RESISTENCIA AL CORTE DE SUELOS

Problemas resueltos

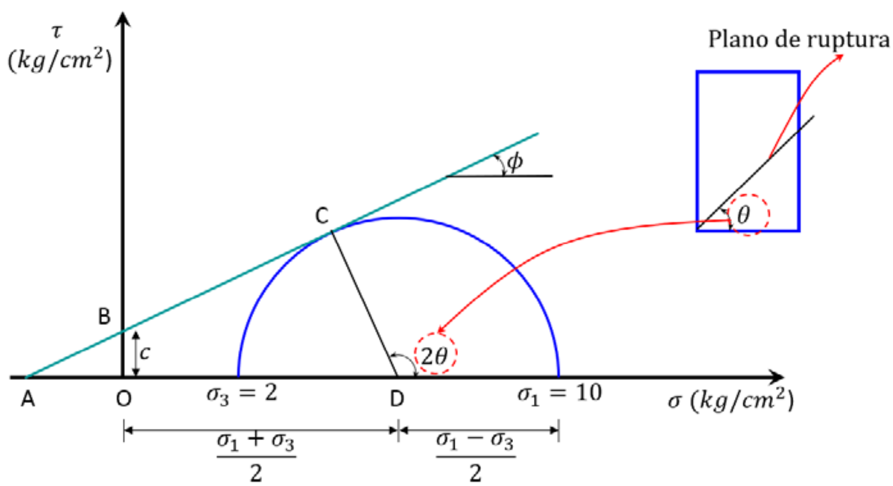
Problema 1

Un ensayo en una muestra de arcilla proporciona los siguientes resultados: $\sigma_3 = 2\, kg/cm^2$, $\sigma_1 = 10\, kg/cm^2$ y ángulo de inclinación del plano de ruptura $\theta = 60°$. Determine los parámetros de resistencia al corte, el esfuerzo normal y de corte en el momento de la ruptura.

Solución:

Con los datos proporcionados se procede a representar gráficamente mediante el círculo de Mohr. En la figura, el eje de abscisas representa el esfuerzo normal y el eje de ordenadas corresponde al esfuerzo cortante.

Como en el ensayo alcanza la ruptura para $\sigma_3 = 2\, kg/cm^2$ y $\sigma_1 = 10\, kg/cm^2$, con estos valores de traza el circulo. Además, el ángulo del plano de falla, respecto de la horizontal en la muestra de suelo ensayado es de 60°, en el círculo de Mohr este plano se representa mediante un plano cuya inclinación es el doble, o sea 120° (segmento $\overline{CD}$)



Cálculo del ángulo de fricción interna.

En el triángulo ACD, el ángulo de fricción interna está relacionado con el ángulo del plano de falla según:

$$\phi + 90 = 2\theta \ \rightarrow \ \phi = 2\theta - 90 = 120 - 90$$

$$\boldsymbol{\phi = 30°}$$

Cálculo de la cohesión (c).

La cohesión está representada por el segmento $\overline{OB}$, y a la ves este segmento es función del ángulo de fricción interna (ϕ) mediante:

$$(\overline{AO} + \overline{OD}) sen\phi = \overline{CD}$$

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

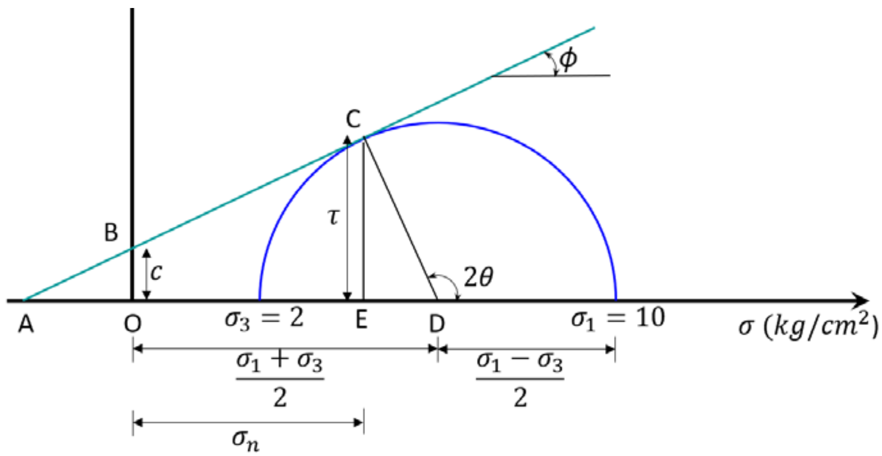
Reemplazando valores:

$$\left[c \times cot30 + \frac{10 + 2}{2}\right] sen30 = \frac{10 - 2}{2}$$

$$\rightarrow \boldsymbol{c = 1.15\ kg/cm^2}$$

Entonces los parámetros de resistencia al corte son $\phi = 30°$ y $c = 1.15\ kg/cm^2$.

Cálculo de esfuerzo normal y de corte en el momento de la ruptura: corresponde a las coordenadas del punto C.



Entonces:

$$\tau = \overline{CE} = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right) cos\phi = 4cos30 = 2\sqrt{3}$$

$$\boldsymbol{\tau = 3.46\ kg/cm^2}$$

$$\sigma_n = \overline{OD} - \overline{CE} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right) sen\phi = 6 - 4sen30$$

$$\boldsymbol{\sigma_n = 4.0\ kg/cm^2}$$

Entonces los esfuerzos, normal y de corte en el momento de la ruptura son: $\sigma_n = 4.0\ kg/cm^2$ y $\tau = 3.46\ kg/cm^2$.

Respuesta

$\phi = 30°$

$c = 1.15\ kg/cm^2$

$\sigma_n = 4.0\ kg/cm^2$

$\tau = 3.46\ kg/cm^2$

Problema 2

En un depósito de suelo de peso específico $\gamma_{nat} = 20.1\,kN/m^3$, se realizó una excavación de 8.5 m de profundidad. Inicialmente no se encontró presencia de agua. Posteriormente se pudo verificar que el agua alcanzaba una altura de 4.7 m a partir del fondo de la excavación. Determine la resistencia al corte del suelo en un plano horizontal, antes y después de la aparición del agua. Considere cohesión $c = 0$ y ángulo de fricción interna de $\phi = 20°$. Considerar el peso específico del agua $\gamma_w = 10\,kN/m^3$.

Solución:

La resistencia al corte del suelo se puede expresar mediante:

$$\tau = c + \sigma' tg\phi = c + (\sigma - u)tg\phi$$

a) Para el primer caso: donde no hay presencia de agua (no existe poro presión)

$$\sigma = \gamma_{nat} \times \text{h} = (20.1\,kN/m^3)(8.5m) = 170.85\,kPa$$

Como $u = 0$, entonces

$$\sigma' = \sigma = 170.85\,kPa$$

Por lo tanto, la resistencia al corte es:

$$\tau = c + \sigma' tg\phi = 0 + 170.85 \times tg20° = \mathbf{62.18\,kPa}$$

b) Para el segundo caso: donde en nivel de agua asciende a 4.7 m respecto del fondo de la excavación consideramos.

$$u = \gamma_w \times 4.7 = 10 \times 4.7 = 47\,kPa$$

$$\sigma' = \sigma - u = 170.85 - 74 = 123.85\,kPa$$

Por lo tanto, la resistencia al corte es:

$$\tau = c + \sigma' tg\phi = 0 + 123.85 \times tg20° = \mathbf{45.08\,kPa}$$

Respuesta

$$\tau_{antes} = 62.18\,kPa$$

$$\tau_{despues} = 45.08\,kPa$$

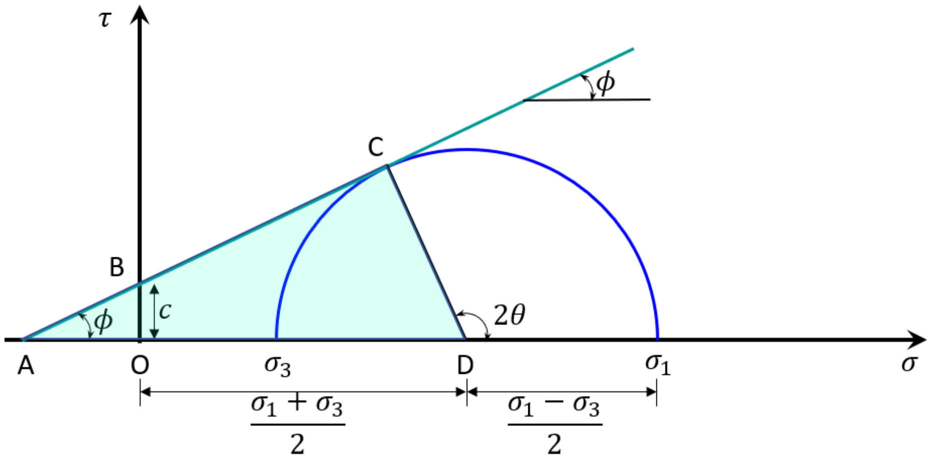
Problema 3

Una muestra de arena seca fue sometida a un ensayo de compresión triaxial presentando un ángulo de fricción interna $\phi = 37°$. Sabiendo que en esfuerzo confinante es $\sigma_3 = 2\,kg/cm^2$, determine el valor del esfuerzo principal mayor σ_1.

Solución:

En el triángulo ACD de la siguiente figura, se puede relacionar los segmentos $\overline{AO}$, $\overline{OD}$ y $\overline{CD}$, además cada uno de estos segmentos se puede expresar en función de los esfuerzos principales y los parámetros de corte.

Se puede deducir una relación que nos permita determinar el esfuerzo principal mayor σ_1 a partir del esfuerzo principal menor σ_3 y los parámetros de resistencia:



$$(\overline{AO}+\overline{OD})sen\phi=\overline{CD}$$

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

$$2c\times cos\phi+(\sigma_1+\sigma_3)sen\phi=\sigma_1-\sigma_3$$

$$2c\times cos\phi+\sigma_3(1+sen\phi)=\sigma_1(1-sen\phi)$$

$$\sigma_1=2c\times\frac{cos\phi}{(1-sen\phi)}+\sigma_3\frac{(1+sen\phi)}{(1-sen\phi)}$$

Como:

$$\frac{cos\phi}{(1-sen\phi)}=tg\left(45+\frac{\phi}{2}\right)$$

$$\frac{(1+sen\phi)}{(1-sen\phi)}=tg^2\left(45+\frac{\phi}{2}\right)$$

Entonces:

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

Reemplazando los valores proporcionados del ensayo de compresión triaxial, se determina el esfuerzo principal de corte (la cohesión es cero por tratarse de una arena seca), entonces:

$$\sigma_1=2\times tg^2\left(45+\frac{37}{2}\right)=\mathbf{8.0\,kg/cm^2}$$

Respuesta

$$\sigma_1=8.0\,kg/cm^2$$

Problema 4

Determine el ángulo de fricción interna de una muestra de arena que fue sometida a un ensayo de compresión triaxial, donde alcanzó la ruptura cuando $\sigma_1 = 3\sigma_3$.

Solución:

Por tratarse de arena consideraremos que la cohesión es cero. Entonces:

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

$$3\sigma_3 = \sigma_3 \times tg^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)$$

Resolviendo:

