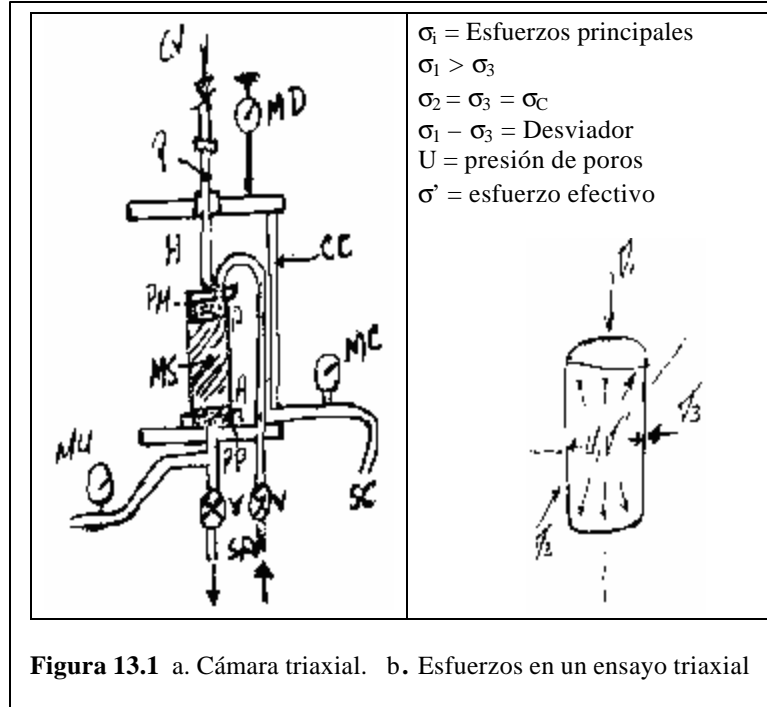


CAPÍTULO 13

ENSAYO TRIAXIAL Y CORTE

13.1 CÁMARA TRIAXIAL

- MS = Muestra de suelo en prueba
- M = Membrana de caucho para MS
- A = Anillo de caucho para M
- MD = Medidor de deformaciones
- MU = Medidor de presión de poros
- MC = Medidor de presión de cámara
- CV = Carga vertical (σ_1)
- P = Pistón de carga vertical
- A = Agua a presión (σ_3)
- PM = Placa metálica
- PP = Piedra porosa
- V = Válvula de control
- SA = Salida (entrada) de agua al suelo
- SC = Salida de agua de cámara
- CC = Cámara cilíndrica



Al interior de un cilindro transparente cargado de agua y denominado cámara, se encuentra un espécimen de suelo de forma cilíndrica y menor diámetro, protegido con una membrana impermeable. El interior de uno y otro pueden ser manipulados: primero, vía SC, para confinar el suelo presurizando la cámara en las 2 direcciones horizontales, y luego, vía P, para cargar el suelo en la dirección vertical con la misma presión de la cámara. Este esfuerzo representa la presión de sepultura de la muestra de suelo y como tal, las condiciones iniciales.

El Segundo paso, vía V, para permitir la saturación de la muestra de suelo o su drenaje, casos en los que el agua asciende por el suelo para sacar el aire, o invirtiendo el flujo, el aire baja por el para drenarlo. La columna cilíndrica de suelo MS está apoyada y coronada por sendas piedras porosas. Las arenas se ensayan en condiciones drenadas y las arcillas, saturadas. La consolidación supone el suelo saturado y la salida de agua y deformación estará asociada a sobrecargas y controlada por la permeabilidad del suelo..

Tercero, vía P, gradualmente aplico la sobrecarga Q para el suelo, sometiéndolo a un esfuerzo vertical de compresión adicional que es el denominado desviador, cuya magnitud debe ir creciendo hasta fallar la muestra, ya sea permitiendo o no la salida de agua del suelo vía V, pero sin variar la presión de cámara. Las deformaciones se miden en MD, la presión de cámara en MC y la presión de poros en MU. Además, en el caso de asentamientos, es necesario medir las deformaciones en el tiempo.

