



Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA



CURSO DE GEOTECNIA I

(Código: 236161)

M. Sc. Carlos Medina
Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Sucre



Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA



Resistencia al corte

Todos los miembros estructurales de una edificación, son capaces de resistir compresión, tensión y corte.

Por el contrario, los suelos y las rocas, no son capaces de resistir altos esfuerzos de tensión (además no se requiere que lo haga).

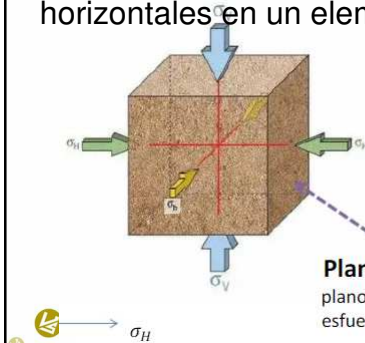




Resistencia al corte

Las cargas aplicadas sobre un suelo producen esfuerzos verticales (esfuerzos de compresión), que a su vez originan los esfuerzos horizontales

Existe una relación entre los esfuerzos Verticales y horizontales en un elemento de suelo



Planos Principales,
planos donde solo actúan
esfuerzos de compresión.

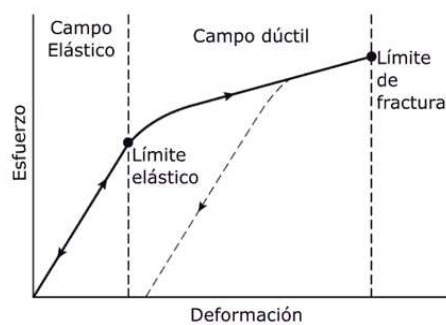
$$K_0 = \frac{\sigma'_H}{\sigma'_V}$$



Resistencia al corte

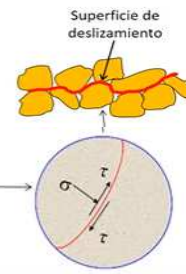
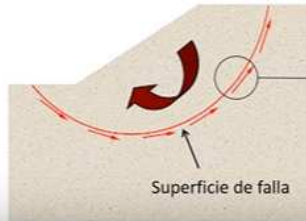
Los suelos son capaces de resistir compresión hasta cierto punto, a partir de ahí la falla usualmente ocurre en forma de cortes a lo largo de alguna superficie interna del suelo.

Curva de esfuerzo-deformación





Resistencia al corte



Los suelos son capaces de resistir compresión hasta cierto punto, a partir de ahí la falla usualmente ocurre en forma de cortes a lo largo de alguna superficie interna del suelo.



Resistencia al corte

El conocimiento de la resistencia al corte es requisito indispensable para cualquier análisis relacionado con la estabilidad de una masa de suelo, tales como el diseño de cimentaciones, cálculos de presiones laterales de tierra y análisis de estabilidad de taludes.





Resistencia al corte

La resistencia estructural de un suelo es principalmente una función de su *resistencia al corte*, donde la resistencia al corte se refiere a la capacidad del suelo para resistir deslizamientos: a lo largo de las superficies internas.

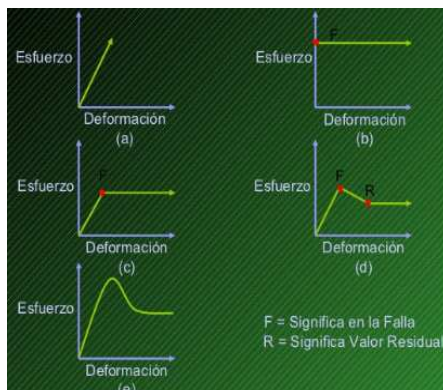


Falla de una base apoyada sobre un manto de arena



Resistencia al corte

Criterios de falla y relación esfuerzo – deformación



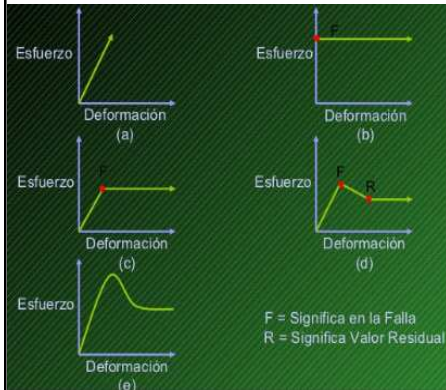
En la gráfica (a) vemos el comportamiento de un material elástico. Esto significa que el material puede regresar a su forma original cuando cesa el esfuerzo.

En este caso la relación esfuerzo-deformación es independiente del tiempo.





Criterios de falla y relación esfuerzo – deformación

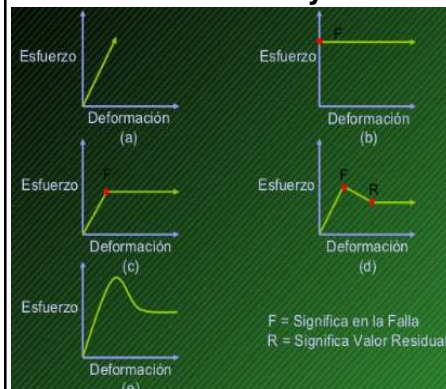


Los materiales perfectamente plásticos (gráfica b), algunas veces llamados rígido-plásticos, pueden ser tratados matemáticamente con relativa facilidad.

Otra relación real de esfuerzo-deformación es la elasto-plástica (gráfica c), en la que el material es linealmente elástico hasta cierto punto (σ_y) luego se comporta perfectamente plástico.



Criterios de falla y relación esfuerzo – deformación



Algunos materiales (como el mostrado en la figura d) que exhiben después de la falla una gran deformación a un valor de un esfuerzo menor

El comportamiento mostrado en la figura e, corresponde a la relación esfuerzo-deformación típica con un material real





Criterio de falla de Mohr

Al comienzo del siglo pasado (1900), Mohr lanzó su hipótesis del criterio de falla para materiales reales, en la cual estableció que los materiales fallan cuando *“la resistencia al corte en el plano de falla, en la falla, alcanza alguna única función del esfuerzo normal en ese plano”*

$$\tau_{ff} = f(\sigma_{ff})$$

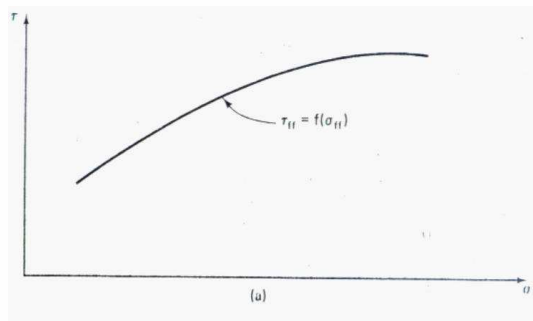
Donde, τ es el esfuerzo cortante y σ es el esfuerzo normal. El primer subíndice f se refiere al plano en el cual actúa el esfuerzo (en este caso el *plano de falla*) y la segunda f significa *“en la falla”*



Criterio de falla de Mohr

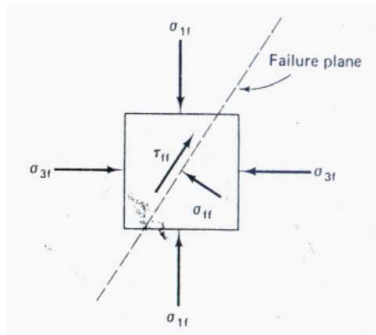
En otras palabras, esta teoría sostiene que un material falla debido a una combinación crítica de esfuerzo normal y esfuerzo cortante, y no de cualquier esfuerzo máximo normal o cortante solo.

$$\tau_{ff} = f(\sigma_{ff})$$





Criterio de falla de Mohr

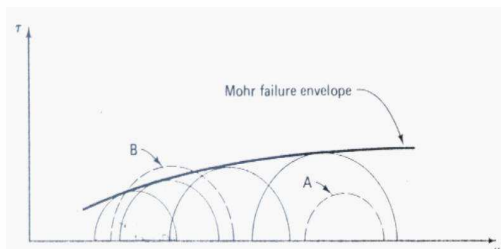


Esta gráfica muestra un elemento en la falla con los esfuerzos principales que causan la falla y los esfuerzos normal y cortante resultantes en el plano de falla.



Criterio de falla de Mohr

Si conocemos los esfuerzos principales en la falla, podemos construir o dibujar un círculo de Mohr para representar este estado de esfuerzos para este elemento en particular.

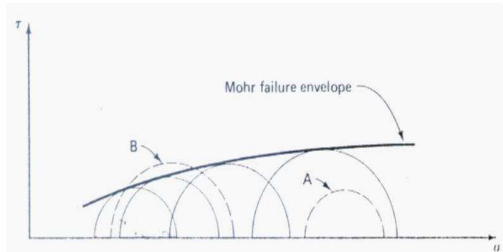


Note que cualquier círculo de Mohr por debajo de la envolvente de falla de Mohr (tal como el círculo A) representa una condición estable.



Criterio de falla de Mohr

Si conocemos los esfuerzos principales en la falla, podemos construir o dibujar un círculo de Mohr para representar este estado de esfuerzos para este elemento en particular.