$$\phi = 30°$$

Respuesta

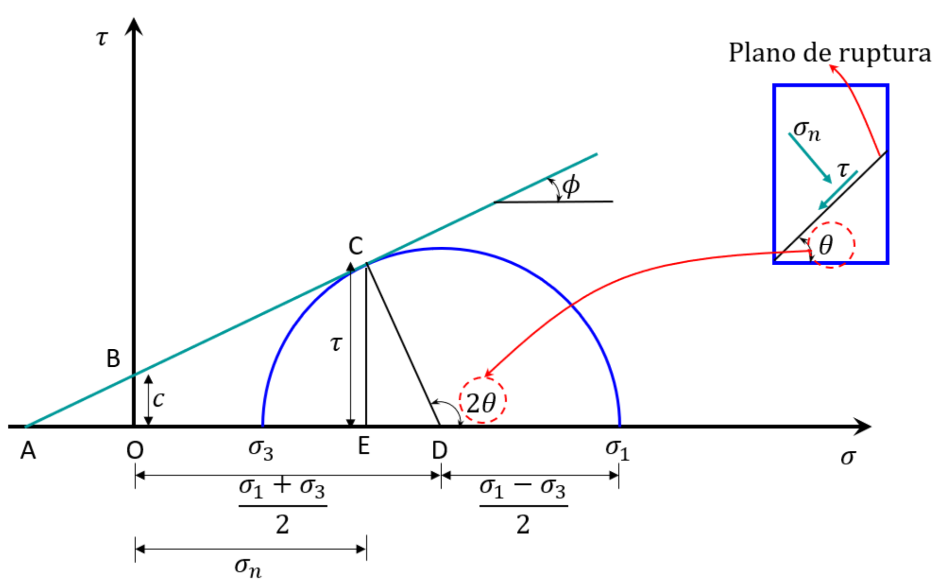
$\phi = 30°$

Problema 5

Se realizó un ensayo triaxial en una muestra de arcilla, con un esfuerzo de confinamiento de $\sigma_3 = 2\,kg/cm^2$, en el momento de la ruptura se registró un esfuerzo desviador de $\Delta\sigma = 2.8\,kg/cm^2$ y presión de poros de $u = 1.8\,kg/cm^2$. Si el plano de ruptura forma un ángulo de 57° con la horizontal, determine el esfuerzo normal y de corte en dicha superficie de ruptura.

Solución:

El esfuerzo normal y de corte se puede representar en el círculo de Mohr, en el cual el análisis resultará más sencillo (de forma geométrica).



En esfuerzo normal:

$$\sigma_n = \overline{OD} - \overline{CE} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right) cos(180° - 2\theta) = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right) cos2\theta$$

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2}\right) cos2\theta$$

El esfuerzo principal mayor se determina a partir de σ_3 y $\Delta\sigma$.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma = 2 + 2.8 = 4.8\ \ kg/cm^2$$

Entonces:

$$\sigma_n = \frac{4.8 + 2}{2} + \left(\frac{2.8}{2}\right) cos(2 \times 57) = \mathbf{2.83\ \ kg/cm^2}$$

En esfuerzo de corte:

$$\tau = \overline{CE} = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right) sen(180° - 2\theta) = \left(\frac{\Delta\sigma}{2}\right) sen2\theta$$

$$\tau = \overline{CE} = \left(\frac{2.8}{2}\right) sen2\theta = \mathbf{1.28\ \ kg/cm^2}$$

Respuesta

$\sigma_n = 2.83\ \ kg/cm^2$

$\tau = 1.28\ \ kg/cm^2$

Problema 6

Una muestra de arcilla no saturada, presentó una presión de pre-consolidación, en compresión isotrópica de 100 kPa, correspondiente a un índice de vacíos de 2, índice de compresión es $C_c = 1$ e índice de expansión es $C_S = 1$. En un ensayo CD convencional realizado en la misma muestra, con un esfuerzo de confinamiento de 100 kPa, se registró un esfuerzo desviador de $\Delta\sigma = 180\,kPa$ y variación del volumen (ε_v) de 9% en el momento de la ruptura. Determinar:

a) ¿Cuál es la envoltoria de resistencia de dicha arcilla para esfuerzos mayores al esfuerzo de pre-consolidación?
b) Si se realiza otro ensayo CD en el mismo suelo, pero esta vez con un esfuerzo de confinamiento de 200 kPa,

b.1 ¿Cuál será el esfuerzo desviador ($\Delta\sigma$) durante la ruptura?

