

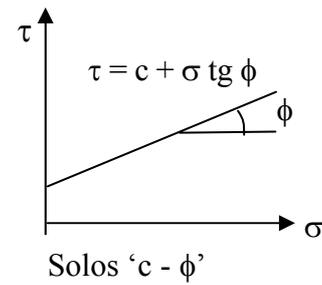
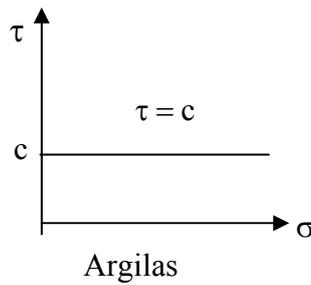
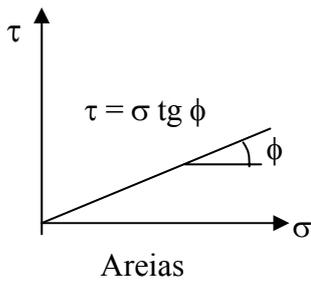
5 - PROPRIEDADES RESISTENTES DOS SOLOS

Lei de Coulomb

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \phi$$

τ - resistência ao corte
 c - coesão
 σ - tensão normal total
 ϕ - ângulo de atrito interno

Representação gráfica



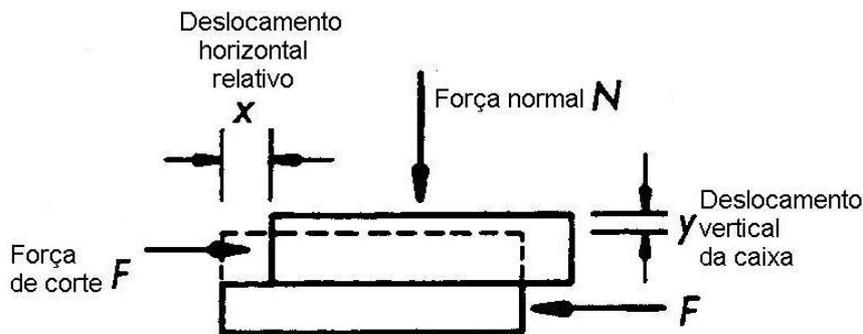
Em termos de tensões efectivas

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

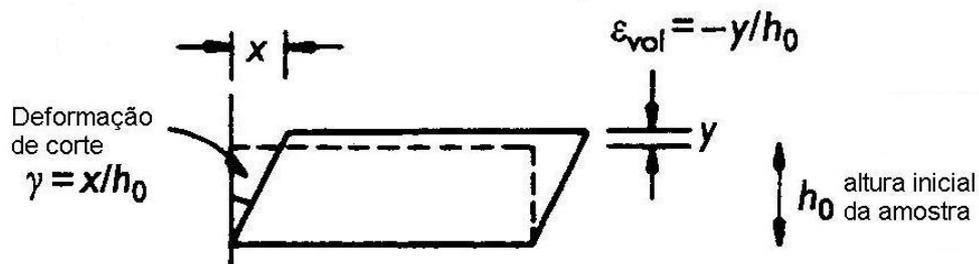
$$\tau = c' + (\sigma - u) \operatorname{tg} \phi'$$

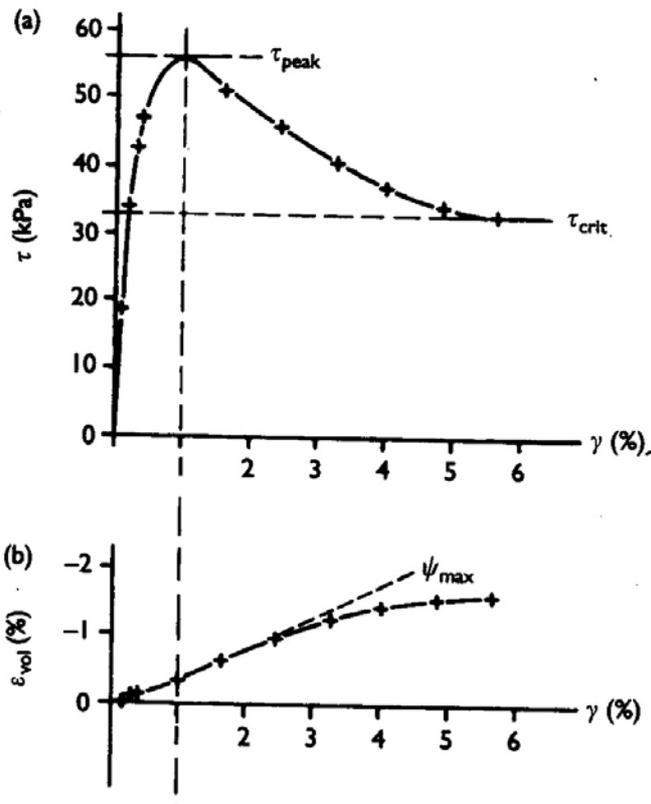
c' e ϕ' referidos à tensão efectiva

Relações tensões-deformações



Extensão vertical $\epsilon_v =$ Extensão volumétrica





Ângulos de atrito:

