

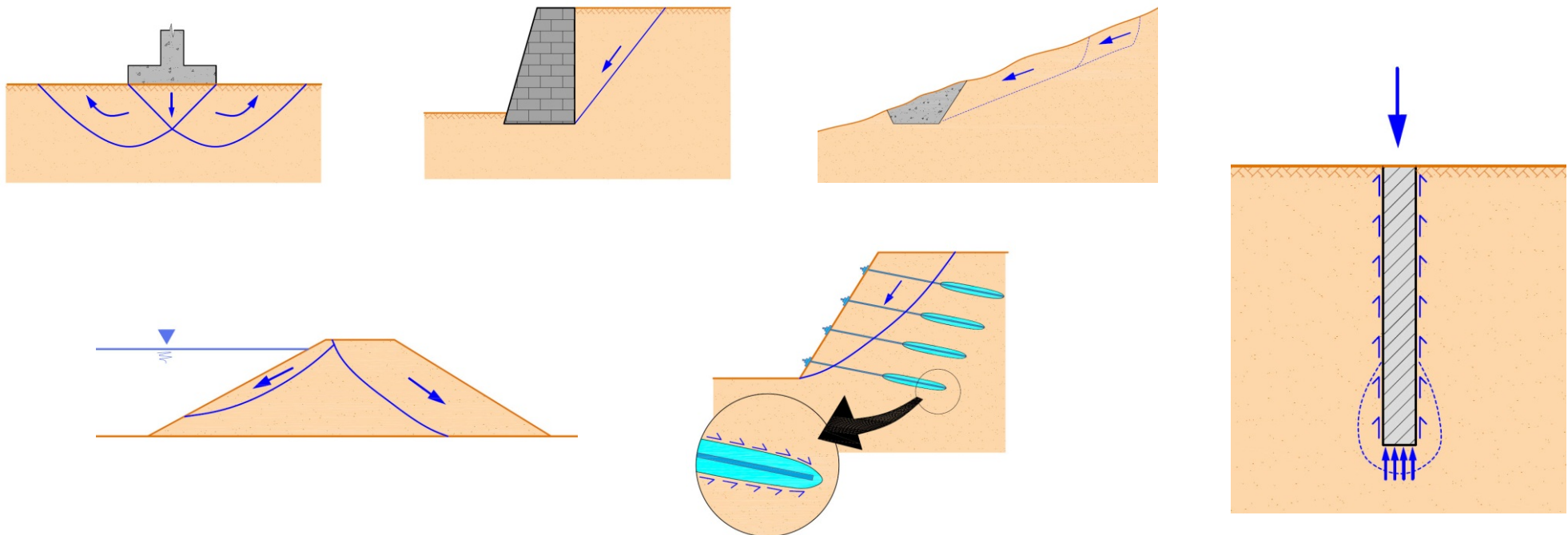
CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE LA RESISTENCIA AL CORTE EN LOS SUELOS

Luis Ortuño
Uriel & Asociados, S.A.
E.T.S.I.C.C.P.
Universidad Politécnica de Madrid
lortuno@urielyasociados.es

INTRODUCCIÓN

Cambiar el estado tensional del suelo produce deformaciones. Dependiendo de su magnitud, puede alcanzarse su "rotura". Aunque a veces los terrenos con cohesión rompen por tracción, lo más habitual es que la rotura del terreno se produzca por esfuerzo cortante (tensión tangencial).

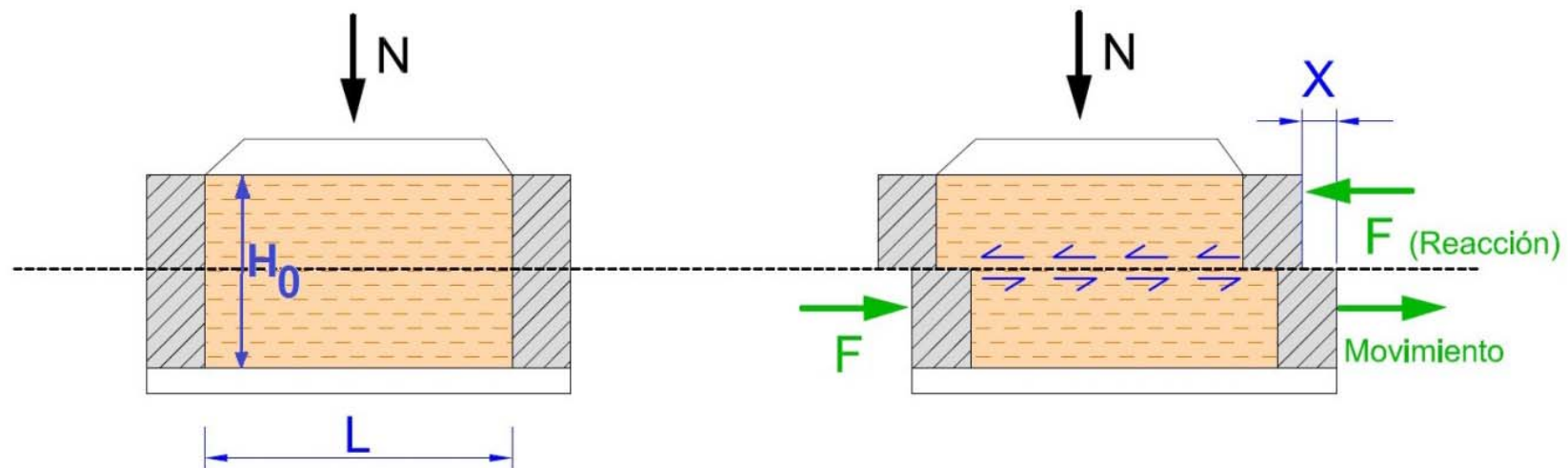
El conocimiento de la resistencia al corte del terreno es fundamental para prácticamente la totalidad de los problemas relacionados con la Mecánica del Suelo. La mayor parte de los objetivos de la Geotecnia consiste en averiguar, de un lado, cuál es la resistencia al corte del suelo (mediante ensayos de laboratorio sobre muestras del terreno o mediante ensayos "in situ") y, de otro, cuáles son las tensiones que originan las actuaciones sobre él (la construcción de una zapata, la excavación de un desmonte, etc.) para compararlas y determinar con qué coeficiente de seguridad se cuenta.



RESISTENCIA AL CORTE. EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO

El criterio de rotura empleado habitualmente en suelos deriva del propuesto por Coulomb en 1773. Relaciona la máxima tensión tangencial movilizable (τ) a favor de cualquier plano que atraviesa un elemento de suelo con las tensión efectiva normal (σ') actuante sobre dicho plano. Para medir la resistencia a corte del terreno se acude la ejecución de ensayos específicos. Uno de ellos, el ensayo de corte directo, resulta especialmente indicado para describir los conceptos básicos asociados a la resistencia al corte del suelo.

Se trata de una caja cuadrada⁽¹⁾ o circular, de paredes rígidas, sin tapa ni fondo, en cuyo interior se coloca la muestra de suelo. La caja está dividida horizontalmente en dos partes iguales. Sobre la cara superior de la muestra se coloca una placa rígida y se aplica una carga vertical (N). Todo el conjunto se introduce en un recipiente de acero de mayores dimensiones, que puede llenarse de agua para realizar el ensayo en condiciones de saturación (en este último caso se pueden disponer también piedras porosas encima y debajo de la muestra para facilitar el drenaje). La inducción de tensiones cortantes en el suelo se logra trasladando horizontalmente la parte inferior de la caja de corte mientras que se impide totalmente el movimiento de la zona superior.