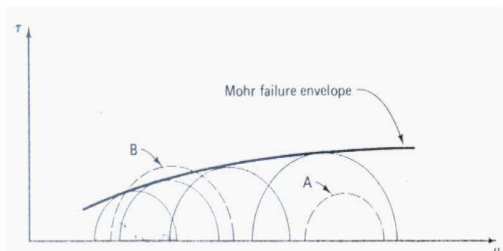


La falla ocurre sólo cuando la combinación de los esfuerzos cortantes y normal es tal que el círculo de Mohr es tangente a la envolvente de falla de Mohr.



Criterio de falla de Mohr

Si conocemos los esfuerzos principales en la falla, podemos construir o dibujar un círculo de Mohr para representar este estado de esfuerzos para este elemento en particular.



Note que los círculos ubicados por encima de la envolvente de falla de Mohr no pueden existir.





Criterio de falla de Coulomb

Coulomb en sus trabajos de presiones laterales de tierra, se interesó en las características de deslizamiento friccional de ciertas partículas. Él observó que estas había una componente de la resistencia al corte independiente de los esfuerzos y una componente dependiente de los esfuerzos.

La componente dependiente de los esfuerzos es similar a la fricción por deslizamiento en los sólidos, a la cual llamó *el ángulo de fricción interna*, denotado por el símbolo ϕ .

La otra componente parece estar referida a la cohesión intrínseca de los materiales y es comúnmente denotada por el símbolo c .

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



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

Criterio de falla de Coulomb

Donde:

τ = resistencia al corte de los suelos

σ = ángulo normal total en el plano de falla

ϕ = *ángulo de fricción interna* del suelo

c = es la *cohesión* del suelo

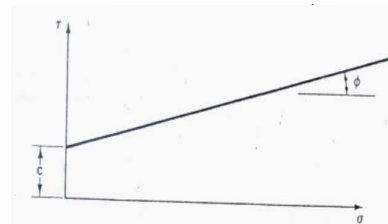


Fig. 10.8 The Coulomb strength equation presented graphically.

Esta relación nos da una línea recta y es por lo tanto fácil de trabajar con ella.

Los valores de c y ϕ son propiedades inherentes de los materiales, por el contrario ellas dependen de las condiciones operativas en las pruebas.



Criterio de falla de Mohr-Coulomb

Es la reunión de los dos criterios anteriormente descritos.

Es de lejos el más popular criterio de resistencia aplicado a los suelos.

El criterio de Mohr-Coulomb puede ser escrito como:

$$\tau_f = \sigma_f \tan \phi + c$$

Es el único criterio de falla que predice los esfuerzos sobre el plano de falla en la falla.

Este criterio es muy útil para el análisis de la estabilidad de taludes de tierra y cimentaciones

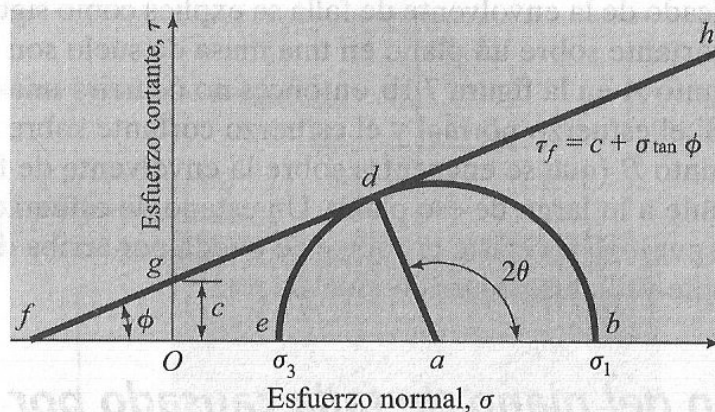


FIGURA 7.3 Círculo de Mohr y envolvente de falla.



CARACTERÍSTICAS DEL PLANO DE FALLA

Si conocemos el ángulo de inclinación de la envolvente de falla de Mohr o ha sido determinada a través de ensayos de laboratorio, entonces es posible escribir el ángulo del plano de falla θ en términos de la inclinación ϕ de la envolvente de falla de Mohr.

Para hacer esto, debemos recordar la hipótesis de falla de Mohr.

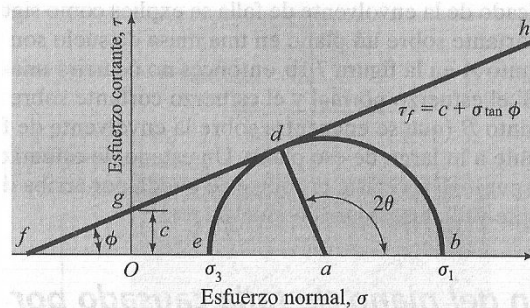


FIGURA 7.3 Círculo de Mohr y envolvente de falla.



Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA



CARACTERÍSTICAS DEL PLANO DE FALLA

La línea ab representa el plano principal mayor y la línea ad representa el plano de falla.

El ángulo de falla es aquel comprendido entre el plano principal mayor y el plano de falla (θ)

Entonces el ángulo de falla en la muestra medido con respecto al plano del esfuerzo principal mayor, está dado por:

$$2\theta = 90^\circ + \phi$$

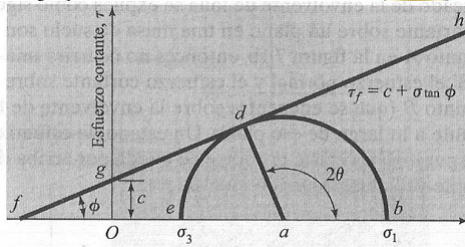
$$2\theta = 90^\circ + \phi$$

$$\theta = 45^\circ + \phi/2$$



CARACTERÍSTICAS PLANO DE FALLA

DEL



$$\sin \phi = \frac{da}{fa}$$

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

$$fa = fO + Oa$$

$$fO = c \cot \phi$$

$$Oa = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$

$$fa = fO + Oa = c \cot \phi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$

$$\sin \phi = \frac{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}}{c \cot \phi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}}$$

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \sin \phi \left[c \cot \phi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right]$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right) + 2c \left(\frac{\cos \phi}{1 - \sin \phi} \right)$$

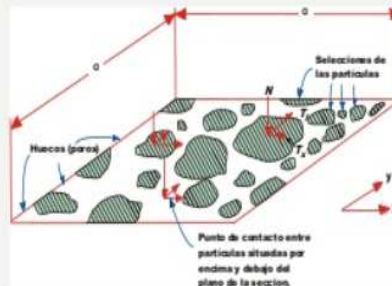
$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \tan \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$$

Criterio de falla de Mohr-Coulomb expresada en términos de los esfuerzos principales de falla



Medición de la Resistencia al corte

1. DEFINICIÓN DE RESISTENCIA CORTANTE DEL SUELO



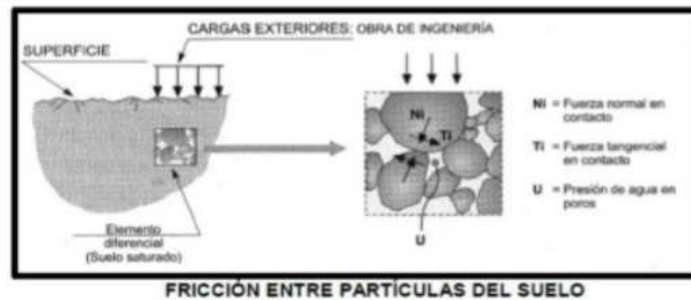
- La resistencia cortante del suelo es la resistencia interna por área unitaria que la masa de suelo ofrece para resistir la falla y el deslizamiento a lo largo de cualquier plano dentro de él.





2. IMPORTANCIA DEL ESFUERZO CORTANTE DEL SUELO

La seguridad de la estructura (edificio, túnel, terraplén, presa, entre otros) depende de la resistencia al esfuerzo cortante, ya que a mayor esfuerzo cortante, más segura es la estructura.



La resistencia al esfuerzo cortante de un suelo está constituido fundamentalmente por:

- La resistencia friccionante a la traslación entre las partículas individualmente en sus puntos de contacto.
- La resistencia cohesiva por la adhesión entre las superficies de las partículas de suelo.

La cohesión y el ángulo de fricción son los parámetros de la resistencia cortante de un suelo y son determinados en el laboratorio principalmente con dos tipos de ensayo: LA PRUEBA DE CORTE DIRECTO Y LA PRUEBA TRIAXIAL.

Cohesión: Es la adherencia entre partículas del suelo debida a la atracción entre ellas en virtud a las fuerzas intermoleculares

Ángulo de fricción: Es la resistencia al deslizamiento causado por la fricción que hay entre las superficies de contacto de las partículas.



Tabla 7.1 Valores típicos del ángulo de fricción drenado para arenas y limos.

Tipo de suelo	ϕ (grados)
<i>Arenas: granos redondeados</i>	
Secco	27-30
Medio	30-35
Denso	35-38
<i>Arenas: granos angulares</i>	
Secco	30-35
Medio	35-40
Denso	40-45
Grasa con algo de arena	34-48
Limos	26-35



Medición de la Resistencia al corte

Hay varios métodos para calcular la resistencia al corte de los suelos. Algunos son métodos de laboratorio y otros son de campo.