$$\phi'_{m\acute{a}x} = \tan^{-1}(\tau / \sigma')_{m\acute{a}x}$$

$$\phi'_{rot} = \tan^{-1}(\tau / \sigma')_{rot}$$

Dilatância:

$$\psi = \tan^{-1}(d\epsilon_{vol} / d\gamma)$$

Problemas

5.1 - Ensaio na caixa de corte, sobre areia compactada, deram os seguintes resultados, em kN/m^2 :

tensão normal	tensão tangencial máx.	τ_{rot}
35	33	29
70	58	45
105	87	67

Determine o ângulo de atrito interno da areia num estado compactado e num estado solto, por acção de corte.

5.2 - Foi realizado um aterro com uma argila, tendo as seguintes características :

$$c' = 30 \text{ kPa} \text{ e } \phi' = 26^\circ$$

O peso específico do solo do aterro é de $19,2 \text{ kN/m}^3$. Calcular a resistência ao corte do solo num plano horizontal situado à profundidade de 20 m , se a pressão intersticial nesse ponto for de 180 kPa .

$$R : \tau = 129,5 \text{ kPa}$$

5.3 - Um ensaio lento, realizado na máquina de corte directo, deu os resultados apresentados no quadro:

Deslocamento horizontal relativo x (mm)	Deslocamento vertical y (mm)	Tensão de corte (kPa)
0,00	0,000	0
0,02	0,002	19
0,04	0,008	34
0,06	0,016	43
0,08	0,026	47
0,20	0,064	56
0,32	0,128	51
0,48	0,192	46
0,64	0,256	41
0,80	0,288	37
0,96	0,320	34
1,12	0,321	33

O ensaio foi realizado sobre uma areia seca, a uma tensão normal efectiva de 50 kPa e numa amostra com as dimensões iniciais de 60mm x 60mm de área e 20mm de altura. Desenhe os gráficos:

- τ/γ , determinando o ângulo de atrito máx e o na rotura;
- ε_{vol}/γ , determinando o ângulo de dilatância.

5.4 - Para a avaliação da resistência ao corte de um estrato argiloso colheram-se 3 amostras de solo a 5 e a 10 m de profundidade para realização de ensaios de compressão simples. Com base nos resultados obtidos (ver quadro seguinte) caracterize a resistência ao corte desse solo.

Prof. (m)	Amostra	Tensão de rotura (kPa)
5	A1	104
	A2	110
	A3	108
10	A4	148
	A5	153
	A6	149

5.5 - Com base nos resultados de um ensaio de compressão triaxial consolidado drenado (CD) que se apresentam no quadro seguinte, determine as características de resistência ao corte da areia ensaiada.

Resultados obtidos na rotura (kPa)		
Provete	Pressão na câmara	Tensão de desvio
1	250	690
2	400	1163
3	650	1827

5.6 – Sobre um solo compactado foi realizado um ensaio consolidado não drenado, no aparelho de compressão triaxial, tendo sido efectuadas leituras de pressão intersticial. Os resultados do ensaio são os seguintes, em *kPa*:

	(1)	(2)
Pressão na câmara	100	400
Tensão vertical	370	1000
Pressão intersticial	25	110

Determinar a coesão e o ângulo de atrito interno, referidos a:

- tensões totais;
- tensões efectivas.

5.7 - Os resultados apresentados no quadro seguinte foram obtidos num ensaio triaxial consolidado não drenado (CU), com medição de pressões intersticiais, no qual os provetes foram consolidados anisotropicamente com $K_0 = 0,5$ e conduzidos à rotura por diminuição de σ_3 . Determine as características de resistência ao corte do solo ensaiado, em termos de tensões totais e de tensões efectivas.