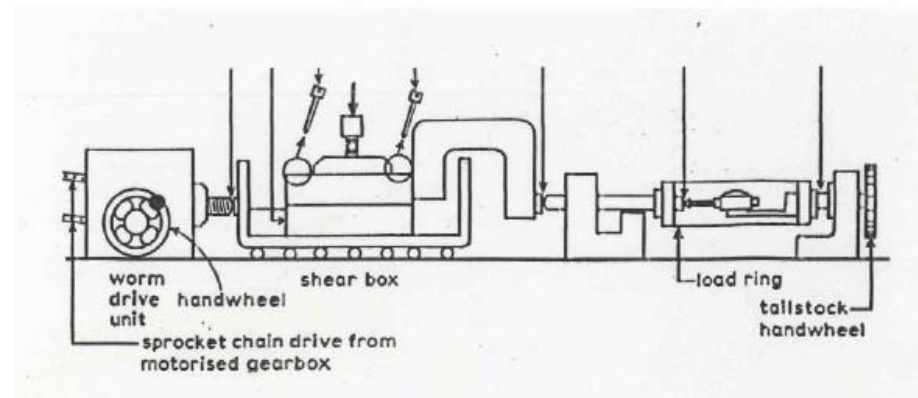
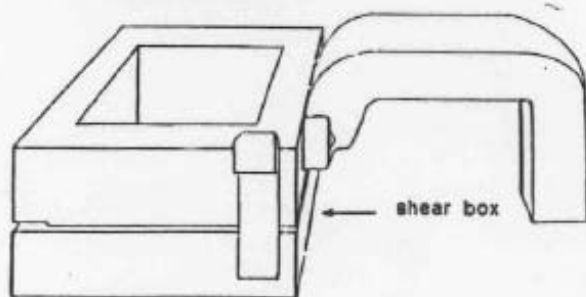
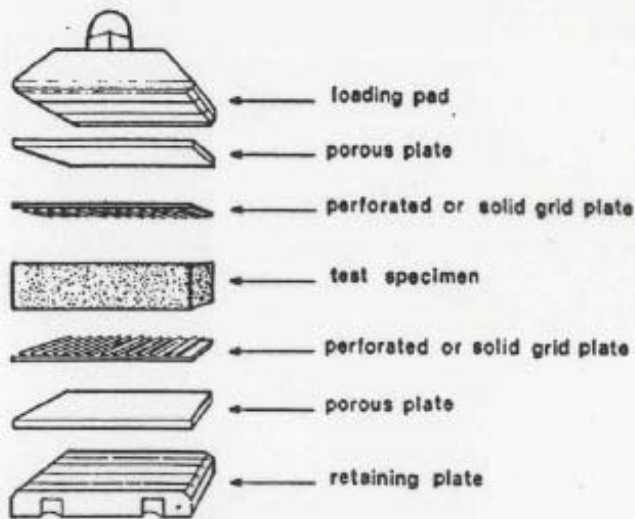
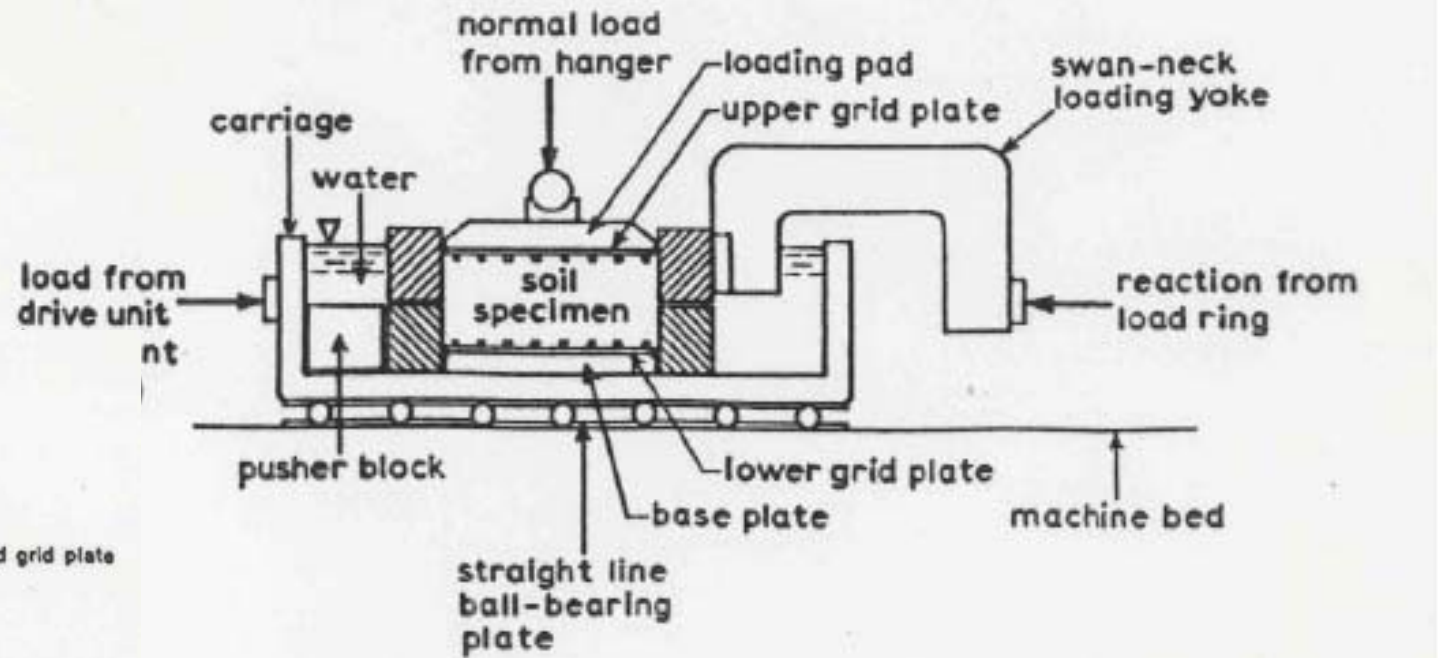
(1) En cajas de corte cuadradas, las dimensiones habituales de las probetas son $L = 6$ cm y $H_0 = 4,2$ cm

EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO



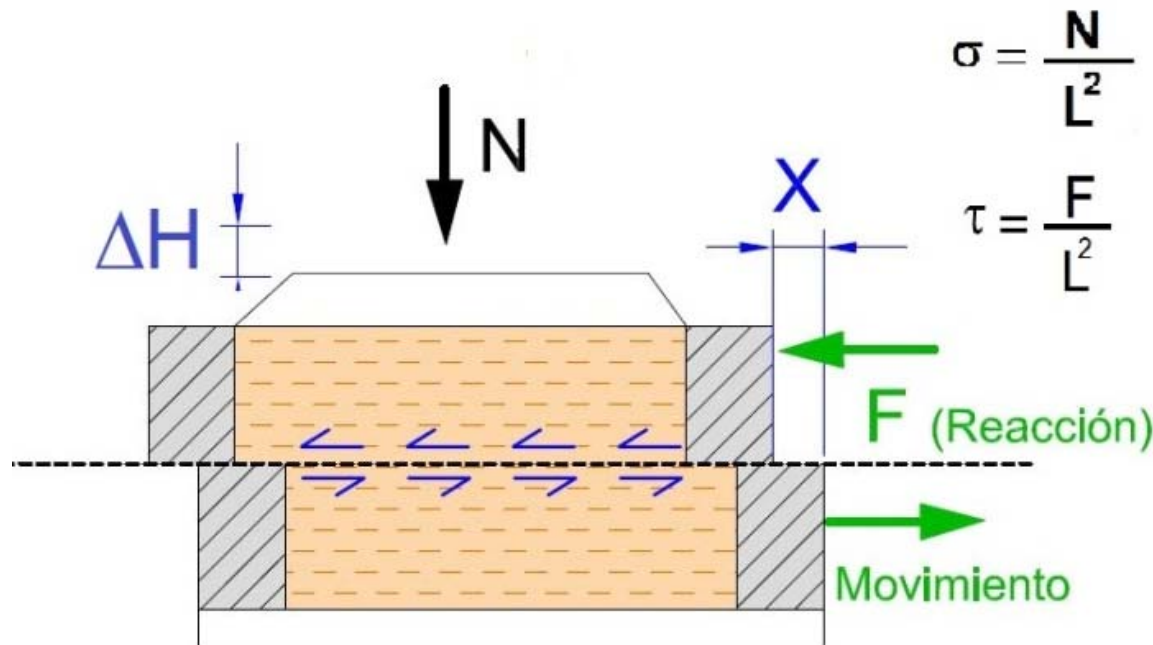
URIEL & ASOCIADOS
S.A. DE INGENIERIA GEOTECNICA

La inducción de tensiones cortantes en el suelo se logra trasladando horizontalmente la parte inferior de la caja de corte mientras que se impide totalmente el movimiento de la zona superior.

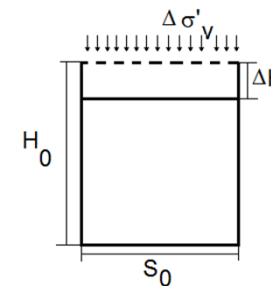


EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO CD CONSOLIDADO Y CON DRENAJE

- Un ensayo de corte directo típico CD consiste en ensayar tres muestras idénticas de suelo bajo tres presiones efectivas normales crecientes: $\sigma_1 = N_1/L^2$, $\sigma_2 = N_2/L^2$; $\sigma_3 = N_3/L^2$, con $N_1 < N_2 < N_3$.
- Tras la aplicación de la presión efectiva normal correspondiente y una vez que la muestra ha consolidado, se introduce la fase de corte, que consiste en obligar a la parte inferior de la caja de corte a desplazarse en horizontal a velocidad constante mientras se impide el movimiento de la parte superior. Se va midiendo en diversos instantes a lo largo del ensayo:
 - El desplazamiento horizontal (X) de la mitad inferior de la caja.
 - La fuerza horizontal (F) necesaria para impedir el movimiento de la parte superior. Dividiendo por la sección de la probeta se obtiene la tensión tangencial movilizada en cada instante.
 - El desplazamiento vertical de la placa situada sobre la muestra (ΔH)



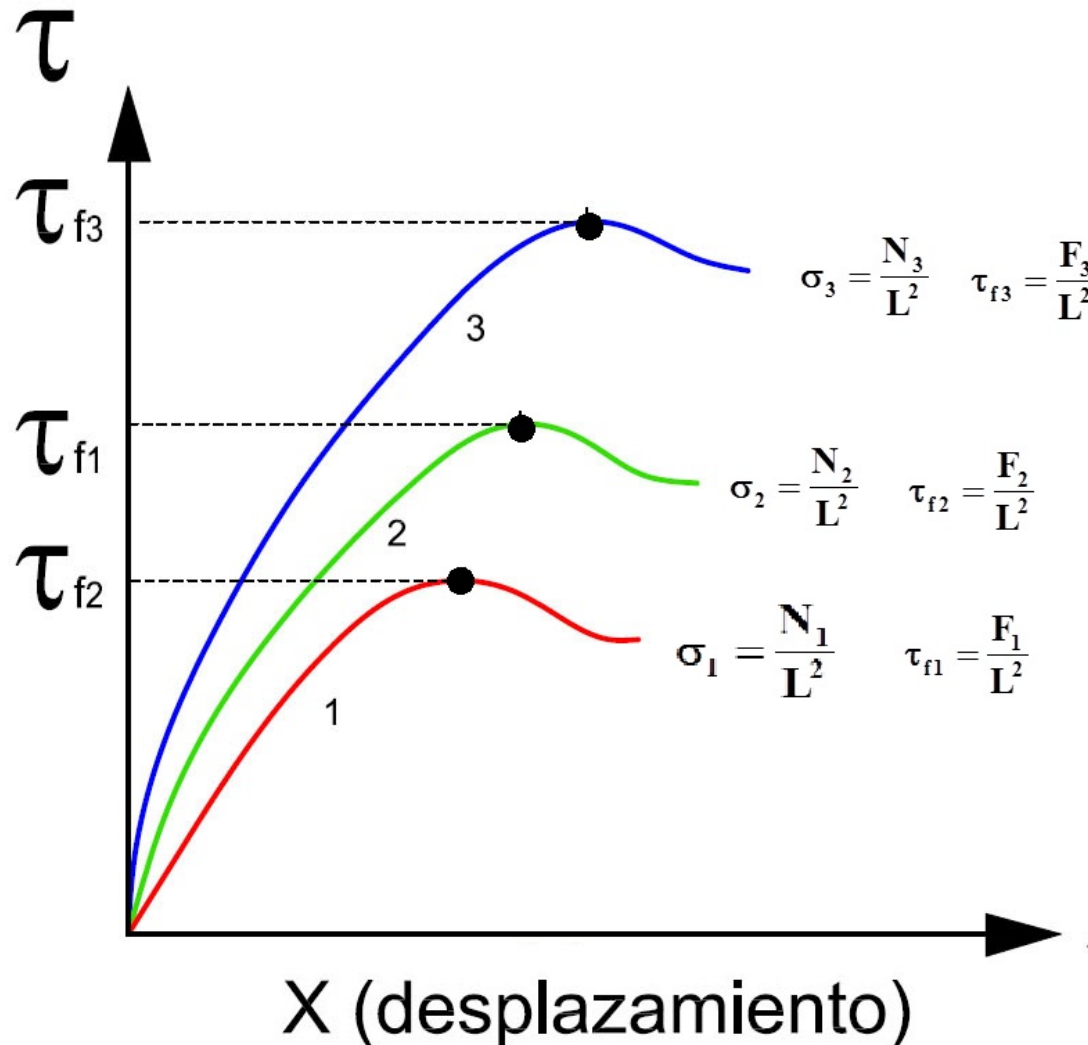
Teniendo en cuenta que las paredes de la caja de corte son rígidas, como en el edómetro, la deformación vertical medida proporciona directamente el cambio de volumen de la muestra:



$$\delta \varepsilon_v = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta H \cdot S_0}{H \cdot S_0} = \frac{\Delta V}{V_0} = \delta v$$

EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO CD CONSOLIDADO Y CON DRENAJE

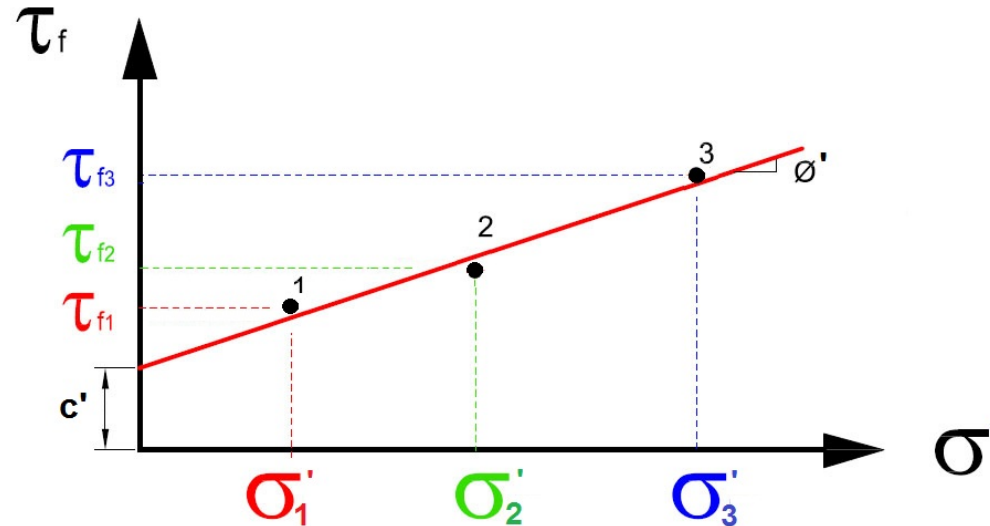
- c) Si se representa la tensión tangencial movilizada con respecto al desplazamiento horizontal de cada uno de los ensayos se obtienen tres curvas, en las que se observa:



- Para cada tensión efectiva normal (σ'), la tensión tangencial movilizada (τ) aumenta a medida que progresa el desplazamiento (las deformaciones de corte), hasta que se alcanza un máximo (τ_f). A partir de ahí la tensión tangencial puede mantenerse o bajar.
- Cuanto mayor es la tensión efectiva normal inicial, mayor tensión tangencial máxima se alcanza (“el suelo resiste más a medida que aumenta su grado de confinamiento”)
- La pendiente inicial de la curva tensión tangencial-desplazamiento horizontal es pronunciada cuanto mayor es la tensión efectiva normal inicial. Esto indica que el suelo aumenta de rigidez con el nivel de confinamiento.

EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO CD CONSOLIDADO Y CON DRENAJE

- d) Si se representa la tensión tangencial máxima movilizada con respecto a la tensión efectiva normal en cada ensayo se obtienen tres puntos, que se pueden aproximar bastante bien a una recta (para niveles tensionales discretos). Este criterio de rotura fue propuesto por Coulomb en 1773.



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

Donde:

c' = cohesión efectiva

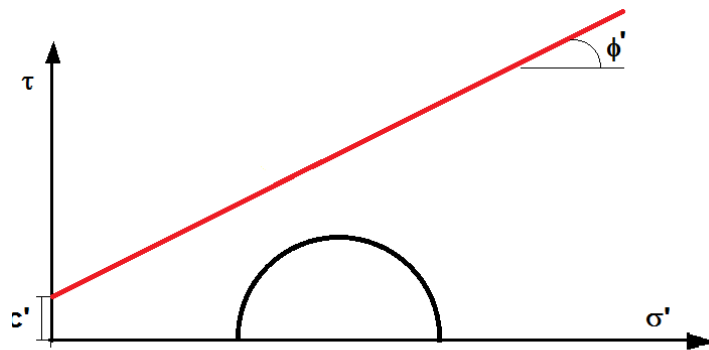
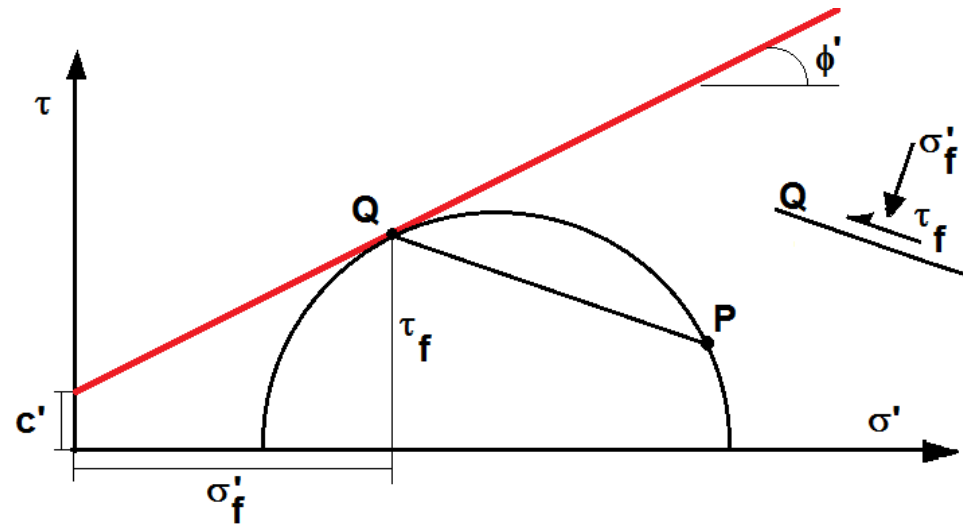
ϕ' = ángulo de rozamiento interno efectivo

- e) La recta definida es una envolvente de rotura y proporciona, para cada valor de la tensión efectiva normal al plano de corte del ensayo, la máxima tensión tangencial movilizable. De la observación de la figura se pueden deducir algunos aspectos interesantes:

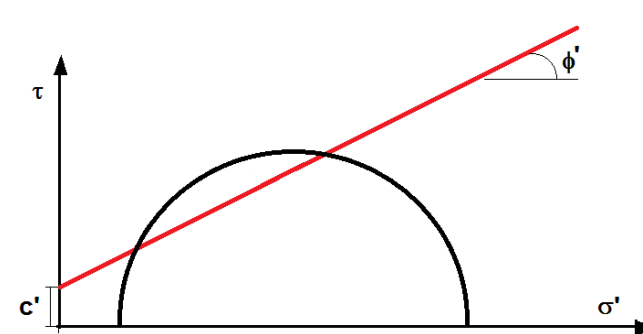
1. La máxima tensión tangencial movilizable aumenta (es decir, el suelo es más resistente) a medida que aumenta la tensión efectiva normal.
- 2.- La cohesión efectiva representa la máxima resistencia tangencial movilizable en el plano de corte cuando la tensión efectiva normal sobre dicho plano es nula.
- 3.- La línea de resistencia definida separa estados posibles de imposibles. Los puntos situados sobre ella (rotura) o por debajo de ella son posibles. Los situados por encima no pueden alcanzarse.

EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO CD CONSOLIDADO Y CON DRENAJE

- f) Empleando el concepto del círculo de Mohr se puede ampliar la definición anterior: En la figura se muestra un círculo de Mohr correspondiente al estado tensional de un elemento de suelo. Ya que cada punto del círculo representa el estado tensional a favor de un plano que atraviesa el elemento, si se alcanza la rotura precisamente en un plano (Q) será porque el círculo de Mohr es tangente a la envolvente de rotura precisamente en el punto representativo del estado tensional en ese plano. Si el polo de planos es P, la orientación del plano Q a favor del cual se alcanza la combinación (σ'_f, τ_f) de rotura es inmediata de obtener.



Estado seguro



Estado imposible

EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO CD CONSOLIDADO Y CON DRENAJE

Notas adicionales:

- g) Si el ensayo se realiza con la muestra saturada y la célula inundada, para el ensayo CD, como se ha indicado, se deja consolidar la muestra hasta que se disipen los excesos de presión intersticial generados. Esta fase es similar a un escalón del ensayo edométrico, de manera que se puede dibujar la curva asiento tiempo y comprobar cuándo finaliza la consolidación, momento en el que se puede suponer que la tensión total aplicada se ha transformado íntegramente en tensión efectiva.
- h) En la fase de corte la velocidad de desplazamiento horizontal ha de ser lo suficientemente pequeña como para asegurar la disipación de los excesos de presión intersticial generados por las tensiones tangenciales aplicadas (ver más adelante). En estas condiciones los resultados vendrán expresados directamente en tensiones efectivas ($\sigma_n = \sigma'_n$). La selección de la velocidad de corte depende naturalmente de tipo y permeabilidad del suelo ensayado. La fase de consolidación proporciona información a este respecto.
- i) El aparato de corte presenta ventajas e inconvenientes