- Métodos de laboratorio

- Prueba de compresión inconfiada (suelos cohesivos)
- Prueba de corte directo (Cohesivos y no cohesivos)
- Prueba de compresión triaxial (Cohesivos y no cohesivos)

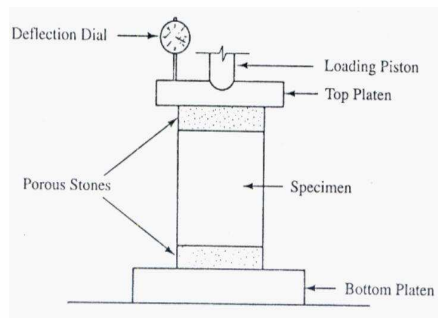
- Métodos de campo

- La veleta (arcillas blandas)
- Penetración estándar (suelos sin cohesión)



Medición de la Resistencia al corte

- Prueba de compresión inconfiada (suelos cohesivos)



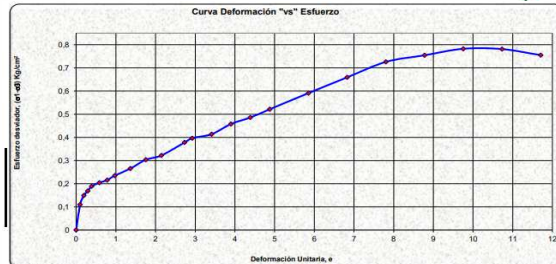
Es la prueba más simple, fácil y menos costosa para la investigación de la resistencia al corte





Medición de la Resistencia al corte

- Prueba de compresión inconfiada (suelos cohesivos)



$$q_u = 0,782 \text{ kg/cm}^2$$

$$c = 0,3911 \text{ kg/cm}^2$$

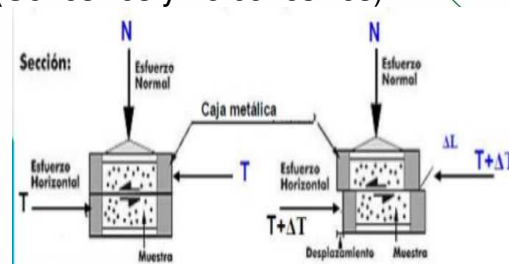
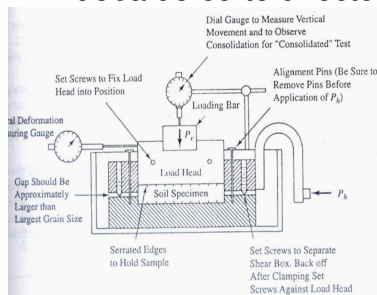
El ensayo nos da la *resistencia a la compresión inconfiada* q_u , y la cohesión será la mitad de este valor.

$$c = \frac{q_u}{2}$$



Medición de la Resistencia al corte

- Prueba de corte directo (Cohesivos y no cohesivos)



El ensayo induce la falla a través de un plano determinado. Sobre este plano de falla actúan dos esfuerzos:

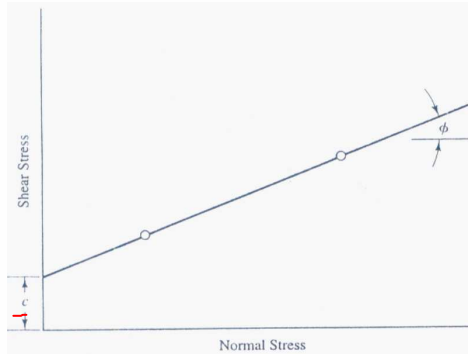
- un esfuerzo normal (σ_n), aplicado externamente debido a la carga vertical (P_v).
- un esfuerzo cortante (τ), debido a la aplicación de la carga horizontal (P_h).





Medición de la Resistencia al corte

- Prueba de corte directo (Cohesivos y no cohesivos)



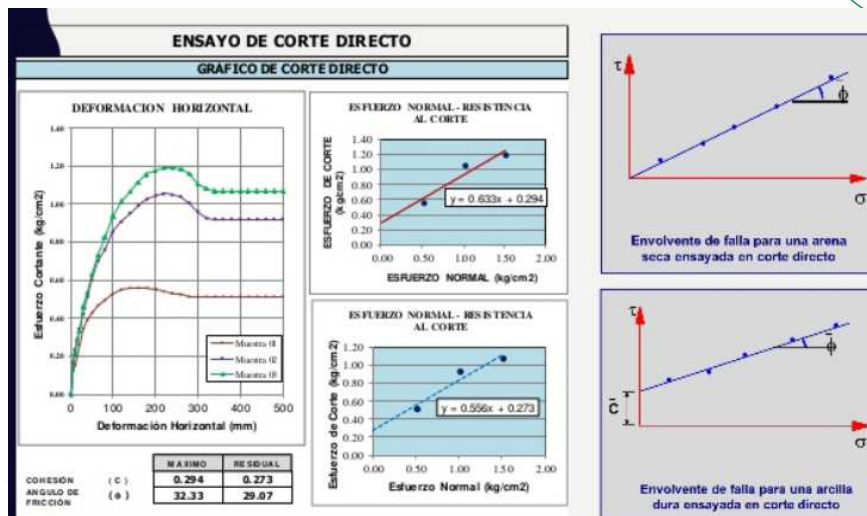
Los datos de varios ensayos se grafican con los esfuerzos normales en las abscisas y los esfuerzos cortantes en la ordenada.

Deben tener la misma escala. El corte con las ordenadas será la cohesión y el ángulo formado por la envolvente de falla con la horizontal será el ángulo de fricción interna



Medición de la Resistencia al corte

- Prueba de corte directo (Cohesivos y no cohesivos)



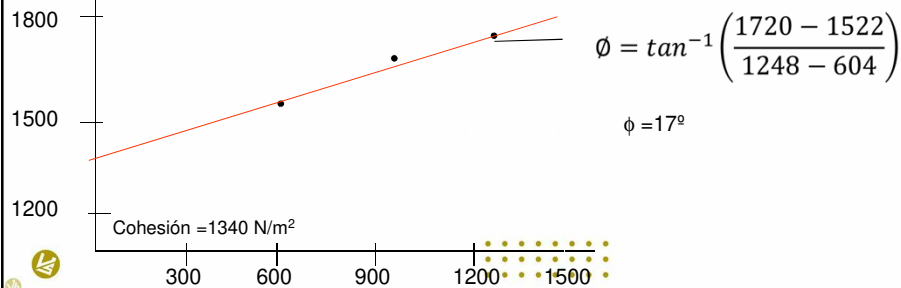


Ejemplo 1:

Una serie de ensayos de corte directo fue llevado a cabo en una muestra de suelo hasta llevarlas a la falla. Los datos son los siguientes:

Número de la muestra	Esfuerzo normal (N/m ²)	Esfuerzo cortante (N/m ²)
1	604	1522
2	926	1605
3	1248	1720

Calcular el ángulo de fricción interna y cohesión para dicho suelo.

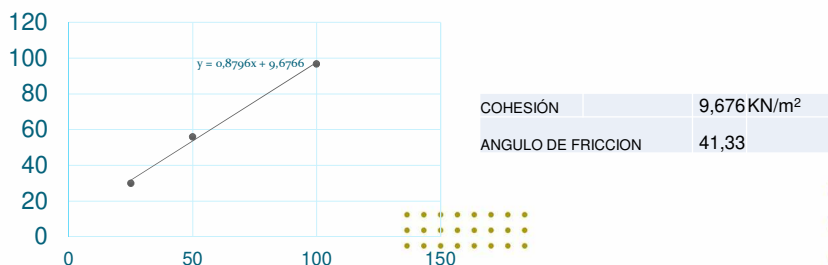


Ejemplo 2:

Se sometieron tres muestras de suelo de 5cm de diámetro y 2 cm de altura a un ensayo de corte directo hasta llevarlas a la falla. Los datos son los siguientes:

Número de la muestra	Fuerza normal (N)	Fuerza cortante (N)	Esf. Normal (σ) kN/m ²	Esf. Cortante (τ) kN/m ²
1	49,05	59	24,980	30,048
2	98,1	110	49,962	56,022
3	196,2	190	99,924	96,766

Calcular el ángulo de fricción interna y cohesión para dicho suelo.





Ejemplo 3:

Una muestra de arena fue sometida a un ensayo de corte directo con un esfuerzo normal $\sigma = 30 \text{ KN/m}^2$. Si el esfuerzo cortante para alcanzar la falla fue de $\tau = 20 \text{ KN/m}^2$.