13.2 DESARROLLO DE LAS ECUACIONES PARAMÉTRICAS

De σ_1, σ_2, p' y q en $f(\phi)$

$$2\theta_{CR} = 90 + \phi \Rightarrow \theta_{CR} = 45 + \phi/2 \text{ (fig)}$$

$$OF = OA \text{ sen } \phi' \therefore$$

$$\frac{1}{2}(\mathbf{s}'_1 - \mathbf{s}'_3) = [C' \cot f + \frac{1}{2}(\mathbf{s}'_1 + \mathbf{s}'_3)] \text{sen } f$$

$$\text{de donde } \mathbf{s}'_3 = \mathbf{s}'_1 \left[\frac{1 - \text{sen } f}{1 + \text{sen } f} \right] - 2C' \left[\frac{\cos f}{1 + \text{sen } f} \right]$$

entonces

$$\begin{cases} \mathbf{s}'_3 = \mathbf{s}'_1 \text{tg}^2(45^\circ - \frac{f}{2}) - 2C' \text{tg}^2(45^\circ - \frac{f}{2}) \\ \mathbf{s}'_1 = \mathbf{s}'_3 \text{tg}^2(45^\circ + \frac{f}{2}) + 2C' \text{tg}^2(45^\circ + \frac{f}{2}) \end{cases} \quad (13.1)$$

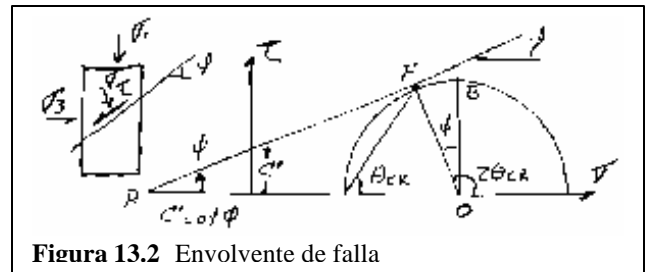


Figura 13.2 Envolvente de falla

En el diagrama $p'q'$ $\text{tg} \alpha = \text{sen } \phi' \quad a = C \cos \phi'$ (Sección 12.7)

$$q = C \cos \phi' + p' \text{sen } \phi' \quad (13.2)$$

IMPORTANTE. En general los análisis de estabilidad de suelos se pueden llevar a cabo en términos de ESFUERZOS EFECTIVOS, puesto que es el esfuerzo efectivo el que controla la resistencia al corte de los suelos. Sin embargo, para arcillas saturadas no drenadas (\bar{D}), el análisis se puede hacer en términos de ESFUERZOS TOTALES.