Fase de consolidação		Fase de corte	
$\sigma_{câm}$ (kPa)	u_{cp} (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	u_{medido} (kPa)
500	200	470	95
700	200	780	30
1000	250	1170	-5

5.8 - Num ensaio não drenado triaxial, medimos os valores de pressão intersticial. A amostra do material era compactada e os resultados são os seguintes, em *kPa*:

tensão lateral, σ_3	150	450
tensão vertical total, σ_1	400	1000
pressão intersticial, u	+30	+125

Determinar a coesão e o ângulo de atrito interno do solo da amostra:

- referidos à tensão total;
- referidos à tensão efectiva.

$$R : \begin{array}{l} \text{a) } c_u = 36 \text{ kPa} \quad \text{e} \quad \phi_u = 20^\circ \\ \text{b) } c' = 24 \text{ kPa} \quad \text{e} \quad \phi' = 25^\circ \end{array}$$

5.9 - Um solo coerente tem um ângulo de atrito interno $\phi_{cu} = 15^\circ$ e uma coesão de 35 kPa . Se um provete deste solo for sujeito ao ensaio triaxial, por aumento de σ_1 , determine o valor da pressão da câmara necessária para que a rotura se dê quando a tensão de compressão axial no provete for de 200 kPa .

$$R : \sigma_3 = 63 \text{ kPa}$$

Parâmetros de Skempton

$$\Delta u = B[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)]$$

em que **A** e **B** são denominados parâmetros de pressões intersticiais

Círculo de Mohr

Estado plano de tensão:

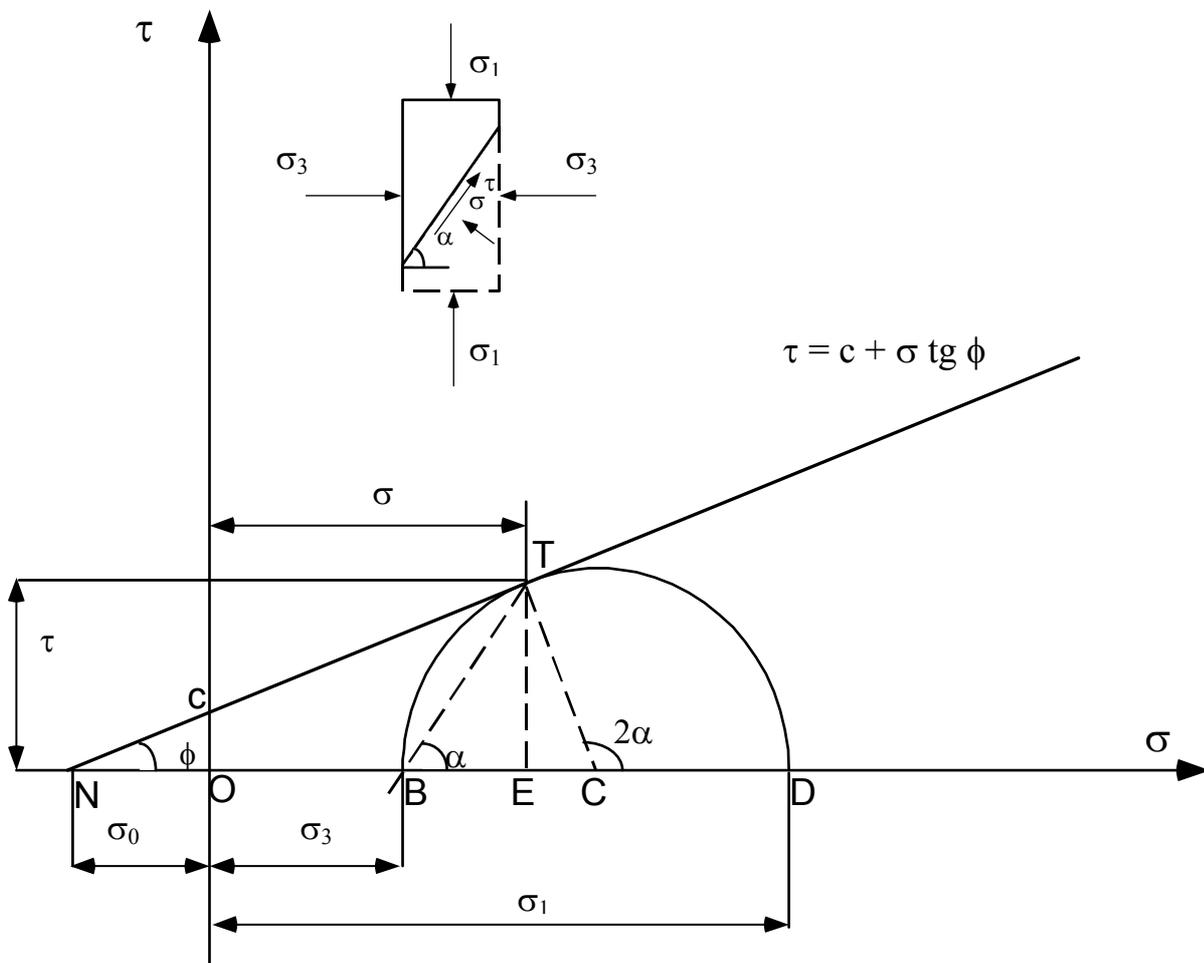
Qualquer ponto desta circunferência representa o estado de tensão num plano que faz um ângulo α com a direcção do plano onde actua a tensão principal máxima.