Calcule:

- Ángulo de fricción interna de la arena $\phi = ?$
- Esfuerzos principales de falla σ_1 y σ_3



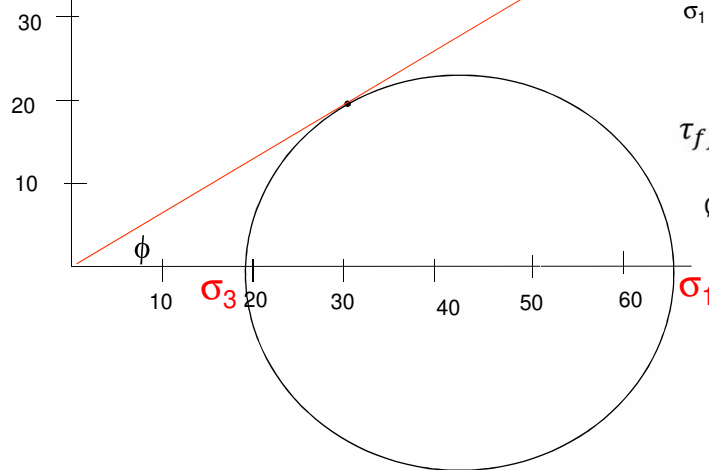
arena
 $\sigma = 30 \text{ KN/m}^2$
 $\tau = 20 \text{ KN/m}^2$
 $\phi = ?$
 σ_1 y σ_3

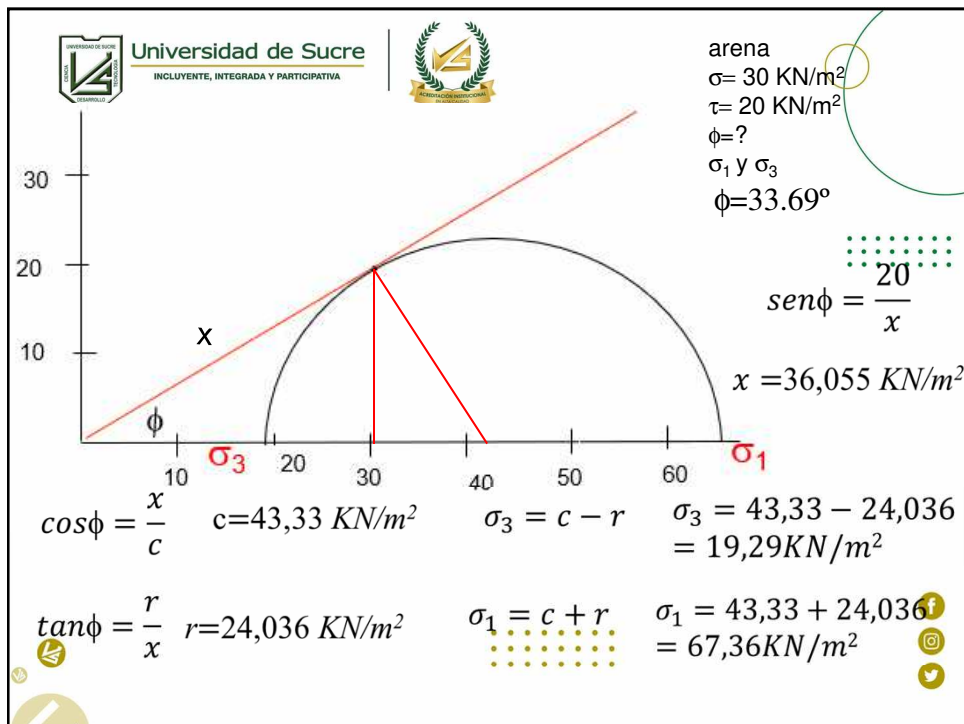
$$\tau_{ff} = \sigma_{ff} \tan \phi + c$$


$$\tau_{ff} = \sigma_{ff} \tan \phi$$


$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{20}{30} \right)$$

$$\phi = 33.69^\circ$$






Universidad de Sucre
 INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA




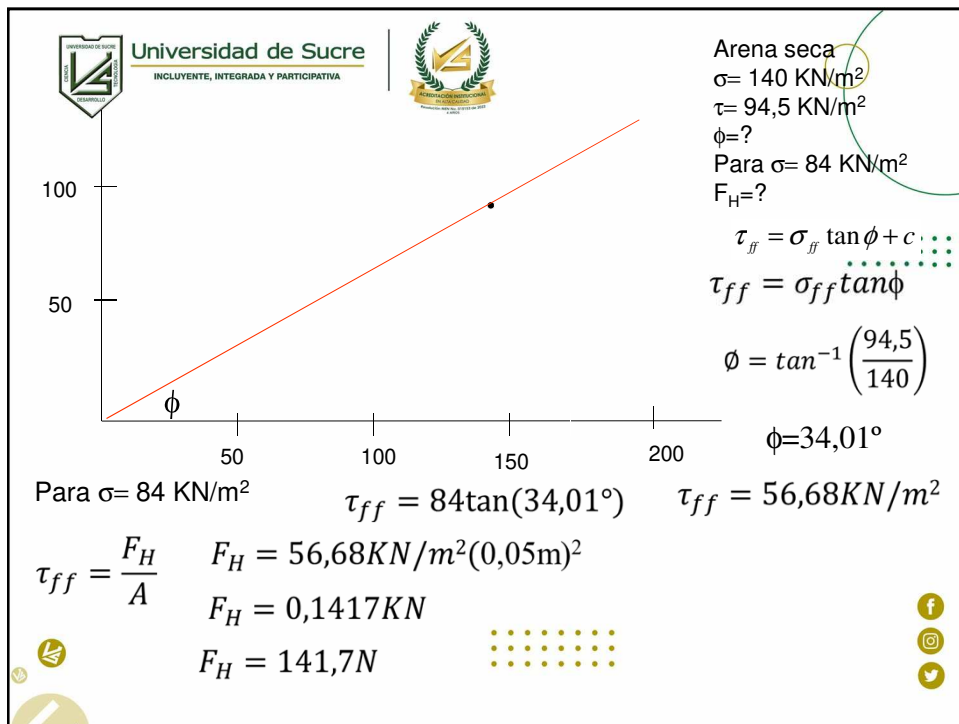
Ejemplo 4:


Se llevó a cabo un ensayo de corte directo en una muestra de arena seca con esfuerzo normal $\sigma = 140 \text{ KN/m}^2$. la falla ocurrió bajo un esfuerzo cortante de $\tau = 94.5 \text{ KN/m}^2$. El tamaño de la muestra fue de 50mm x 50mm x 20mm (altura)


Calcule:

- Angulo de fricción interna de la arena
- Para un esfuerzo normal de 84 KN/m^2 ¿Qué fuerza cortante se requiere para ocasionar la falla?





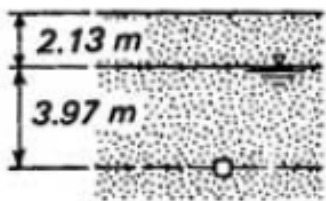

Universidad de Sucre
 INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA



Ejemplo 5:

Calcular la resistencia al esfuerzo cortante contra el deslizamiento a lo largo de un plano horizontal, a una profundidad de 6.10 mts en el depósito de arena mostrado

Suponga que la arena puede drenar libremente y que ϕ para la arena húmeda es de 32°



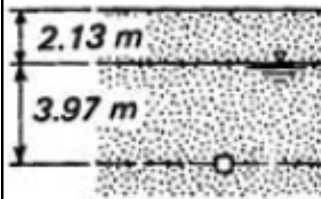
2.13 m
 3.97 m

Arena húmeda, 1890 kg/m^3
 Arena saturada, 2050 kg/m^3



Ejemplo 5:

Suponga que la arena puede drenar libremente y que ϕ_d para la arena húmeda es de 32°



Arena húmeda, 1890 kg/m^3 $\gamma = 18,54 \text{ KN/m}^3$

Arena saturada, 2050 kg/m^3 $\gamma_{\text{sat}} = 20,11 \text{ KN/m}^3$

Calculamos el esfuerzo vertical efectivo a la profundidad de 6,1mts

$$\sigma'_o = 18,54(2,13) + 20,11(3,97) - 9,81(3,97) \quad \sigma'_o = 80,381 \text{ kN/m}^2$$

Calculamos el esfuerzo cortante a la profundidad de 6,1mts

$$\tau_{ff} = 80,381 \tan(32^\circ) \quad \tau_{ff} = \sigma_{ff} \tan \phi + c$$

$$\tau_{ff} = 50,227 \text{ kN/m}^2$$



Ejemplo 6:

Se cree que la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo bajo ciertas condiciones de carga en el campo estará gobernada por la ec. de Mohr Coulomb, con $c = 19.5 \text{ KN/m}^2$ y $\phi = 22^\circ$.

Que esfuerzo lateral mínimo sería necesario para evitar la falla del suelo en un punto dado, si el esfuerzo vertical fuera de 440 KN/m^2 ?

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \tan \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$$

$$440 = \sigma_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{22}{2} \right) + 2(19,5) \tan \left(45^\circ + \frac{22}{2} \right)$$

$$\sigma_3 = 173,87 \text{ KN/m}^2$$





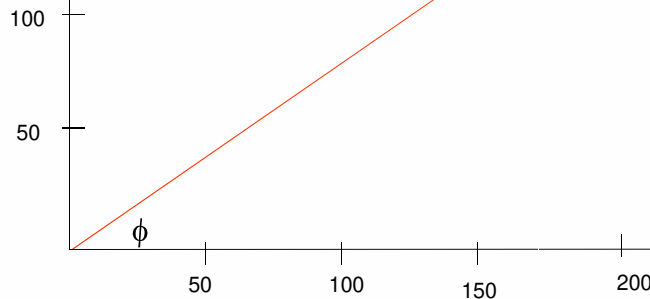
Ejemplo 7:

El tamaño de un espécimen de arena seca en una prueba de corte directo fue de 50 mm X 50 mm X 30 mm (altura). Se sabe que, para la arena, $\tan \phi = 0.65/e$ (donde e = relación de vacíos) y que la densidad los sólidos $G_s = 2.65$. Durante la prueba se aplicó un esfuerzo normal de 140 kN/m². La falla ocurrió bajo un esfuerzo cortante de 105 kN/m².