COMPORTAMIENTO CUALITATIVO DE LAS ARENAS SOMETIDAS A CORTE

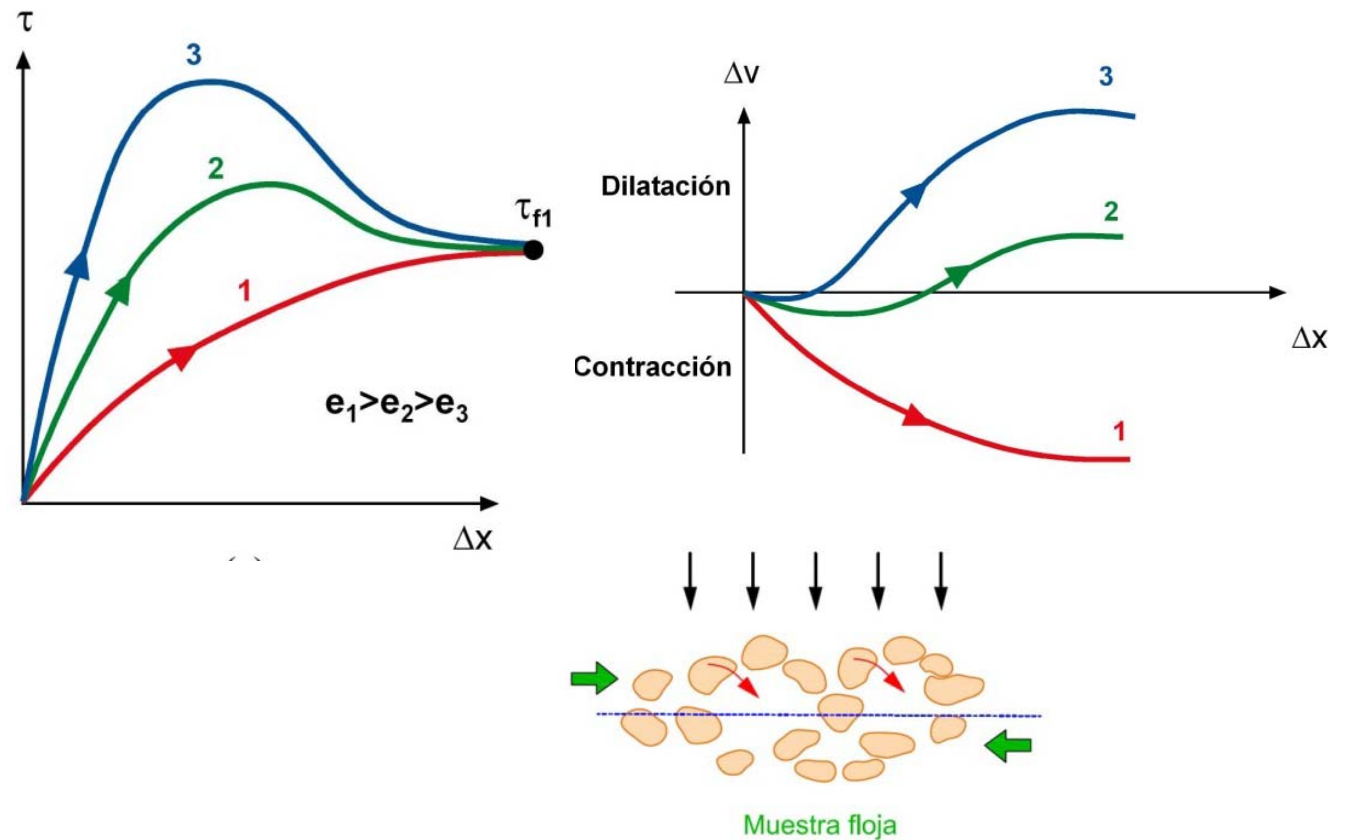
Supóngase que se ensayan tres muestras de la misma arena en tres condiciones distintas de densidad inicial (o índice de poros). Por simplicidad se supondrá que las tres muestras se ensayan en condiciones drenadas, de manera que las tensiones totales y efectivas coincidirán en todo momento.

La muestra (1) se encuentra en un estado muy flojo, con un índice de poros (e_1) elevado. La muestra (2), constituida por la misma arena, es algo más densa que la anterior, de forma que tiene menos volumen de huecos y su índice de poros (e_2) es menor que el de la muestra (1). La muestra (3) es muy densa, con menor volumen de huecos que las dos anteriores y por tanto con el menor índice de poros (e_3) de las tres. Las tres se montan en sendos aparatos de corte, se consolidan a una misma tensión efectiva normal, σ'_{v1} y finalmente se someten a corte.

Muestra de baja densidad (1)

La tensión tangencial movilizada aumenta con el desplazamiento horizontal (Δx) hasta alcanzar un valor máximo (τ_{f1}). A partir de ese instante se mantiene aproximadamente constante aunque el desplazamiento horizontal prosiga.

Desde el inicio del ensayo se observa que la muestra reduce su volumen al ser sometida a tensiones cortantes. También se llega a una cierta magnitud del desplazamiento horizontal a partir del cuál no se observan cambios apreciables de volumen. El índice de poros a partir de ese momento es (e_{CV}).

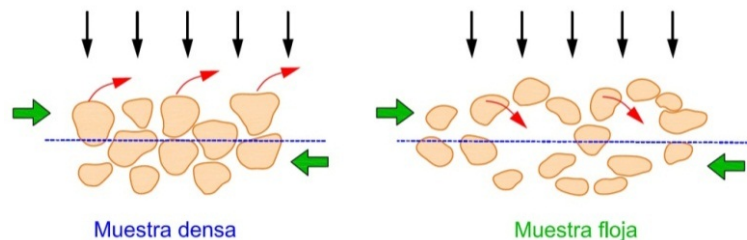
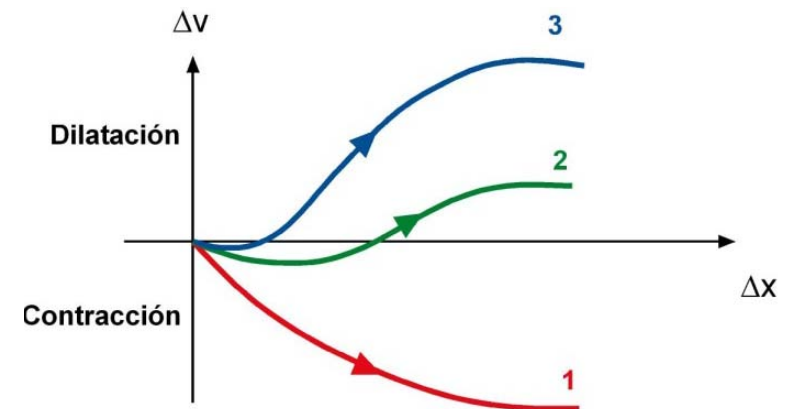
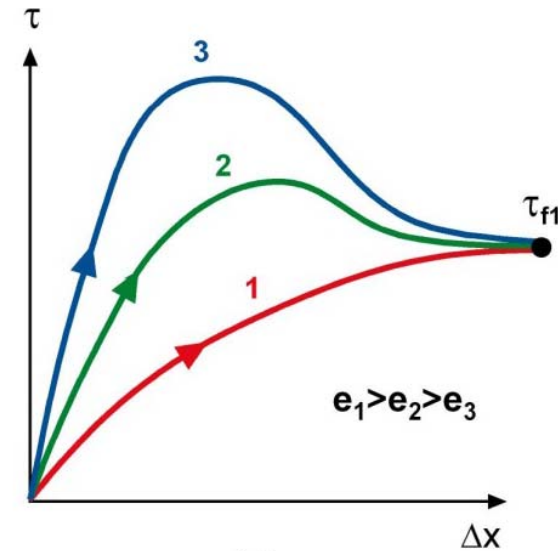


COMPORTAMIENTO CUALITATIVO DE LAS ARENAS SOMETIDAS A CORTE

Muestra de densidad media (2)

Como en la muestra (1), la tensión tangencial movilizada aumenta con el desplazamiento horizontal (Δx). En este caso la pendiente de la curva (τ , Δx) es mayor, y además se alcanza una tensión tangencial máxima (resistencia de "pico" (τ_{f2}) claramente superior a (τ_{f1}). Estas observaciones indican que la muestra (2), más densa que la (1), resulta también más rígida y resistente. Sin embargo, si prosigue el desplazamiento horizontal, la tensión tangencial movilizada decrece hasta que termina por converger con (τ_{f1}).

Al principio del ensayo la muestra disminuye de volumen (contracción). Sin embargo, llegado a un punto pueden comenzar a producirse aumentos de volumen (dilatación). Finalmente y como en el caso anterior, con suficiente desplazamiento se alcanza un estado a partir del cuál no se observan cambios apreciables de volumen. El índice de poros a partir de ese momento es también aproximadamente (e_{cv}).

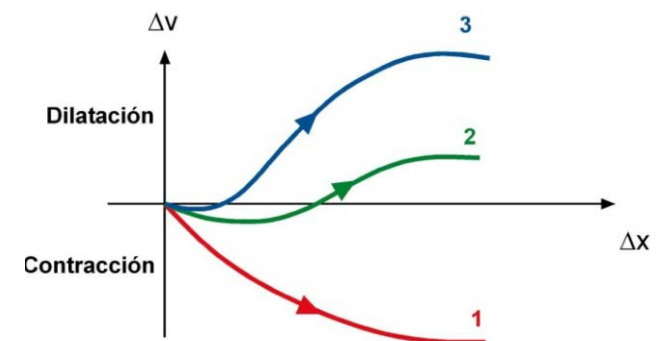
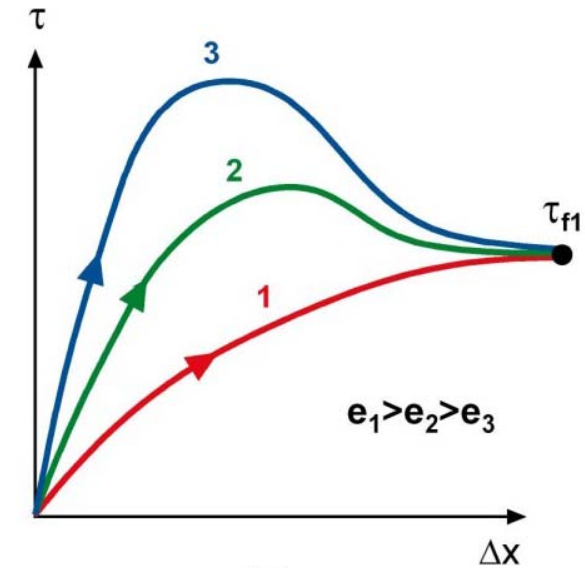
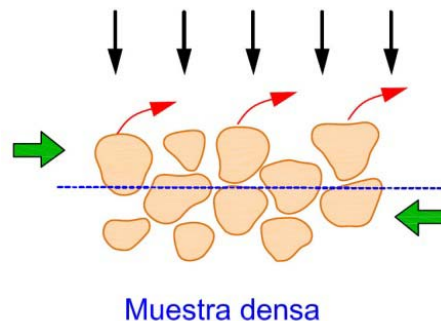


COMPORTAMIENTO CUALITATIVO DE LAS ARENAS SOMETIDAS A CORTE

Muestra de densidad elevada (3)

Este último ensayo muestra una mayor pendiente de la curva (τ , Δx), así como la máxima tensión tangencial movilizada. De hecho, se puede observar una resistencia de “pico” (τ_{f3}) muy superior a las máximas tensiones tangenciales alcanzadas en los otros dos ensayos. En definitiva, la muestra más densa revela un comportamiento más rígido, y resulta sustancialmente más resistente. En cualquier caso, como en los ensayos realizados sobre muestras menos densas, con suficiente desplazamiento horizontal la tensión tangencial movilizada decrece hasta que termina por converger con (τ_{f1}).