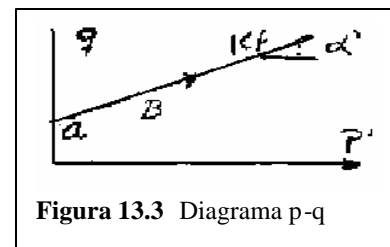


Figura 13.3 Diagrama p-q

Ejercicio 13.1

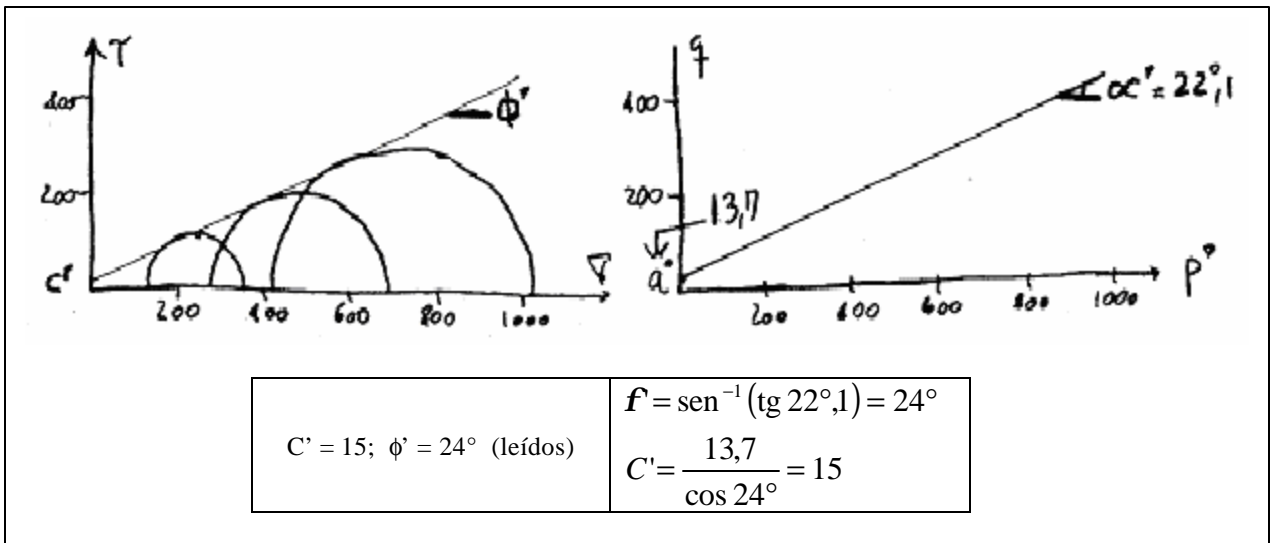
Se hace un triaxial C y \bar{D} sobre muestras inalteradas de arcilla saturada:

| ENSAYO | $\sigma_C \text{ KN/m}^2$ | D KN/m^2 | PP KN/m^2 |
|--------|---------------------------|-------------------|--------------------|
| 1 | 200 | 227,0 | 68,1 |
| 2 | 400 | 421,4 | 126,4 |
| 3 | 600 | 615,7 | 184,7 |

Calcular ϕ' y C' con círculo de Mohr y con el diagrama $p' - q$. Solución:

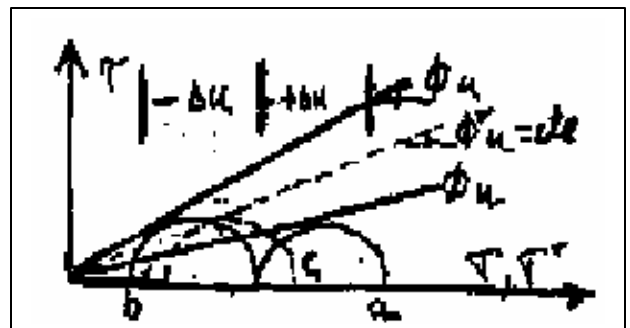
| Ensayo | σ_3 | $\sigma_1 - \sigma_3$ | U_f | σ'_3 | σ'_1 | q | p' |
|--------|------------|-----------------------|-------|-------------|-------------|-------|-------|
| 1 | 200 | 227 | 68,1 | 139,1 | 358,9 | 113,5 | 245,4 |
| 2 | 400 | 421,4 | 126,4 | 273,6 | 695,0 | 210,7 | 484,3 |
| 3 | 600 | 615,7 | 184,7 | 415,3 | 1031,0 | 307,9 | 723,2 |

$$\begin{cases} s' = s - U \\ D = s_1 - s_3 \\ p' = \frac{1}{2}(s'_1 + s'_3) \\ q = \frac{1}{2}(s_1 - s_3) \end{cases}$$



Ejercicio 13.2. En un ensayo triaxial una muestra puede fallar a) aumentando σ_1 pero σ_3 constante, b) lo contrario. Qué pasa con los esfuerzos.

Solución: Cambia ϕ_U pero el valor de ϕ' nunca cambiará. El cambio en los esfuerzos totales hace que en a), $\Delta U > 0$ y en b), $\Delta U < 0$



Ejercicio 13.3. Construir el círculo de Mohr con los resultados de un ensayo, en el cual se fallan dos muestras de granito en ensayo triaxial.

Muestra 1: $\sigma_1 = 140$ MPa; $\sigma_3 = 0$ MPa.

Muestra 2: $\sigma_1 = 550$ MPa; $\sigma_3 = 100$ MPa.