¿ángulo de fricción interna?

¿Cuál fue el peso del espécimen de arena?

¿Qué fuerza cortante se requiere para ocasionar la falla?



Arena seca
50mmx50mmx30mm
 $\tan \phi = 0.65/e$
 $G_s = 2.65$
 $\sigma_1 = 140 \text{ kN/m}^2$
 $\tau_f = 105 \text{ kN/m}^2$
 $\phi = ?$
Warena = ?
 $F_H = ?$

$$\tau_{ff} = \sigma_{ff} \tan \phi + c$$

$$\tau_{ff} = \sigma_{ff} \tan \phi$$

$$\tan \phi = \frac{105}{140} = 0.75$$

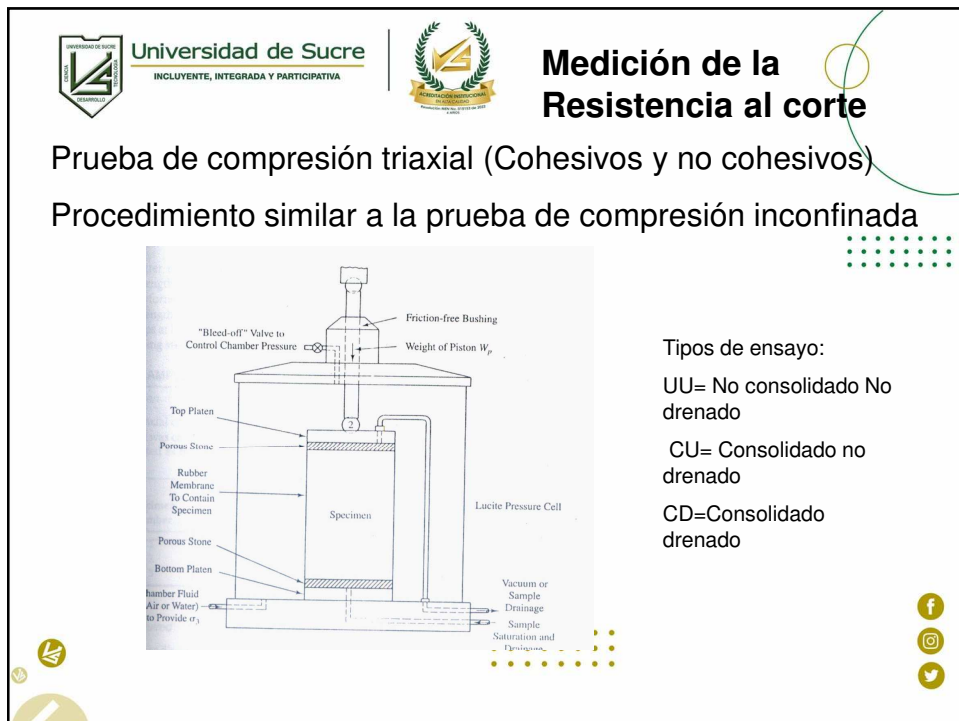
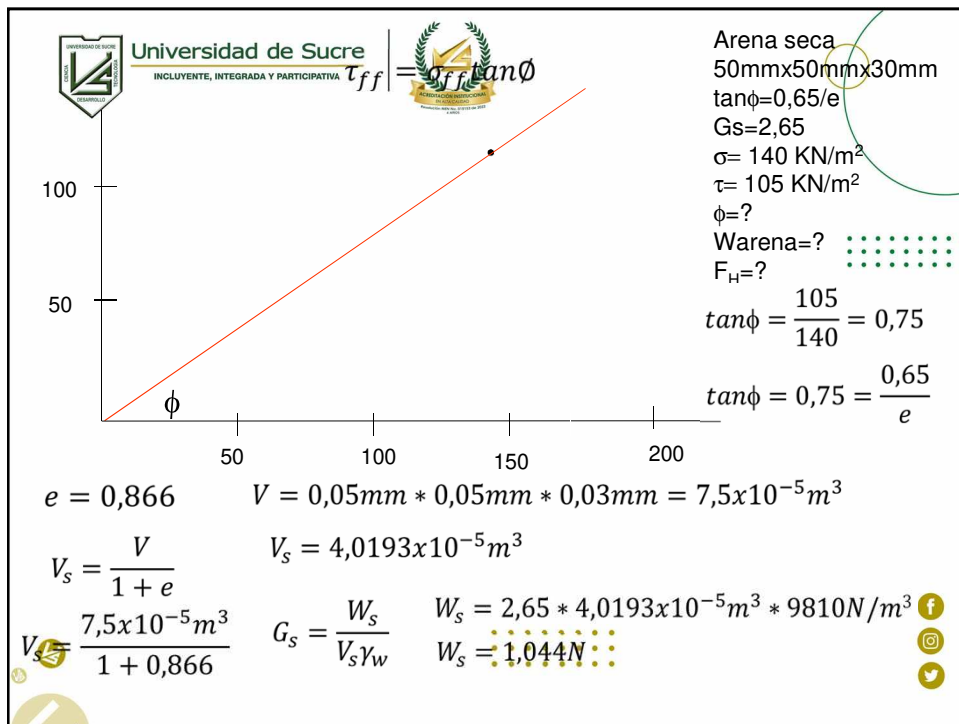
$$\phi = 36.86^\circ$$

$$\tau_{ff} = \frac{F_H}{A} \quad F_H = 105 \text{ kN/m}^2 (0.05\text{m})^2$$

$$F_H = 0.2625 \text{ kN}$$

$$F_H = 262.5 \text{ N}$$





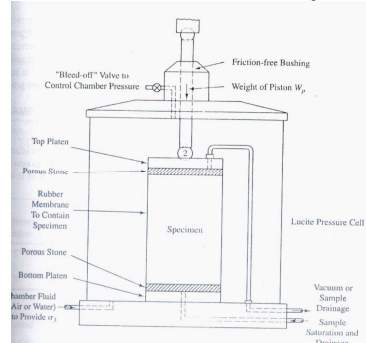


ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

El ensayo de compresión triaxial es llevado a cabo en una manera algo similar al ensayo de compresión inconfiada, en la que una muestra cilíndrica de suelo es sometida a una carga vertical (axial).

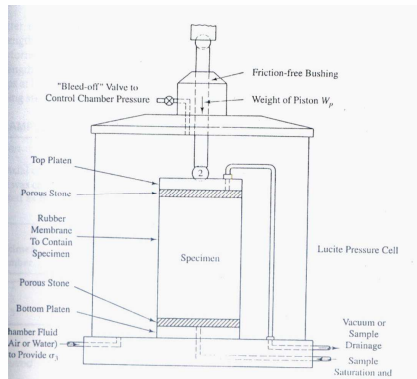
La mayor diferencia, es que, a diferencia del ensayo de compresión inconfiada, donde no hay presión de confinamiento lateral, el ensayo triaxial es llevado a cabo con la presencia de una presión de confinamiento lateral.

La presión lateral es hecha posible encerrando la muestra en una cámara e introduciendo agua o aire comprimido dentro de la cámara para envolver la muestra de suelo.



ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

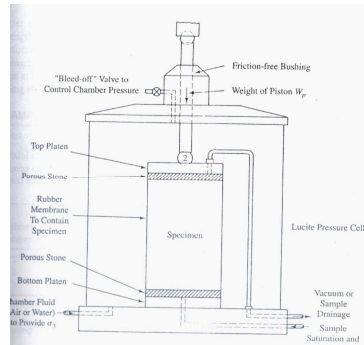
La prueba UU (No consolidada No drenada): se coloca la muestra en la cámara y se introduce una presión lateral (confinamiento) sin permitirle la consolidación a la muestra (drenaje) bajo la presión lateral.





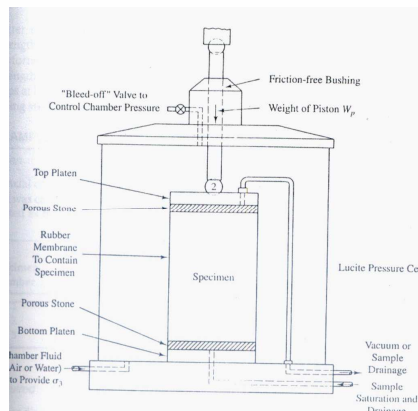
ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

La prueba CU (consolidada No drenada): se coloca la muestra en la cámara y se introduce una presión lateral. A la muestra se le permite la consolidación bajo la presión lateral dejando las líneas de drenaje abiertas. Las líneas de drenaje son luego cerradas y se incrementa el esfuerzo axial sin permitir drenajes adicionales.



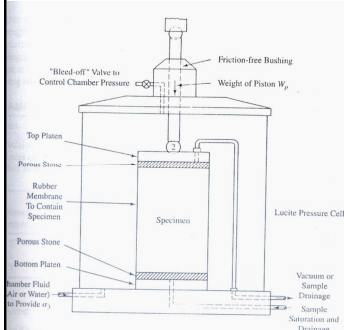
ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

La prueba CD (consolidada drenada) es similar a la CU pero a la muestra se le permite drenar cuando la carga axial es aplicada de modo que no se desarrollan altos excesos de presión de poros.





ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL



• Para llevar a cabo el ensayo, se debe cubrir una muestra de suelo, que tenga entre 2 y 2 ½ veces su diámetro, con una membrana de caucho y colocarla en la cámara triaxial.

• Luego, un esfuerzo lateral específico (y constante) es aplicado a la muestra por medio de agua o aire comprimido dentro de la cámara.

• Después es aplicada externamente a la muestra una carga vertical (axial) la cual es constantemente incrementada hasta llegar a la falla de la muestra.

• Se toma registro de la carga axial aplicada externamente que causa la falla de la muestra y la presión lateral.



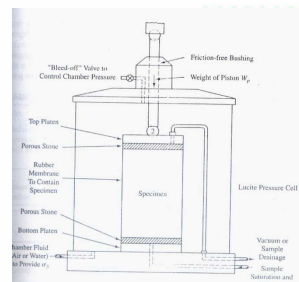
ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

• Como en el ensayo de corte directo, es necesario remover y desechar la muestra de suelo, para luego colocar en la cámara triaxial otro espécimen de la misma muestra.

• El procedimiento es repetido para el nuevo espécimen para una presión lateral diferente. Se registran para el segundo ensayo la carga axial en la falla y la presión lateral.

La presión lateral es designada como σ_3 , sin embargo, esta no es solo aplicada sobre los lados de la muestra, sino también a sus extremos. Esta presión es llamada *el esfuerzo principal menor*.

La carga axial aplicada externamente en la falla dividida por el área transversal de la muestra es designada $\Delta\sigma_{df}$ y es llamada *el esfuerzo desviador en la falla*.





ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

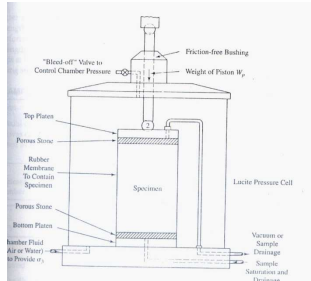
La presión total vertical (axial) que causa la falla es la suma del esfuerzo vertical menor (σ_3) y el esfuerzo desviador en la falla ($\Delta\sigma_{df}$).

Esta presión total vertical (axial) en la falla es designada como σ_1 y es llamada *esfuerzo principal mayor*. Entonces:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_{df}$$

Los resultados del ensayo de compresión triaxial pueden ser dibujados de la siguiente manera:

- Usando los resultados de un ensayo triaxial, localice un punto a lo largo de las abscisas a una distancia σ_3 a partir del origen, punto A.



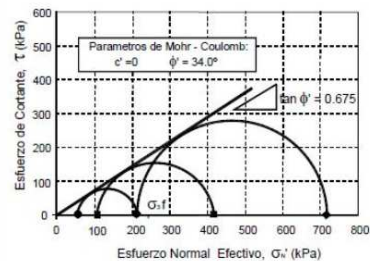
ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

- Se localiza otro punto a lo largo de las abscisas a una distancia σ_1 a partir del origen. Este punto puede ser localizado, bien midiendo la distancia σ_1 desde el origen o ΔP desde el punto A, este punto es denotado B.

- Usando la distancia AB como diámetro, se construye un semicírculo (círculo de Mohr).

- Este procedimiento se repite usando los datos obtenidos del ensayo triaxial de los otros especímenes de la muestra de suelo.

- El paso final es dibujar una línea recta tangente a los semicírculos, la cual es llamada *la envolvente de falla*.





VARIACIÓN EN LOS ENSAYOS TRIAXIALES

Existen tres tipos básicos de procedimiento de ensayos de corte, los cuales son determinados por la condición drenada de la muestra, a saber:

No consolidado no drenado (UU), consolidado no drenado (CU) y consolidado drenado (CD).

Aunque estos tres tipos de procedimientos son aplicados tanto al ensayo de corte directo como al ensayo de compresión triaxial, ellos son explicados solamente para el ensayo triaxial.



• El ensayo no consolidado no drenado (UU), es llevado a cabo colocando el espécimen en la cámara e introduciendo la presión lateral de confinamiento sin permitir la consolidación (drenaje) de la muestra bajo la presión total.

Posteriormente es aplicada la carga axial sin permitir el drenaje de la muestra.

El ensayo UU puede ser ejecutado más rápidamente debido a que no se requiere que la muestra se consolide bajo la presión lateral o que drene durante la aplicación de la carga axial.

Debido al corto tiempo requerido para desarrollar este ensayo, este es a menudo llamado el ensayo rápido.





• El ensayo no consolidado no drenado (UU)

Debido a la aplicación de la presión de confinamiento en la cámara σ_3 , la presión de poros se incrementará una cantidad u_c .

Habrà un aumento adicional en la presión de poros Δu_d debido a la aplicación del esfuerzo desviador.

$$u = u_c + \Delta u_d$$

Pero

$$u_c = B \sigma_3$$

$$\Delta u_d = A \Delta \sigma_d$$

Entonces

$$u = B \sigma_3 + A \Delta \sigma_d$$



• El ensayo no consolidado no drenado (UU)

El esfuerzo axial agregado en la falla $(\Delta \sigma_d)_f$ es prácticamente el mismo independientemente de la presión de confinamiento en la cámara

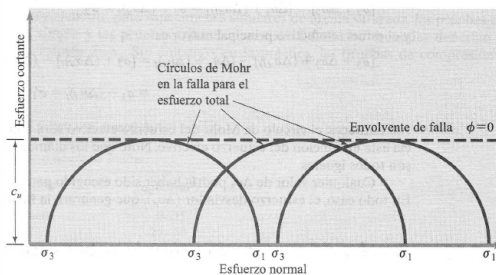


FIGURA 7.22 Círculos de Mohr del esfuerzo total y envoltura de falla ($\phi = 0$) obtenidos en pruebas triaxiales no consolidadas-no drenadas.

La envoltura de falla para los círculos de Mohr del esfuerzo total se vuelve una línea horizontal y por consiguiente se llama una condición de $\phi = 0$

$$\tau_f = c_u$$

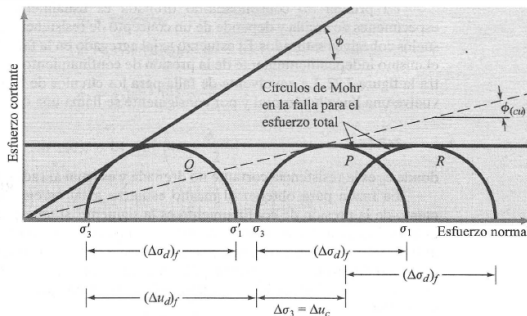
donde c_u es la resistencia cortante no drenada y es igual al radio de los círculos de Mohr.



•El ensayo no consolidado no drenado (UU)

Si un espécimen de arcilla es consolidado a una presión de cámara σ_3 y luego es cortado a la falla sin drenaje permitido, entonces las condiciones de esfuerzo total en la falla deben ser representadas por el círculo de Mohr P . La presión de poro desarrollada en el espécimen en la falla es igual a $(\Delta u_d)_f$.

Los esfuerzos efectivos principales mayor y menor en la falla son entonces



$$\sigma'_1 = [\sigma_3 + (\Delta \sigma_d)_f] - (\Delta u_d)_f = \sigma_1 - (\Delta u_d)_f$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - (\Delta u_d)_f$$



•El ensayo consolidado no drenado (CU), es el tipo más común de ensayo triaxial.

En esta la muestra de suelo saturado, es sometida a una presión de cámara.

A la muestra se le permite la consolidación bajo la presión lateral manteniendo abiertas las líneas de drenaje.

Las líneas de drenaje son luego cerradas y el esfuerzo axial es incrementado sin permitir drenajes adicionales





• El ensayo consolidado no drenado (CU)

Después que la presión de poro del agua generada por la aplicación de la presión de confinamiento es completamente disipada (es decir, $u_c = B\sigma_3 = 0$), el esfuerzo desviador $\Delta\sigma_d$ sobre el espécimen se incrementa para causar la falla cortante.

Como el drenaje no se permite, la presión de poros del agua Δu_d crecerá.

Durante la prueba se hacen mediciones de $\Delta\sigma_d$ y Δu_d .

El incremento en la presión de poros del agua Δu_d se expresa en una forma adimensional como

$$A = \frac{\Delta u_d}{\Delta\sigma_d} \quad \text{donde } A = \text{parámetro de la presión de poro de Skempton (Skempton, 1954).}$$



• El ensayo consolidado no drenado (CU)

A diferencia de la prueba consolidada-drenada, los esfuerzos total y efectivo principal no son iguales en la prueba consolidada-no drenada.