Al principio del ensayo se pueden producir pequeños contracciones debidas a reajustes en el aparato de corte, pero rápidamente comienzan a registrarse aumentos netos de volumen. Este comportamiento indica que la muestra densa resulta claramente dilatante, tendiendo a aumentar de volumen cuando se la somete a corte. Como en los casos anteriores, con suficiente desplazamiento se alcanza un estado a partir del cuál cesan los cambios apreciables de volumen y el índice de poros converge hacia (e_{CV}).



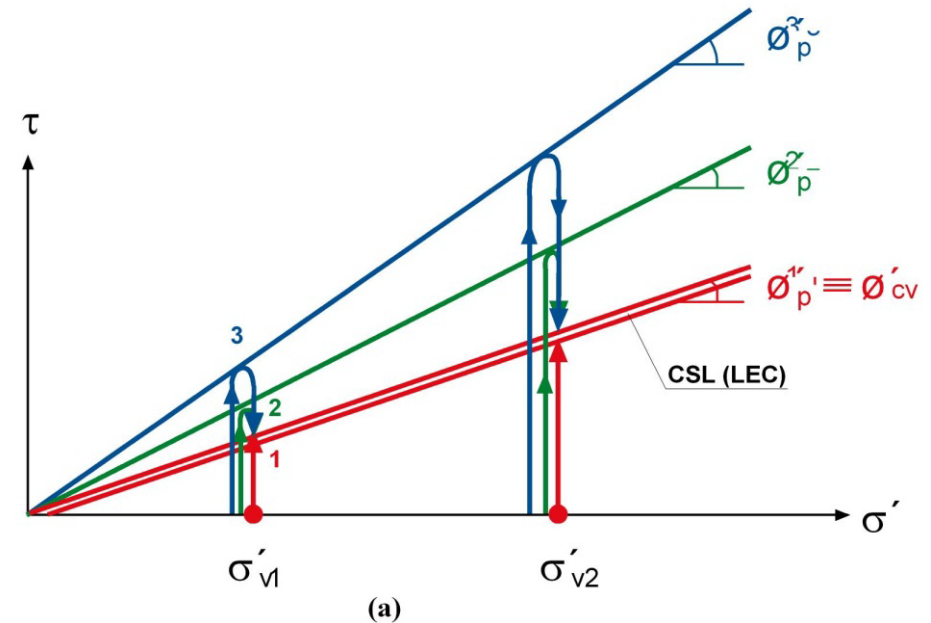
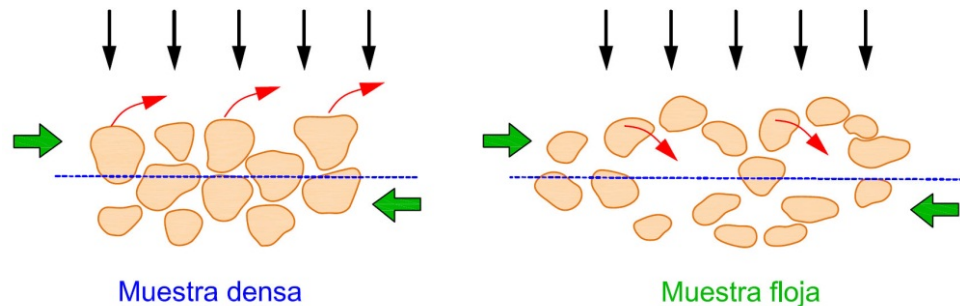
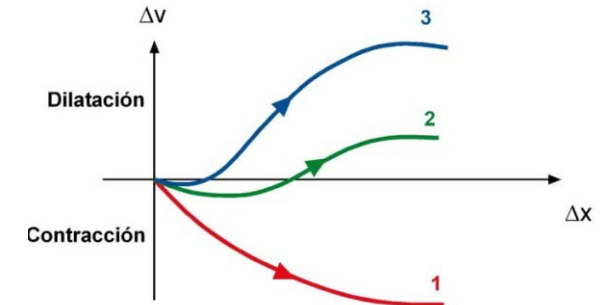
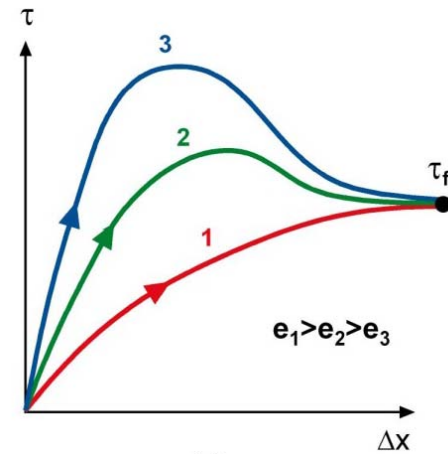
COMPORTAMIENTO CUALITATIVO DE LAS ARENAS SOMETIDAS A CORTE

Resumen y conclusiones.

Sometidas a corte, las arenas densas son dilatantes, mientras que las arenas flojas son contractantes.

Al aumentar la densidad inicial aumenta la tensión tangencial máxima movilizada (mayor ángulo de rozamiento “de pico”).

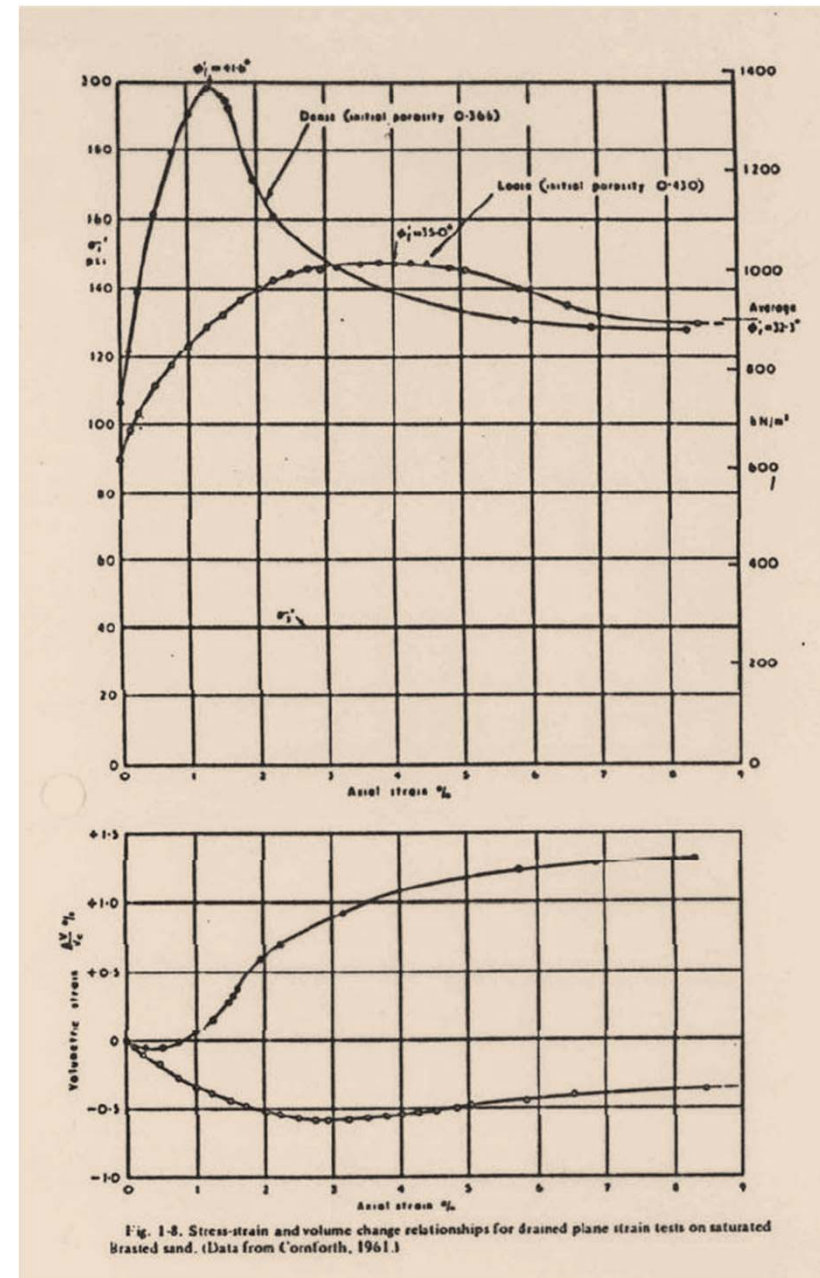
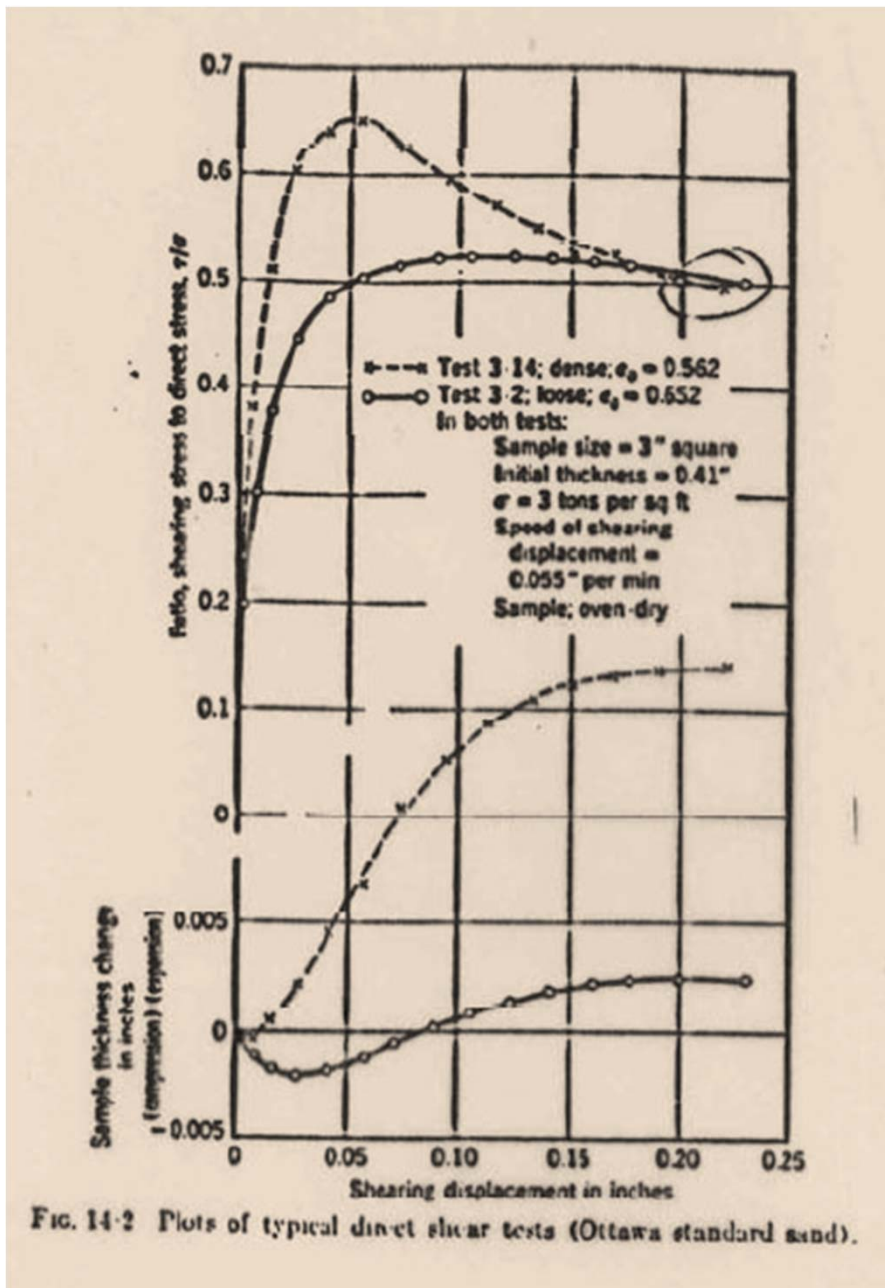
No obstante, con deformación suficiente se alcanza una situación en la que convergen las tensiones tangenciales movilizadas y los índices de poros instantáneos (densidad). Las deformaciones de corte prosiguen sin más cambios de tensión tangencial o de volumen.