Solución: $R_i = \frac{s_1 - s_3}{2}$: $R_1 = 70$ MPa; $R_2 = 225$ MPa.

$O_i = \text{Centro círculo} = \frac{s_1 + s_3}{2}$: $O_1 = 70$ MPa; $O_2 = 325$ MPa.

Con estos datos dibujamos la envolvente y leemos a escala, C , ϕ , F_1 y F_2 , obteniendo $C = 35$ MPa; $\phi = 37^\circ$ MPa; $\tau_1 = 58$ MPa; $\sigma_1 = 30$ MPa; $\tau_2 = 180$ MPa; $\sigma_2 = 190$ MPa.

Solución analítica. (utilizamos la línea K_f y el ángulo α)

$$a = \text{tg}^{-1} \left(\frac{R_2 - R_1}{O_2 - O_1} \right)$$

$$= \text{tg}^{-1} \left(\frac{225 - 70}{325 - 70} \right) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{155}{255} \right)$$

$$f = \text{sen}^{-1}(\text{tg } a) = \text{sen}^{-1} \left(\frac{155}{255} \right) = 37^\circ,4 \quad (*)$$

$$a = R_1 - h = R_1 - O_1 \text{tg } \alpha$$

$$a = 70 - 70 \left(\frac{155}{255} \right) = 27,47 \text{ MPa}$$

$$C = \frac{a}{\cos f} = 34,6 \text{ MPa} \quad (*)$$

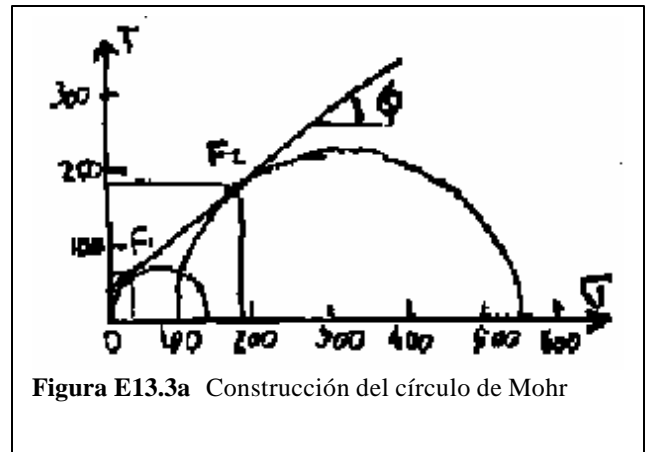


Figura E13.3a Construcción del círculo de Mohr

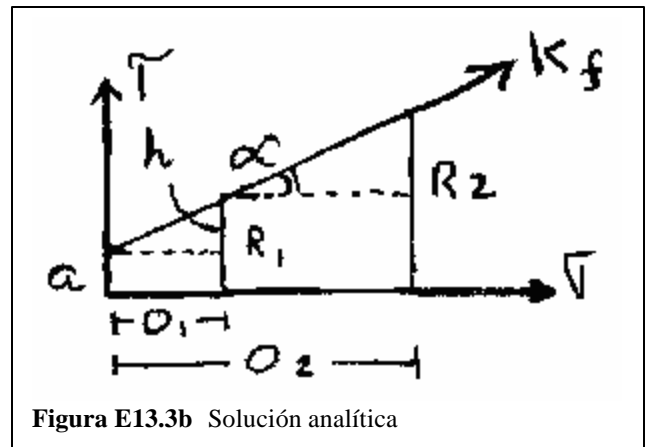
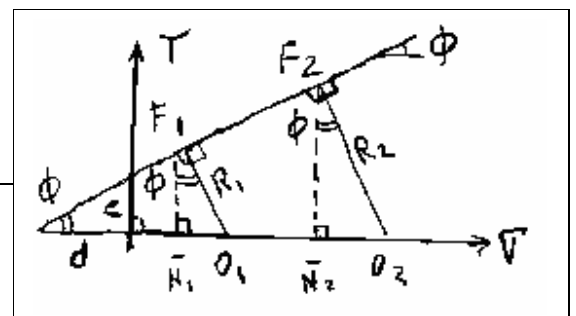


Figura E13.3b Solución analítica

NOTA (*) ver fórmulas de $\phi = f(\alpha)$ y $C = f(a)$ en la Sección 12.7, ecuaciones 12.12 y 12.13

Cálculo de los esfuerzos de falla, σ_{1f} , τ_{1f} y σ_{2f} , τ_{2f}



Trazada la envolvente, se dibujan a 90° R₁ y R₂, perpendiculares en F₁ y F₂. Se bajan las normales \overline{N}_1 y \overline{N}_2 . Queda copiado ϕ .