Convenção de sinais:

As tensões de compressão são positivas, marcando-se para a direita da origem.

As tensões tangenciais $\uparrow \downarrow$ são negativas marcando-se para baixo no eixo das ordenadas.

A inclinação α de qualquer plano, relativamente ao plano em que actua σ_1 , é marcada no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio, a partir do ponto de irradiação dos planos, no eixo das abcissas.



Tensões normal e tangencial

$$\begin{aligned} \sigma &= \overline{OC} - \overline{CE} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - r \cdot \cos(180 - \alpha) \\ &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(2\alpha) \\ &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} (1 - 2 \sin^2 \alpha) \\ &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} 2 \sin^2 \alpha \\ &= \sigma_1 - \sigma_1 \sin^2 \alpha + \sigma_3 \sin^2 \alpha = \sigma_1 (1 - \sin^2 \alpha) + \sigma_3 \sin^2 \alpha \\ &= \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \sin^2 \alpha \end{aligned}$$

$$\tau = \overline{TE} = r \sin(180 - 2\alpha) = r \sin 2\alpha = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha$$

Equação de rotura Mohr-Coulomb

$$\frac{\overline{ND}}{\overline{NB}} = \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{\sigma_0 + \sigma_3} = \frac{\overline{NC} + \overline{CD}}{\overline{NC} - \overline{CB}} = \frac{\overline{NC} + \overline{CT}}{\overline{NC} - \overline{CT}} = \frac{1+r}{1-r} = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (1)$$

mas,
$$\sigma_0 = \frac{c}{\operatorname{tg} \phi}$$

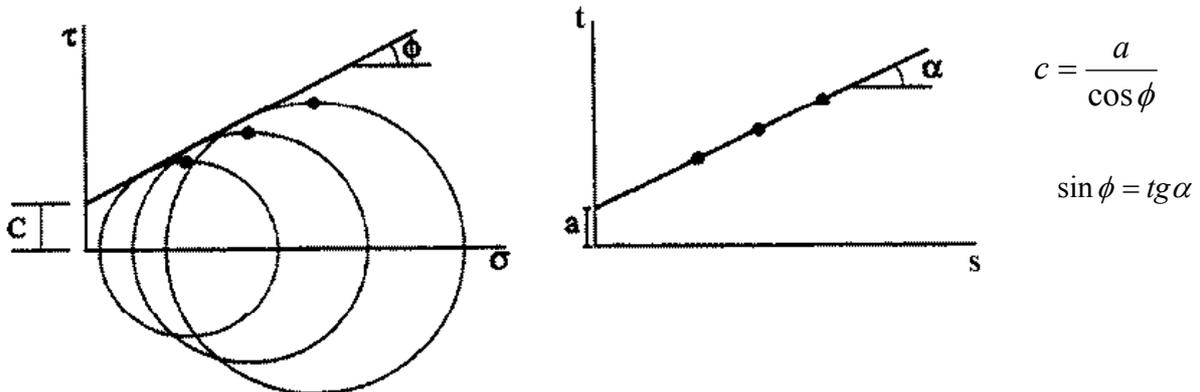
que substituindo em (1):
$$\sigma_1 = \sigma_3 \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right) + \frac{2c \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi}$$

Representação gráfica - diagrama s, t

Representa-se apenas o ponto correspondente à tensão tangencial máxima.

Assim, num estado plano de deformação, tem-se:
$$s = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad t = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

A envolvente tangente aos círculos de Mohr, na representação de Mohr, definida pelos parâmetros c e ϕ , é representada no diagrama s, t pela envolvente transformada definida pelos parâmetros a e α .