COMPORTAMIENTO CUALITATIVO DE LAS ARENAS SOMETIDAS A CORTE



URIEL & ASOCIADOS
S.A. DE INGENIERIA GEOTECNICA



COMPORTAMIENTO CUALITATIVO DE LAS ARENAS SOMETIDAS A CORTE

Table 11.2 Effect of Angularity and Grading on Peak Friction Angle

Shape and Grading	Loose	Dense
Rounded, uniform	30°	37°
Rounded, well graded	34°	40°
Angular, uniform	35°	43°
Angular, well graded	39°	45°

From Sowers and Sowers, 1951.

Table 11.3 Summary of Friction Angle Data for Use in Preliminary Design

Classification	Friction Angles							
	Slope Angle of Repose		At Ultimate Strength		At Peak Strength			
	$i(^{\circ})$	Slope (vert. to hor.)	$\phi_{cr}(^{\circ})$	$\tan \phi_{cr}$	Medium Dense		Dense	
					$\phi(^{\circ})$	$\tan \phi$	$\phi(^{\circ})$	$\tan \phi$
Silt (nonplastic)	26	1 on 2	26	0.488	28	0.532	30	0.577
	to 30	1 on 1.75	to 30	to 0.577	to 32	to 0.625	to 34	to 0.675
Uniform fine to medium sand	26	1 on 2	26	0.488	30	0.577	32	0.675
	to 30	1 on 1.75	to 30	to 0.577	to 34	to 0.675	to 36	to 0.726
Well-graded sand	30	1 on 1.75	30	0.577	34	0.675	38	0.839
	to 34	1 on 1.50	to 34	to 0.675	to 40	to 0.839	to 46	to 1.030
Sand and gravel	32	1 on 1.60	32	0.625	36	0.726	40	0.900
	to 36	1 on 1.40	to 36	to 0.726	to 42	to 0.900	to 48	to 1.110

From B. K. Hough, *Basic Soils Engineering*. Copyright © 1957, The Ronald Press Company, New York.

Note: Within each range, assign lower values if particles are well rounded or if there is significant soft shale or mica content, higher values for hard, angular particles. Use lower values for high normal pressures than for moderate normal pressure.

COMPORTAMIENTO CUALITATIVO DE LAS ARENAS SOMETIDAS A CORTE

TABLE 1-1
Observed values of drained peak and residual (critical state) strengths for typical cohesionless materials

Material	State	Type of test	e'_i psi	ϕ'_f	ϕ'_p	I_g %	Reference
drained sand	Dense	Plane strain	40	45.2°	32.3°	37	Cornforth (1961)
drained sand	Dense	Axial comp.	40	41.4°	32.3°	28	Cornforth (1961)
Ham River sand	Very dense	Axial comp.	15	44.0°	32.8°	33	Al-Ruwayeh (unpub.)
Ham River sand	Very dense	Plane strain	15†	49.0°†	32.8°	44	Green (1969)
Ham River sand	Dense	Axial comp.	100	38.3°	32.8°	18	Skinner (unpub.)
Ham River sand	Dense	Axial comp.	990	30.8°	32.8°	-8*	Skinner (unpub.)
Rock fill (Silurian mudstone)	Dense	Axial comp.	10	50.4°	40.1°	30	Tombs (1969)
Rock fill (Silurian mudstone)	Dense	Axial comp.	40	44.5°	40.1°	14	Tombs (1969)
Rock fill (Silurian mudstone)	Dense	Axial comp.	135	39.9°	40.1°	c.O	Tombs (1969)
Rock fill (Granitic Gneiss)	Dense	Axial comp.	10	56.0°	42.4°	38	Tombs (1969)
Rock fill (Granitic Gneiss)	Dense	Axial comp.	41	49.4°	42.4°	22	Tombs (1969)
Rock fill (Granitic Gneiss)	Dense	Axial comp.	150	43.7°	42.4°	4	Tombs (1969)

* Anomalous values of I_g may result from continuing particle breakdown.
† By extrapolation.

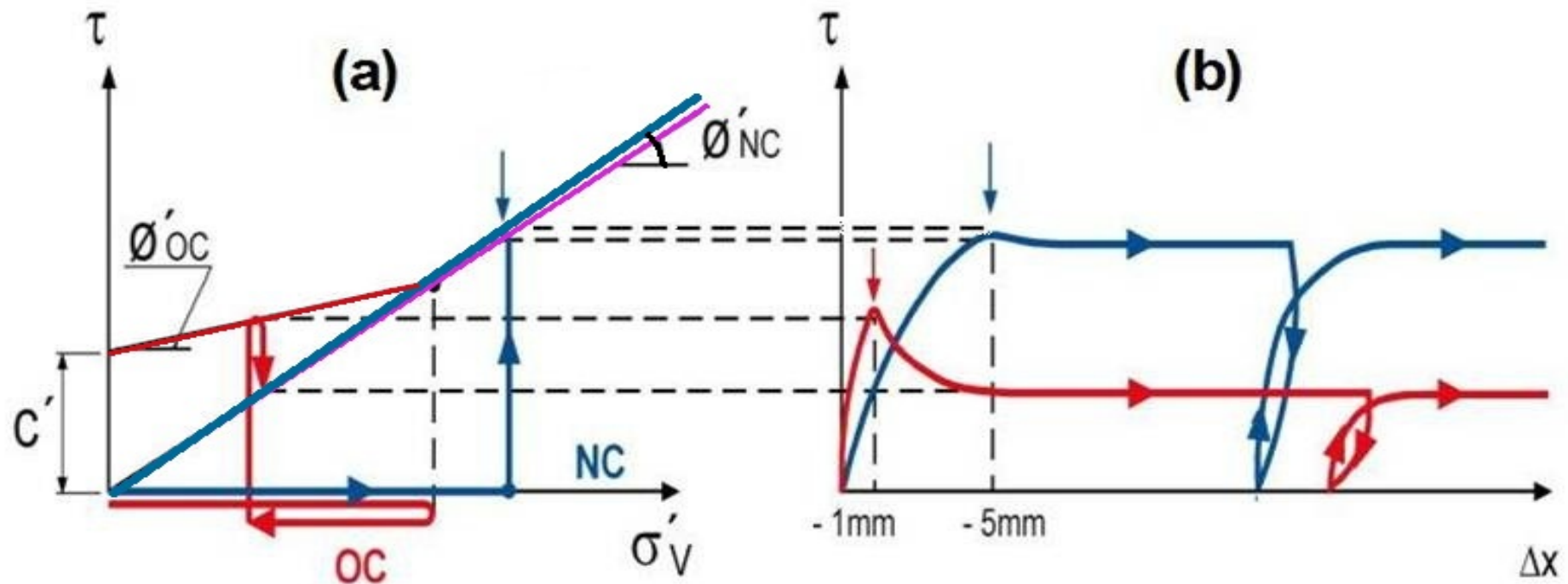
(Roscoe Memorial Conference 19)

COMPORTAMIENTO CUALITATIVO DE LAS ARCILLAS SOMETIDAS A CORTE

De nuevo con el fin de simplificar tanto la exposición como los conceptos iniciales a desarrollar, para la descripción cualitativa del comportamiento de suelos arcillosos se supondrá que se ejecuta una serie de ensayos de corte directo sobre una arcilla reconstituida, es decir, consolidada en laboratorio a partir de una suspensión. Esta hipótesis de trabajo permite idealizar el proceso de formación de un depósito arcilloso sin efectos complementarios de ganancia de resistencia debidos al envejecimiento, cementación, etc. Además se supondrá que dichos ensayos se realizan en condiciones drenadas, es decir, dejando disipar completamente cualquier exceso o defecto de presión intersticial originado por los incrementos de tensiones, tanto normales como tangenciales del ensayo

Arcilla de baja plasticidad (o bajo contenido en minerales de arcilla).