Cortantes de falla (ordenadas de F₁ y F₂)

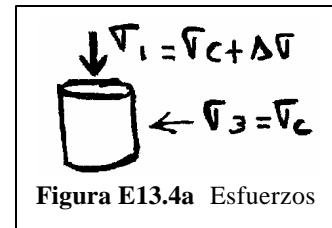
$$\tau_{f1} = R_1 \cos \phi = 70 \cos 37^\circ,4 = 55,61 \text{ MPa}$$

$$\tau_{f2} = R_2 \cos \phi = 225 \cos 37^\circ,4 = 178,74 \text{ MPa}$$

Normales de falla (abscisas de F₁ y F₂)

$$\sigma_{f1} = O_1 - R_1 \operatorname{sen} \phi = 70 - 70 \operatorname{sen} 37^\circ,4 = 27,48 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{f2} = O_2 - R_2 \operatorname{sen} \phi = 325 - 225 \operatorname{sen} 37^\circ,4 = 188,34 \text{ MPa}$$



Ejercicio 13.4. Se tiene los esfuerzos máximos de pruebas triaxiales con arena compacta bien gradada (ver datos σ_1 y σ_3 en la tabla).

Obtenga y represente ϕ y α (Sección 12.7)

| α | ϕ | q_f / p_f | | P_f | q_f | | DATOS Kg/cm^2 | |
|----------|--------|-------------|---|-------|-------|---|------------------------|---------------|
| | | | | | | | σ_{3f} | σ_{1f} |
| 33°,8 | 42°,0 | 0,6689 | ⇐ | 3,02 | 2,02 | ⇐ | 1 | 5,05 |
| 33°,5 | 41°,5 | 0,6622 | | 5,92 | 3,92 | | 2 | 9,85 |
| 34°,1 | 42°,6 | 0,6774 | | 12,40 | 8,40 | | 4 | 20,80 |
| 33°,8 | 42°,0 | 0,6687 | | 24,15 | 16,15 | | 8 | 40,30 |