5.10 - Os resultados que a seguir se indicam foram obtidos num ensaio não drenado com amostras de uma argila numa caixa de corte:

tensão normal (<i>kPa</i>)	200	300	400
tensão tangencial (<i>kPa</i>)	113	141	167

- a) calcular o valor da coesão e do ângulo de atrito em termos de tensões totais;
 b) se uma amostra desse solo fosse sujeita a um ensaio triaxial com uma tensão lateral de 275 *kPa* encontrar a tensão normal total a que se daria a rotura.

R : a) $c_u = 60 \text{ kPa}$ e $\phi_u = 15^\circ$
 b) $\sigma_1 = 623 \text{ kPa}$

5.11 - Um dado solo rompeu sob a tensão principal máxima de 288 *kPa* e a correspondente tensão mínima de 100 *kPa*. Se, para o mesmo solo, a tensão principal mínima tivesse sido de 200 *kPa* determinar a tensão principal máxima na rotura sendo

- a) $\phi = 0^\circ$
 b) $c = 0$

R : a) $\sigma_1 = 388 \text{ kPa}$
 b) $\sigma_1 = 580 \text{ kPa}$

5.12 - O quadro contém valores obtidos num ensaio consolidado-não drenado sobre uma argila branda. Determine os parâmetros de resistência ao corte, em termos de tensões efectivas.

Um provete diferente do mesmo solo é ensaiado numa câmara triaxial (ensaio consolidado não drenado) com $\sigma_3 = 150 \text{ kPa}$ e rompe quando a tensão de desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$) é 75 *kPa*. Calcular a pressão intersticial da amostra na rotura.

Tensão lateral durante a consolidação e o corte (<i>kPa</i>)	Rotura	
	$(\sigma_1 - \sigma_3)$ (<i>kPa</i>)	<i>u</i> (<i>kPa</i>)
200	117	110
400	242	227
800	468	455

R : $c' = 0$ $\phi' = 25^\circ$ $u = 99 \text{ kPa}$

5.13 - Os resultados que se seguem foram obtidos de uma série de ensaios triaxiais consolidados não drenados em amostras intactas dum solo:

Tensão lateral (<i>kPa</i>)	Carga adicional na rotura (<i>N</i>)
200	342
400	388
600	465

Cada amostra, que tinha originalmente 76 mm de altura e 38 mm de diâmetro, experimentou uma deformação na vertical de 5,1 mm.

Desenhe a recta de Coulomb em termos de tensões totais e escreva a sua equação.

$$R : C_{cu} = 100 \text{ kPa} \quad e \quad \phi_{cu} = 7^\circ$$

5.14 – Os resultados apresentados no quadro referem-se a um ensaio triaxial consolidado não drenado sobre uma amostra de argila saturada, sob uma pressão na câmara de 300 kPa. Desenhe os gráficos de variação:

a) $\sigma_1 - \sigma_3 / \epsilon_a$;

b) parâmetro A/ϵ_a

em que $\epsilon_a = \Delta l / l_0$;

$\Delta l / l_0$	0	0,01	0,02	0,04	0,08	0,12
$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	0	138	240	312	368	410
u (kPa)	0	108	158	178	182	172

5.15 -Num ensaio triaxial, com simetria axial, um provete foi consolidado sob uma tensão de confinamento de 800 kPa e sob uma contrapressão de 400 kPa. Em seguida, sob condições não drenadas, a pressão de confinamento na câmara foi subida para 900 kPa e a pressão intersticial da água subiu para 498 kPa.

Mantendo a pressão na câmara em 900 kPa, aplicou-se uma tensão axial através do êmbolo de 585 kPa de que resultou a rotura do provete com uma pressão intersticial da água de 660 kPa.

a) Calcule os parâmetros de pressões intersticiais da água A e B.

b) Um outro provete foi consolidado sob uma pressão de confinamento de 1270 kPa e sob a mesma contrapressão de 400 kPa. Em seguida, sob condições não drenadas, a pressão de confinamento foi subida para 1370 kPa, tendo a pressão intersticial da água subido para 497 kPa. Para obter a rotura, em condições não drenadas, reduziu-se a pressão na câmara de 1370 kPa para 567 kPa, aplicando-se simultaneamente através do êmbolo uma tensão axial de 803 kPa. Na rotura registou-se uma leitura da pressão intersticial de 232 kPa. Calcule os parâmetros de pressões intersticiais da água A e B.

c) Sabendo de outros ensaios sobre o mesmo solo que este não exhibe coesão, calcule os valores dos ângulos de atrito interno em termos de tensões efectivas.

d) Trace as envolventes de Mohr, em termos de tensões totais e efectivas, admitindo $c=c'=0$.

e) Comente os resultados obtidos, referindo em especial se são compatíveis e porquê.