En el eje de abscisas de la figura (a) se representan dos historias de tensiones de una arcilla reconstituida en condiciones de carga edométrica o unidimensional. La línea azul corresponde a una arcilla normalmente consolidada (NC), y la línea roja a una sobreconsolidada (SC). Adicionalmente, aunque no se representa en la figura, se supondrá que se dispone de un comparador vertical que permite determinar los cambios de volumen durante el corte. De los resultados obtenidos se pueden deducir las siguientes pautas de comportamiento:



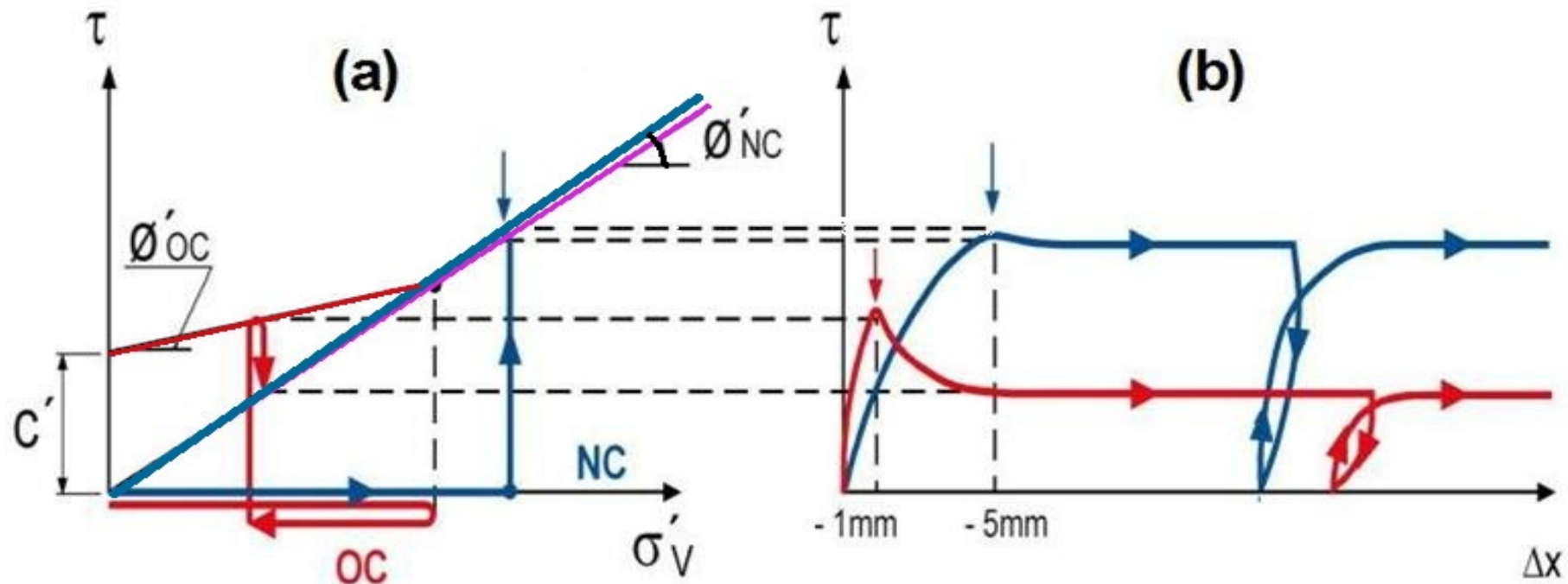
COMPORTAMIENTO CUALITATIVO DE LAS ARCILLAS SOMETIDAS A CORTE

BAJO IP o bajo contenido en arcilla. Muestra normalmente consolidada (NC)

La tensión tangencial movilizada aumenta progresivamente con el desplazamiento horizontal (Δx) hasta alcanzar un valor máximo ($\tau_{m\acute{a}x}$) de "pico". Dicho "pico" es apenas perceptible y se pierde de forma casi inmediata. A partir de ese instante, aunque las deformaciones tangenciales prosigan (Δx), la resistencia movilizada se mantiene constante. Si se realizara un ciclo de descarga-recarga se alcanzarían aproximadamente los mismos niveles de tensión tangencial previos.

Durante la aplicación de los esfuerzos de corte el suelo tiende a reducir su volumen (es contractante), si bien, como en el caso de la tensión tangencial, también se llega a una cierta magnitud del desplazamiento horizontal a partir del cuál no se observan cambios apreciables de volumen. En la terminología empleada en el apartado anterior, se habría alcanzado el "estado crítico".

Si se ejecutaran más ensayos con la misma arcilla, consolidada normalmente hasta otras tensiones efectivas normales (σ'_v) diferentes, la envolvente de rotura en el plano (σ'_v, τ) sería una recta definida por una ordenada en el origen nula (cohesión efectiva $c'=0$), y una inclinación con la horizontal ϕ'_{NC} .



COMPORTAMIENTO CUALITATIVO DE LAS ARCILLAS SOMETIDAS A CORTE

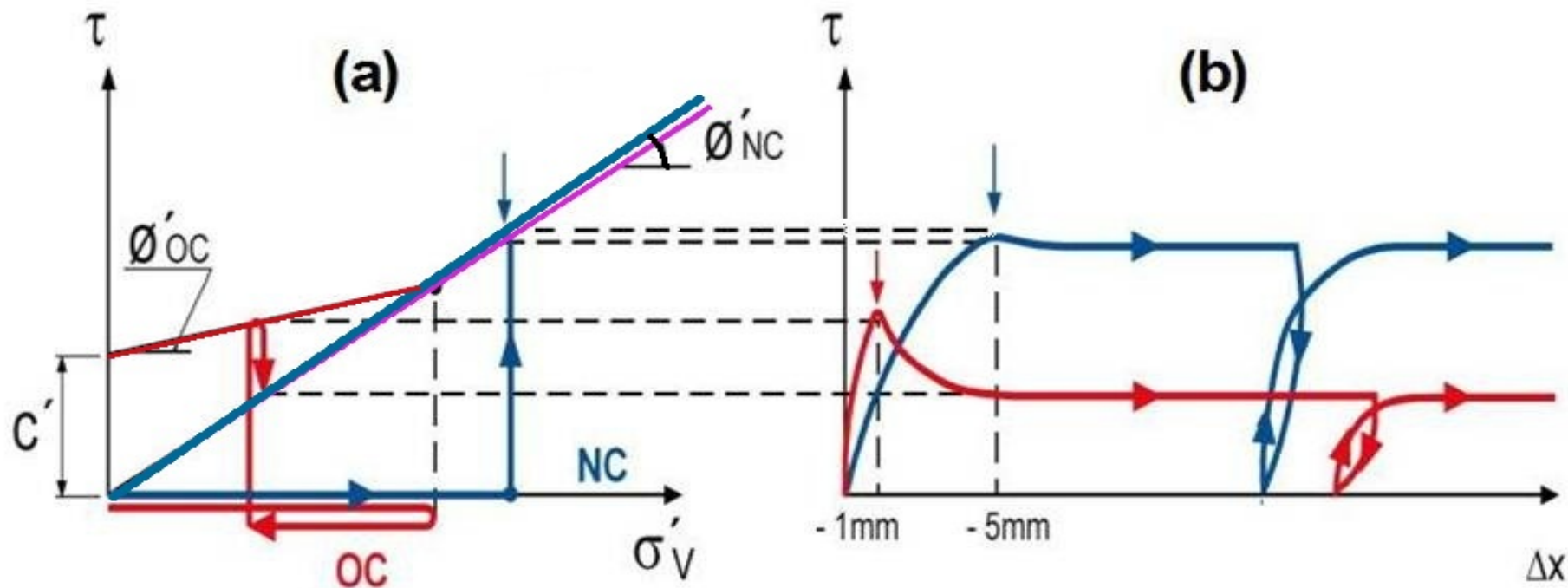
Bajo IP o bajo contenido en arcilla. Muestra sobreconsolidada (SC)

La pendiente inicial de la curva ($\tau, \Delta x$) es pronunciada que en la muestra NC, es decir, la muestra SC es más rígida. La tensión tangencial máxima alcanzada es netamente superior a la del suelo NC ensayado bajo las mismas tensiones normales iniciales. De hecho, la trayectoria de tensiones en el plano (σ'_v, τ) sobrepasa claramente la envolvente de rotura de los estados NC definida por ($c'=0, \phi'_{NC}$), y alcanza una resistencia “de pico” por encima de ésta. La envolvente de rotura de “pico” para los estados sobreconsolidados muestra una cohesión efectiva no nula, y una menor inclinación con la horizontal ($\phi'_{SC} < \phi'_{NC}$). Intuitivamente pues, la sobreconsolidación “empuja hacia arriba” a la envolvente de estados NC, dotándola de cohesión efectiva pero reduciendo ligeramente el ángulo de rozamiento interno.

Una vez alcanzado el valor “de pico”, al proseguir las deformaciones disminuyen la tensiones tangenciales, tendiendo hacia las que proporcionaría el suelo normalmente consolidado bajo el mismo nivel tensional.

Las muestras con pequeño grado de sobreconsolidación (OCR) pueden contraer algo, pero a medida que aumenta la sobreconsolidación resultan dilatantes.

Con suficiente deformación, se tiende a un estado en el que pueden proseguir las deformaciones sin cambios en la tensión tangencial o en el volumen del suelo (“estado crítico”).