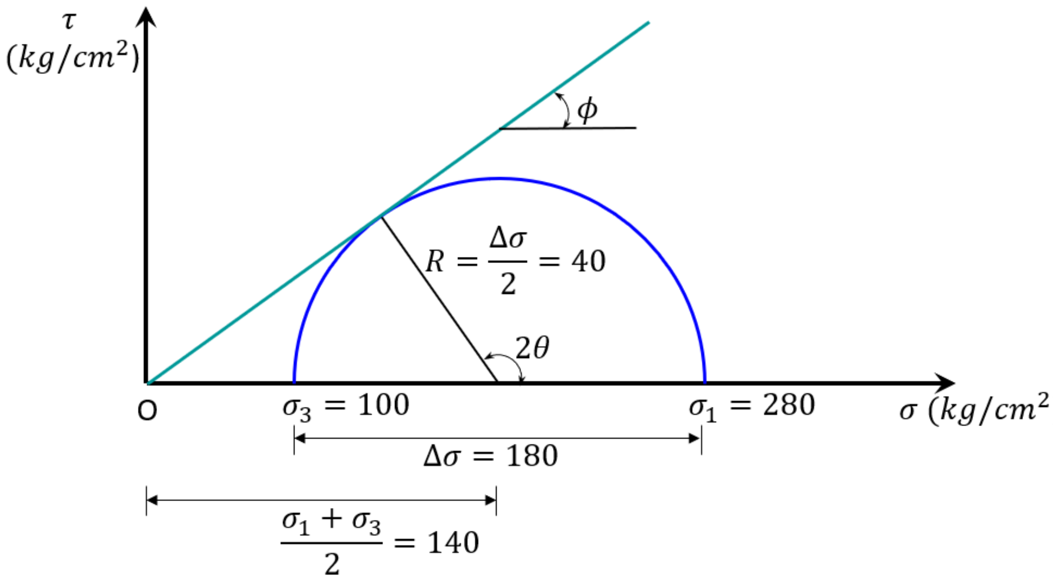
b.2 ¿Cuál será el índice de vacíos del cuerpo de prueba después de la aplicación del esfuerzo confinante?

b.3 ¿Cuál es el índice de vacíos en la ruptura?

Solución:

El esfuerzo normal y de corte se puede representar en el círculo de Mohr, en el cual el análisis resultará más sencillo (de forma geométrica).

a) Para esfuerzos mayores al de pre-consolidación, la envoltoria es una recta que pasa por el origen. Mediante el criterio de Mohr correspondiente a la ruptura del primer ensayo, el ángulo de fricción interna corresponderá a la inclinación de dicha trayectoria de resistencia, por lo tanto:



$$sen\phi = \frac{\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)}{\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right)} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}$$

Además:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma = 100 + 180 = 280\ kg/cm^2$$

Por lo tanto:

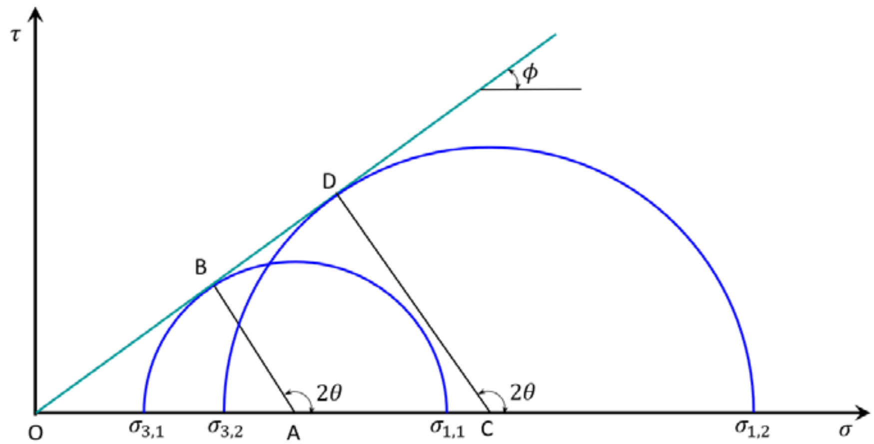
$$\phi = arcsen\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}\right) = arcsen\left(\frac{180}{380}\right)$$

$$\phi = 28.3°$$

Entonces la envoltoria de falla es:

$$\tau = \sigma tg\phi = \sigma tg 28.3°$$

b) En la figura se puede observar que los esfuerzos desviadores en la ruptura, son proporcionales a los esfuerzos confinantes cuando el suelo está bajo esfuerzos de confinamiento (los triángulos OAB y OCD son semejantes) entonces el esfuerzo desviador es:



b.1

$$\frac{\Delta\sigma_{ensayo\ 1}}{\sigma_{3,ensayo\ 1}} = \frac{\Delta\sigma_{ensayo\ 2}}{\sigma_{3,ensayo\ 2}}$$

