillas pueden clasificarse de la siguiente manera:



<https://www.cotecno.cl/resistencia-al-cizallamiento-de-los-suelos-y-sus-pruebas/>

González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación.

<https://www.utest.com.tr/es/25749/M-quina-Autom-tica-para-Corte-Directo-Residual>

AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación. *Determinación de los parámetros resistentes al esfuerzo cortante de una muestra de suelo en la caja de corte directo, UNE 103 401*. Madrid, España, 1998

<https://estudiosgeotecnicos.info/index.php/ensayos-de-laboratorio-resistencia-de-los-suelos-1/>

Mecánica Avanzada de Suelos

MCieTAT (UPCT)



**Gracias por su
atención**

Tema 7

Resistencia al corte de suelos

Prof. Gonzalo García Ros