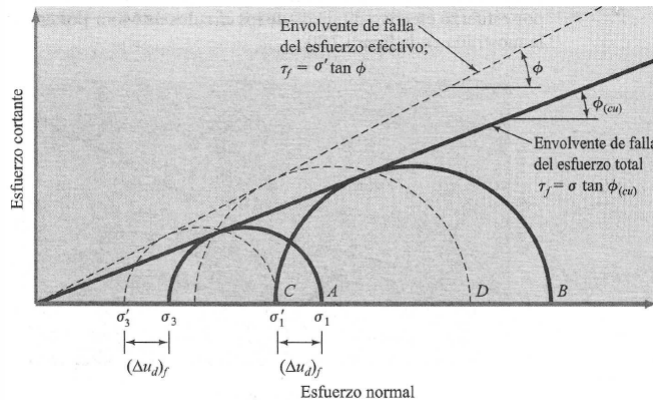
Como en esta prueba se mide la presión de poros en la falla, los esfuerzos principales se analizan como sigue:

- Esfuerzo principal mayor en la falla (total): $\sigma_3 + (\Delta\sigma_d)_f = \sigma_1$
- Esfuerzo principal mayor en la falla (efectivo): $\sigma_1 - (\Delta u_d)_f = \sigma'_1$
- Esfuerzo principal menor en la falla (total): σ_3
- Esfuerzo principal menor en la falla (efectivo): $\sigma_3 - (\Delta u_d)_f = \sigma'_3$



•El ensayo consolidado no drenado (CU)

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma'_1 - \sigma'_3$$



Para arena y arcillas normalmente consolidadas, la envolvente de falla se aproxima a una línea recta que pasa por el origen y se expresa por la ecuación

$$\tau_f = \sigma \tan \phi_{(cu)}$$

FIGURA 7.19 Envolventes de falla del esfuerzo total y efectivo para pruebas triaxiales consolidadas-no drenadas. (Nota: la figura supone que no se aplica presión de regreso.)



•El ensayo consolidado no drenado (CU)

Note que A y B son dos círculos de Mohr de esfuerzo total obtenidos de dos pruebas.

C y D son los círculos de Mohr de esfuerzo efectivo correspondientes a los círculos A y B de esfuerzo total, respectivamente.

Los diámetros de los círculos A y C son los mismos; similarmente, los diámetros de los B y D son iguales.



• El ensayo consolidado no drenado (CU)

En estos ensayos se realiza la medición de la presión de poros para obtener los parámetros de resistencia cortante drenada. Como el drenaje no se permite en esas pruebas durante la aplicación del esfuerzo desviador, las pruebas deben efectuarse rápidamente.

El parámetro A de presión de poros de Skempton, en la falla, se escribe como

$$\bar{A} = \bar{A}_f = \frac{(\Delta u_d)_f}{(\Delta \sigma_d)_f}$$

El rango general de valores de A_f la mayoría de los suelos de arcilla es como sigue:

- Arcillas normalmente consolidadas: 0.5 a 1
- Arcillas preconsolidadas: -0.5 a 0



Tabla 3.1 Valores típicos del parámetro A .

Tipo de Arcilla	Valor del Parámetro A de Skempton
Altamente sensitiva	0.75 a 1.5
Normalmente consolidada	0.5 a 1.0
Arcilla arenosa compactada	0.25 a 0.75
Arcilla ligeramente sobreconsolidada	0.0 a 0.5
Arcillas gravosas compactadas	- 0.25 a +0.25
Arcillas muy sobreconsolidadas	-0.5 a 0.0



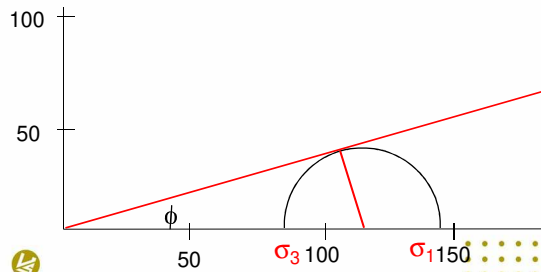


Ejemplo 8

Una prueba consolidada-no drenada fue conducida sobre un espécimen normalmente consolidado con una presión de confinamiento en la cámara de 85 kN/m².

El espécimen falló cuando el esfuerzo desviador fue de 60 kN/m². La presión de poros del agua en el espécimen en ese momento fue de 40 kN/m².

Determine los ángulos de fricción consolidada-no drenada y drenada.



Esfuerzos totales

$$\sigma_3 = 85 \text{ kN/m}^2$$

$$\Delta\sigma_{df} = 60 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_{df}$$

$$\sigma_1 = 85 + 60 = 145 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{sen}\phi = \frac{145 - 85}{145 + 85}$$

$$\phi_{cu} = 15,1^\circ$$



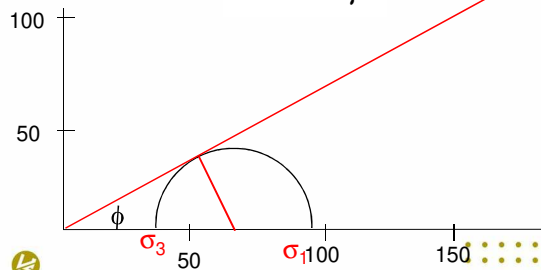
Ejemplo 8

Una prueba consolidada-no drenada fue conducida sobre un espécimen normalmente consolidado con una presión de confinamiento en la cámara de 85 kN/m².

El espécimen falló cuando el esfuerzo desviador fue de 60 kN/m². La presión de poros del agua en el espécimen en ese momento fue de 40 kN/m².

Determine los ángulos de fricción consolidada-no drenada y drenada.

$$\sigma' = \sigma - u$$



Esfuerzos efectivos

$$\sigma'_3 = 85 - 40 = 35 \text{ kN/m}^2$$

$$\Delta\sigma_{df} = 60 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \Delta\sigma_{df}$$

$$\sigma'_1 = 35 + 60 = 95 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{sen}\phi = \frac{95 - 35}{95 + 35}$$

$$\phi = 27,48^\circ$$

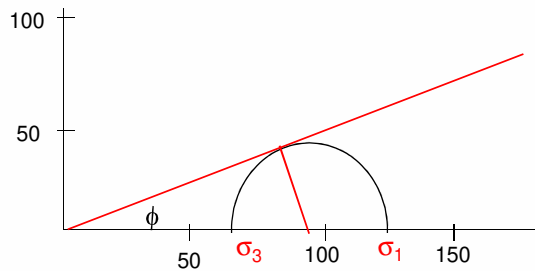




Ejemplo 9

La ecuación de la envolvente de falla del esfuerzo efectivo para un suelo arcilloso normalmente consolidado es $\tau_f = (\sigma' \tan 30^\circ$.

Una prueba triaxial drenada fue conducida sobre el mismo suelo con una presión de confinamiento en cámara de 70 kN/m^2 . Calcule el esfuerzo desviador en la falla.



Esfuerzos efectivos

$$\phi' = 30^\circ$$

$$\sigma'_3 = 70 \text{ kN/m}^2$$

$$\Delta\sigma_{df} = ?$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$$

$$\sigma'_1 = 70 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{30}{2} \right)$$

$$\sigma'_1 = 210 \text{ kN/m}^2 \quad \sigma'_1 = \sigma'_3 + \Delta\sigma_{df}$$

$$\Delta\sigma_{df} = 210 - 70$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \tan \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$$

$$\Delta\sigma_{df} = 140 \text{ kN/m}^2$$



VARIACIÓN EN LOS ENSAYOS TRIAXIALES

•El ensayo consolidado drenado (CD)

Es similar al ensayo CU, excepto en que al espécimen se le permita drenar cuando la carga axial es aplicada de modo que no se desarrollan altas presiones de poros.

Debido a que la permeabilidad de los suelos arcillosos es baja, la carga axial debe ser adicionada muy lentamente durante los ensayos CD de modo que el exceso de presión de poros pueda ser disipada.

Los ensayos CD pueden tomar considerable tiempo para ser llevados a cabo debido al tiempo requerido para la consolidación bajo la presión lateral y el drenaje durante la aplicación de la carga axial.

Este ensayo es a menudo llamado el ensayo lento





•El ensayo consolidado drenado (CD),

Conforme se aplica la presión de confinamiento, la presión de poro del agua del espécimen se incrementa en la cantidad u_c ; dicho aumento de la presión de poro del agua se expresa en forma de un parámetro adimensional:

$$B = \frac{u_c}{\sigma_3} \quad \text{donde } B = \text{parámetro de la presión de poro de Skempton (Skempton, 1954).}$$

Para suelos blandos saturados, B es aproximadamente igual a 1; sin embargo, para suelos firmes saturados, la magnitud de B es menor que 1.



•El ensayo consolidado drenado (CD),

Tabla 7.2 Valores teóricos de B con saturación completa.

Tipo de suelo	Valor teórico
Arcilla blanda normalmente consolidada	0.9998
Arcillas blandas ligeramente consolidadas y limos	0.9988
Arcillas firmes preconsolidadas y arenas	0.9877
Arenas muy densas y arcillas muy firmes bajo altas presiones de confinamiento	0.9130

Como la presión de poros del agua desarrollada durante la prueba es completamente disipada, tenemos:

esfuerzo de confinamiento total y efectivo $\sigma_3 = \sigma'_3$

esfuerzo axial total y efectivo en la falla $\sigma_1 = \sigma'_1$



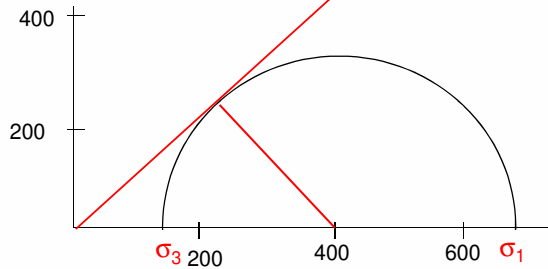
- 



Ejemplo 10:

Se llevó a cabo un ensayo de compresión triaxial drenada en una arena densa, el esfuerzo de confinamiento fue de 145 KN/m^2 y el esfuerzo vertical adicional para producir la falla fue de 530 KN/m^2 .