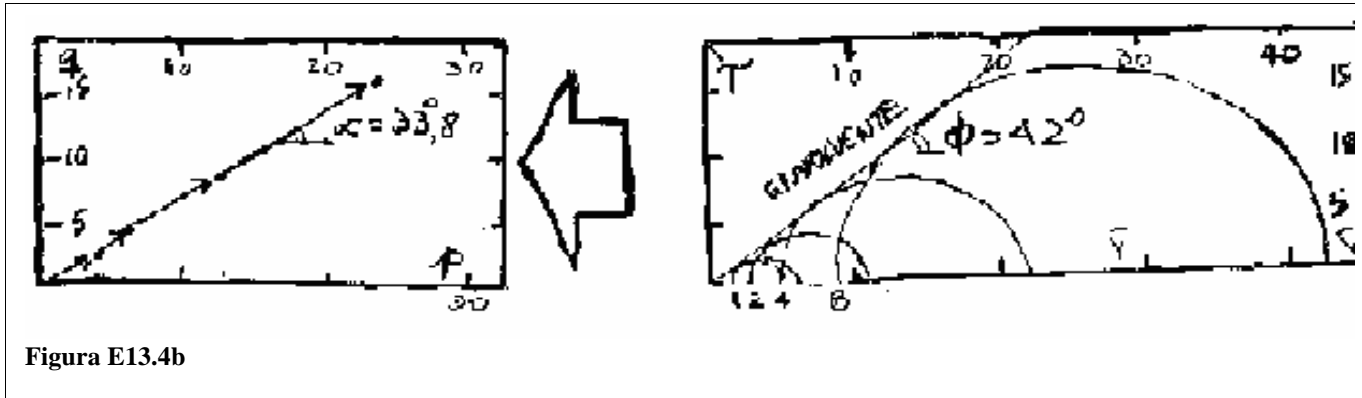


Figura E13.4b

Para p y q se aplicaron las relaciones

$$\frac{(s_1 \pm s_3)}{2}$$

Para φ y α se aplicaron las relaciones

$$f = \text{sen}^{-1} q/p \quad \text{y} \quad a = \text{tg}^{-1} q/p$$

Cálculo de θ_C:

$$\text{Promediamos } f = \frac{(f_1 + f_2 + f_3 + f_4)}{4} = 42^\circ$$

Aplicando la ecuación 12.6 de la Sección 12.6 tenemos:

$$q_C = 45^\circ + \frac{f}{2} = 45^\circ + \frac{42^\circ}{2} = 45^\circ + 21^\circ = 66^\circ$$

Ejercicio 13.5. De una trayectoria de esfuerzos, la línea Kf tiene la siguiente expresión:

$$q_f = 0,32 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} + p_f \text{tg}31^\circ \quad (13.3)$$

Obtenga la envolvente de Mohr – Coulomb y calcule el θ_C y N_φ

Solución: (El subíndice f significa en la falla)

De (1), α = 31°; a = 0,32 ⇒ aplico ecuaciones 12.12 y 12.13, Sección 12.7

$$f = \arcsen[tg a] = \arcsen[tg 31^\circ] = 36^\circ,9$$

$$C = \frac{a}{\cos f} = \frac{0,32}{\cos 36^\circ,9} = 0,40$$

$$q_c = 45^\circ + \frac{f}{2} = 45^\circ + \frac{36^\circ,9}{2} = 63^\circ,5$$

$$Nf = \frac{1 + \sen f}{1 - \sen f} = \frac{1 + tg a}{1 - tg a} = \frac{1 + tg 31^\circ}{1 - tg 31^\circ} = 4,0$$

Para resolver

Ejercicio 13.6. Dibuje la línea K_f para un suelo a partir de la falla de dos muestras expuestas en el triaxial. La primera con presión de cámara de 2 unidades y un Desviador de 6 unidades. La segunda con presión de cámara de 4 unidades y un Desviador de 8 unidades. Calcule el valor de a , de α de c y de f .

Ejercicio 13.7. Dibuje el diagrama de círculos de Mohr para esfuerzos totales y efectivos en una arcilla pura, con $U = (\sigma_3 - \sigma'_1) = 2$ unidades ; si $U > \sigma'_3$ y $\sigma_3 ? \sigma'_1 = 5$ unidades. a. Cuanto valen σ_3 y la cohesión c de la envolvente de esfuerzos. b. Ahora, si el esfuerzo menor se mantiene pero el desviador que produce la falla es de 6 unidades, obtenga la ecuación de la envolvente de falla en condiciones no drenadas.

Ejercicio 13.8. Dibuje el diagrama de círculos de Mohr para esfuerzos totales y efectivos en una arena pura, con $U = (\sigma_3 - \sigma'_1) = 1$ unidad ; si $U < \sigma'_3$ y $\sigma_3 ? \sigma'_1 = 4$ unidades. a. Cuanto valen σ_3 y la fricción de la envolvente de esfuerzos efectivos. b Ahora, si el esfuerzo menor se mantiene pero el desviador en ambos círculos es de 4 unidades, obtenga la ecuación de la envolvente de falla en condiciones drenadas y estime el incremento del ángulo de fricción a causa del drenaje..

Ejercicio 13.9. Dibuje el conjunto de Círculos de Mohr y el diagrama pq para un ensayo cuando $\sigma_1 = 8$ unidades y es constante y σ_3 va disminuyendo de una en una unidad, hasta $\sigma_3 = 3$ unidades. Cuanto vale la pendiente de la trayectoria de esfuerzos.

[Ir a la página principal](#)