Entonces en esfuerzo desviador durante la ruptura es:

$$\Delta\sigma_{ensayo\ 2} = \left(\frac{\Delta\sigma_{ensayo\ 1}}{\sigma_{3,ensayo\ 1}}\right)\sigma_{3,ensayo\ 2} = \left(\frac{180}{100}\right) \times 200 = \boldsymbol{360\ kPa}$$

Entonces el esfuerzo principal mayor del segundo ensayo es:

$$\sigma'_1 = \sigma_{3,2} + \Delta\sigma_{ensayo\ 2} = 360 + 200 = 560\ kPa$$

b.2 Cuando el cuerpo de prueba se consolida debido al incremento de esfuerzo de confinamiento de $\sigma_{3,1} = 100\ kPa$ a $\sigma_{3,2} = 200\ kPa$ sufre una compresión debido a la reducción del índice vacíos, y esta compresión está indicada por el índice de compresión conforme:

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{log\sigma_{3,2} - log\sigma_{3,1}}$$

$$\rightarrow\ \Delta e_{etapa\ de\ consolidación} = e_1 - e_2 = C_c\left[log\sigma_{3,2} - log\sigma_{3,1}\right]$$

$$\Delta e_{etapa\ de\ consolidación} = 1[log200 - log100] = 0.3$$

El índice de vacíos al final de la etapa de consolidación es:

$$e_2 = e_1 - \Delta e_{etapa\ de\ consolidación} = 2 - 0.3 = \boldsymbol{1.7}$$

b.3 El ensayo de confinamiento $\sigma_{3,1} = 100\ kPa$ obtuvo una variación de volumen de 9%, que también ocurre en los ensayos realizados con esfuerzos de confinamiento superior. La variación del volumen (ε_v) corresponde a una variación del índice de vacíos y se puede expresar mediante en función al índice de vacíos al inicio del segundo ensayo $e_{1,2}$ mediante:

$$\Delta e_{etapa\ de\ corte} = \varepsilon_v(1 + e_2) = 0.09(1 + 1.7) = \boldsymbol{0.24}$$

entonces durante la carga axial, la variación del índice de vacíos es 0.24, por lo tanto, el índice de vacíos al final (e_f)del ensayo es:

$$e_f = 1.7 - 0.24 = \mathbf{1.46}$$

Respuesta

a) $\phi = 28.3°$

b.1) $\Delta\sigma_{ensayo\ 2} = 360\ kPa$

b.2) $e_2 = 1.7$

b.3) $e_f = 1.46$

PROBLEMAS PROPUESTOS

Problema 7

Tres muestras de arcilla saturada fueron normalmente consolidadas bajo un esfuerzo confinante de 100 kPa. Posteriormente, las tres muestras fueron sometidas a ensayo de compresión triaxial con una presión de confinamiento de 200 kPa. En primer ensayo fue del tipo CD; el segundo del tipo CU y el tercero del tipo UU. En el segundo ensayo la ruptura ocurrió con un incremento de esfuerzo axial de 180 kPa, y presión neutra de 110 kPa. Asumiendo que el comportamiento sea siempre de arcilla normalmente consolidada durante los tres ensayos, determine el esfuerzo desviador en la ruptura y la presión neutra para los ensayos CD y UU. Represente gráficamente las trayectorias de tensiones efectivas (TTE) de los tres ensayos.

Problema 8

En una muestra de arcilla saturada normalmente consolidada ($c' = 0$) se realizó un ensayo CU convencional utilizando una presión de confinamiento $\sigma_3 = 200\ kPa$. La ruptura ocurrió con un esfuerzo desviador de 300 kPa y exceso de presión de poros de 70 kPa. Calcular:

a) El ángulo de fricción interna efectivo ϕ' y el parámetro de Skempton A de la arcilla.
b) Si se ejecuta el ensayo CD en la misma muestra, ¿Cuál sería el esfuerzo desviador en la ruptura?