Calcular el ángulo de fricción interno y el ángulo de inclinación del plano de falla



Esfuerzos efectivos

$$\phi' = 30^\circ$$

$$\sigma'_3 = 145 \text{ KN/m}^2$$

$$\Delta\sigma_{df} = 530 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma'_1 = 675 \text{ KN/m}^2$$

$$\theta = 45^\circ + \frac{\phi'}{2}$$

$$\theta = 45^\circ + \frac{30}{2}$$

$$\theta = 60^\circ$$



Ejemplo 11:

Se llevó a cabo un ensayo de compresión triaxial drenada en una arena uniforme ($\phi = 34^\circ$). La presión de confinamiento fue de 195 KN/m^2 .

A qué esfuerzo vertical debe fallar la muestra?

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \tan \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right)$$

$$\sigma'_1 = 195 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{34}{2} \right)$$

$$\sigma'_1 = 689,74 \text{ KN/m}^2$$

Esfuerzos efectivos

$$\phi' = 34^\circ$$

$$\sigma'_3 = 195 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma'_1 = ??$$





Ejemplo 12:

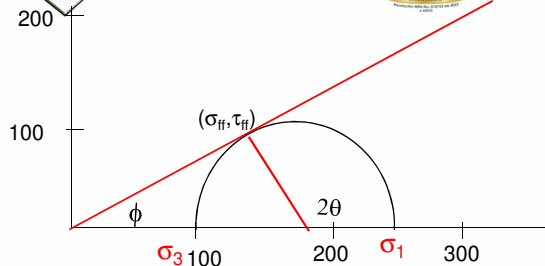
Para una arcilla normalmente consolidada, se obtuvieron los siguientes datos en una prueba triaxial drenada

Presión de confinamiento de la cámara 100 KN/m^2 .

Esfuerzo desviador en la falla 150 KN/m^2 .

Calcule:

- Angulo de fricción interna
- Angulo θ que el plano de falla forma con el plano principal mayor
- El esfuerzos normal efectivo σ' y el esfuerzo cortante τ sobre el plano de falla



$$\sin \phi = \frac{250 - 100}{250 + 100}$$

$$\phi = 25,37^\circ$$

$$\theta = 45^\circ + \frac{\phi}{2}$$

$$\theta = 45^\circ + \frac{25,37}{2}$$

$$\theta = 57,68^\circ$$

Esfuerzos efectivos

$$\sigma'_3 = 100 \text{ KN/m}^2$$

$$\Delta \sigma_{df} = 150 \text{ KN/m}^2$$

$$\phi = ??$$

$$\theta = ??$$

$$\sigma_{ff} \text{ y } \tau_{ff}$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \Delta \sigma_{df}$$

$$\sigma'_1 = 100 + 150 = 250 \text{ kN/m}^2$$

$$r = \frac{\Delta \sigma_{df}}{2} \quad r = \frac{150}{2} = 75 \text{ kN/m}^2$$

$$\tau_{ff} = 75 \sin(180^\circ - 2\theta)$$

$$\tau_{ff} = 75 \sin(180^\circ - 115,37)$$

$$\tau_{ff} = 67,77 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{ff} = 175 - 75 \cos(180^\circ - 2\theta)$$

$$\sigma_{ff} = 175 - 75 \cos(180^\circ - 115,37)$$

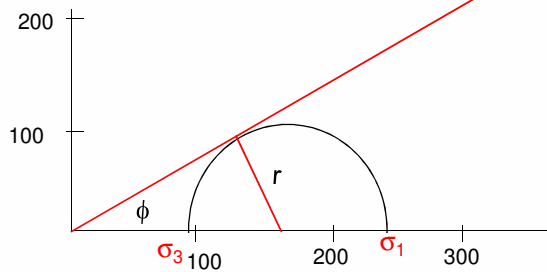
$$\sigma_{ff} = 142,87 \text{ kN/m}^2$$





Ejemplo 13

Un suelo arenoso tiene un ángulo de fricción drenado de 36° . En una prueba triaxial drenada sobre el mismo suelo, el esfuerzo desviador en la falla fue de 268 kN/m^2 . ¿Cuál fue la presión de confinamiento en la cámara?



$$\sin 36^\circ = \frac{134}{\sigma_3 + 134} \quad \sigma_3 = 93,974 \text{ kN/m}^2$$

Esfuerzos efectivos

$$\phi' = 36^\circ$$

$$\Delta\sigma_{df} = 268 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_3 = ??$$

$$\sin \phi = \frac{r}{\sigma_3 + r}$$

$$r = \frac{\Delta\sigma_{df}}{2}$$

$$r = \frac{268}{2} = 134 \text{ kN/m}^2$$



Ejemplo 14

Durante una prueba triaxial consolidada-no drenada sobre un espécimen de suelo arcilloso, los esfuerzos principales menor y mayor en la falla fueron de 96 kN/m^2 y 187 kN/m^2 , respectivamente.

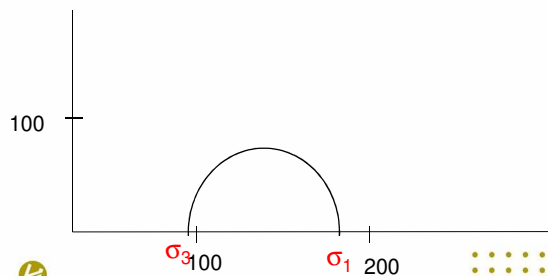
¿Cuál será el esfuerzo axial en la falla si un espécimen similar es sometido a una prueba de compresión inconfiada?

En el ensayo de compresión triaxial no drenado

Esfuerzos totales

$$\sigma_3 = 96 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_1 = 187 \text{ kN/m}^2$$



$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_{df}$$

$$\Delta\sigma_{df} = 91 \text{ kN/m}^2$$



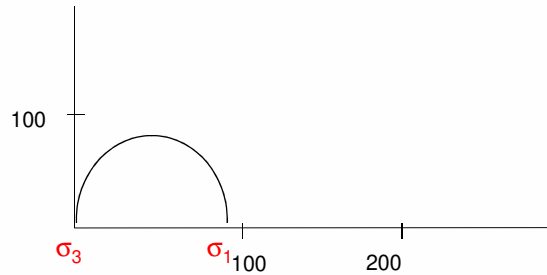


En el ensayo de compresión inconfínada

Esfuerzos totales

$$\sigma_3 = 0 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma_1 = 91 \text{ KN/m}^2$$



Ejemplo 1.7

El ángulo de fricción ϕ de un espécimen de arcilla normalmente consolidada obtenido durante una exploración de campo se determinó en pruebas triaxiales drenadas igual a 25° .

La resistencia a compresión simple q_u de un espécimen similar se encontró igual a 122 kN/m^2 .

Determine la presión de poros del agua en la falla para la prueba de compresión inconfínada.

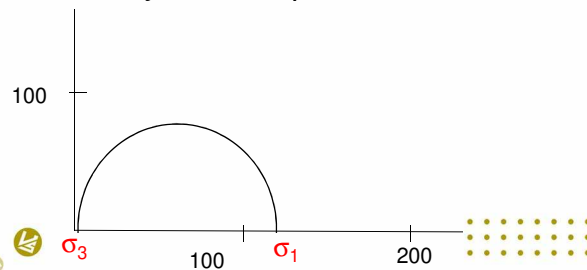
En el ensayo de compresión inconfínada

Esfuerzos totales

$$q_u = 122 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma_3 = 0$$

$$\sigma_1 = 122 \text{ KN/m}^2$$



$$c = \frac{q_u}{2}$$

$$c = 61 \text{ KN/m}^2$$





Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA

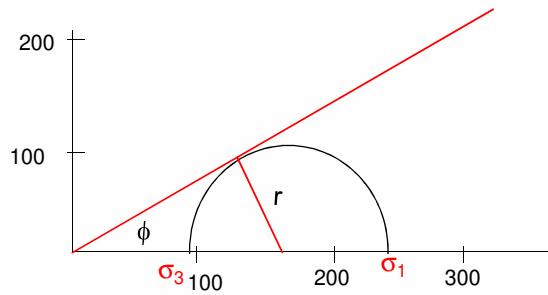


En el ensayo de compresión triaxial drenado

Esfuerzos efectivos

$$\phi' = 25^\circ$$

$$\Delta\sigma_{df} = 122 \text{ KN/m}^2$$



$$\sin\phi = \frac{r}{\sigma_3 + r}$$

$$r = \frac{\Delta\sigma_{df}}{2}$$

$$r = \frac{122}{2} = 61 \text{ KN/m}^2$$

$$\sin 25^\circ = \frac{61}{\sigma_3 + 61}$$

$$\sigma_3 = 83,33 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma = \sigma' + \mu$$

$$\sigma_3 = \sigma'_3 + \mu$$

$$\mu = \sigma_3 - \sigma'_3$$

$$\mu = 0 - 83,33 \text{ KN/m}^2$$

$$\mu = -83,33 \text{ KN/m}^2$$