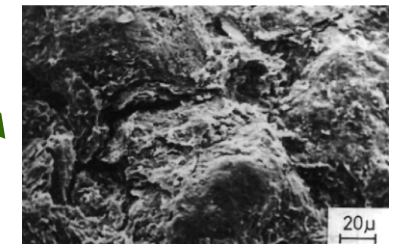
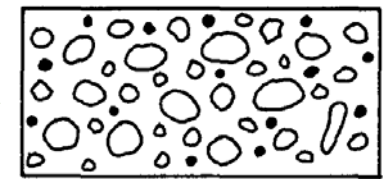
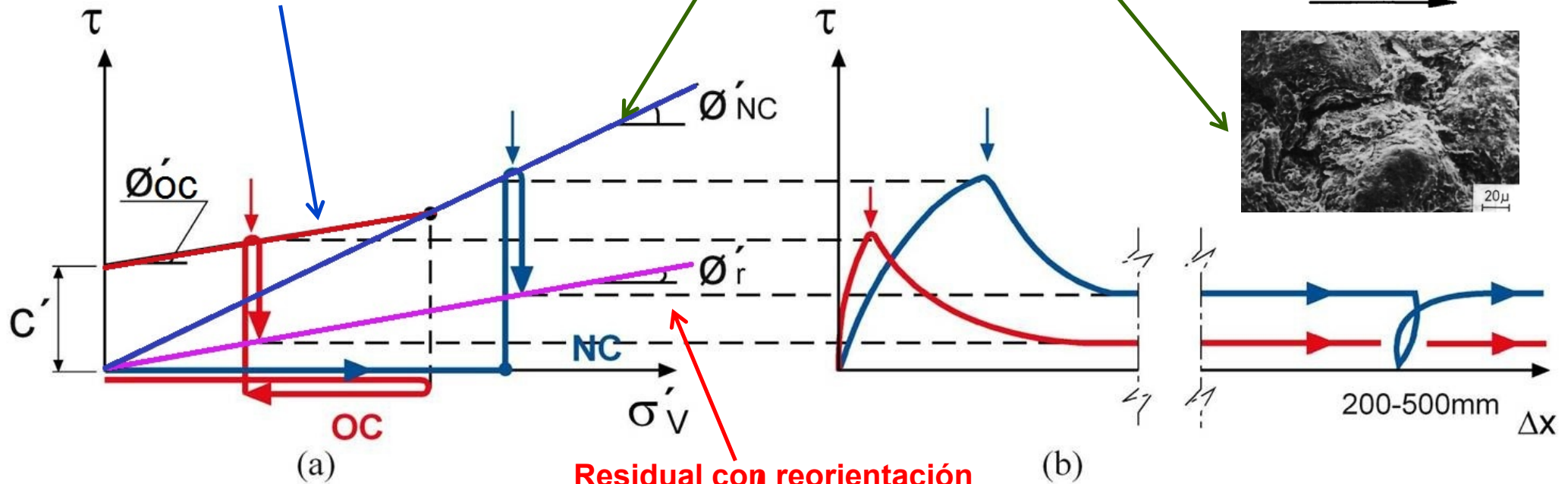
COMPORTAMIENTO CUALITATIVO DE LAS ARCILLAS SOMETIDAS A CORTE

Arcilla de alta plasticidad (o alto contenido en minerales de arcilla).

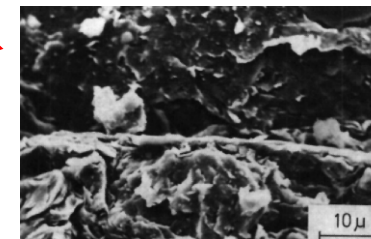
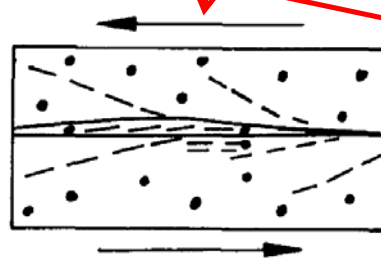
En el caso de los suelos de alto contenido en arcilla, la resistencia movilizada puede disminuir de forma muy marcada a medida que se acumulan las deformaciones, tanto para arcillas normalmente consolidadas como sobreconsolidadas, llegando a desarrollar una envolvente de resistencia netamente por debajo de la proporcionada por $(c'=0, \phi'_{NC})$. Esta resistencia se denomina residual, y viene definida por los parámetros de resistencia residual $(c'_r \approx 0, \phi'_r < \phi'_{NC})$.

**“Pico “ Normalmente consolidada.
También residual sin reorientación**

“Pico” sobreconsolidada

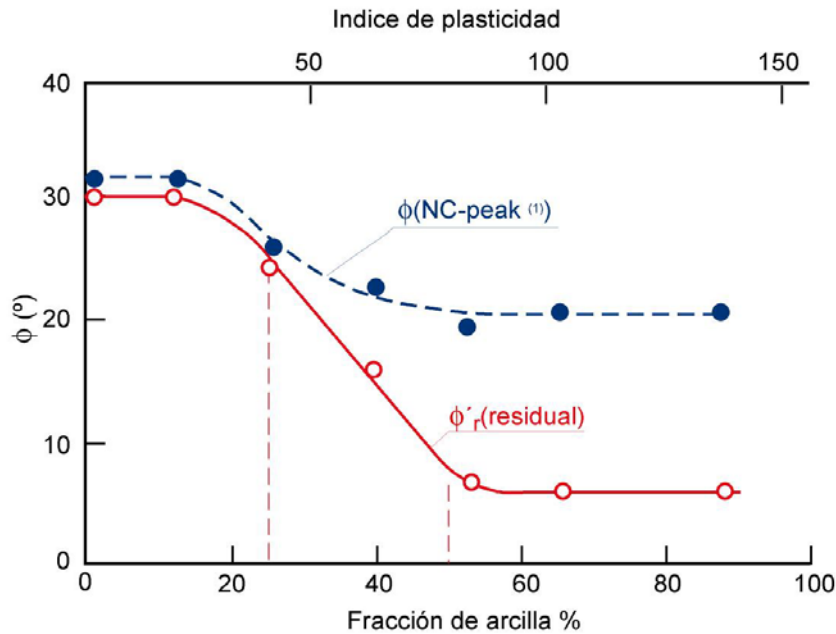


Residual con reorientación

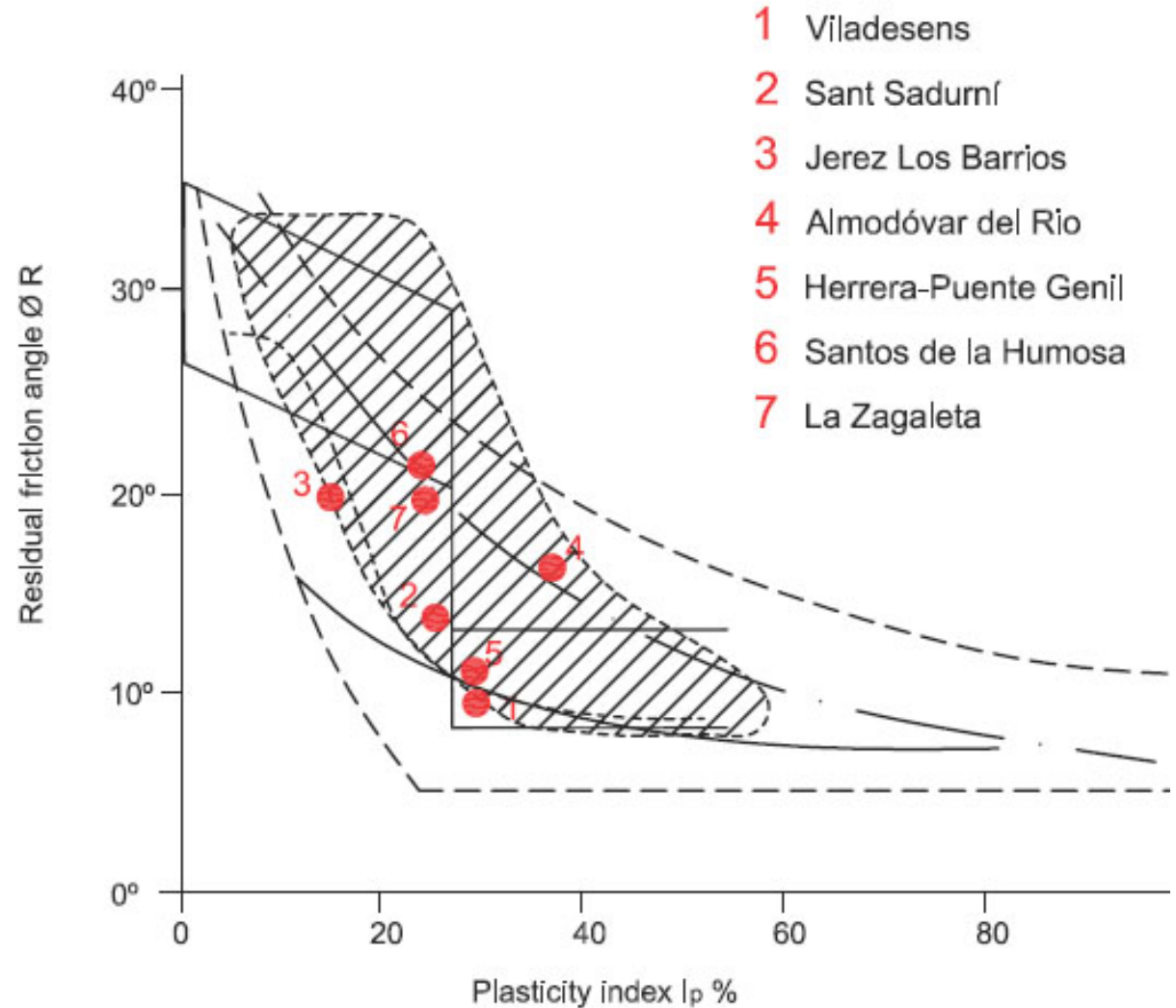


Figuras tomadas de Lupini, Skinner & Vaughan, 1981

COMPORTAMIENTO CUALITATIVO DE LAS ARCILLAS SOMETIDAS A CORTE



⁽¹⁾ Resistencia de pico de la arcilla normalmente consolidada (\approx resistencia en estado "crítico")



Figuras tomadas de Lupini, Skinner & Vaughan, 1987

NOTA: A veces los valores mostrados proceden de cálculos retrospectivos y no se dispone de ensayos de resistencia residual. En estos casos ϕ'_R podría resultar inferior al valor mostrado (si la rotura ocurrió antes de la degradación completa de resistencia)

TENSIONES DE CORTE. CAMBIOS DE VOLUMEN Y DE PRESIÓN INTERSTICIAL ASOCIADOS

Se ha visto que las tensiones tangenciales o de corte inducen cambios de volumen en el suelo. Las arenas flojas y las arcillas normalmente consolidadas (y las ligeramente sobreconsolidadas) tienden a reducir su volumen (son contractantes). Si están saturadas, para poder contraer expulsando agua deberán sufrir inicialmente un incremento de u .

Las arenas densas y las arcillas sobreconsolidadas tienden a aumentar de volumen (son dilatantes). Si están saturadas, para poder dilatar absorbiendo agua deberán sufrir inicialmente un decremento de u .

Cuando por alguna causa el suelo saturado se somete a tensiones de corte pero el agua no puede entrar o salir (condiciones sin drenaje) se podrán producir distorsiones y deformaciones de corte, y hasta alcanzar la rotura, pero sin cambio de volumen en el suelo.

En condiciones sin drenaje:

La tendencia a la contracción (reducción de volumen), se manifestará como una sobreelevación de la presión intersticial

La tendencia a la dilatación (aumento de volumen) se manifestará como una reducción de la presión intersticial