

O nível d'água encontra-se a 10 m de profundidade num maciço de solo arenoso de superfície horizontal, peso específico natural $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$. A envoltória de resistência desse solo é dada por $s = \sigma' \text{ tg } \phi'$, seu ângulo de atrito é $\phi' = 30^\circ$ e não há evidência de pré-compressão (ou sobre-adensamento).

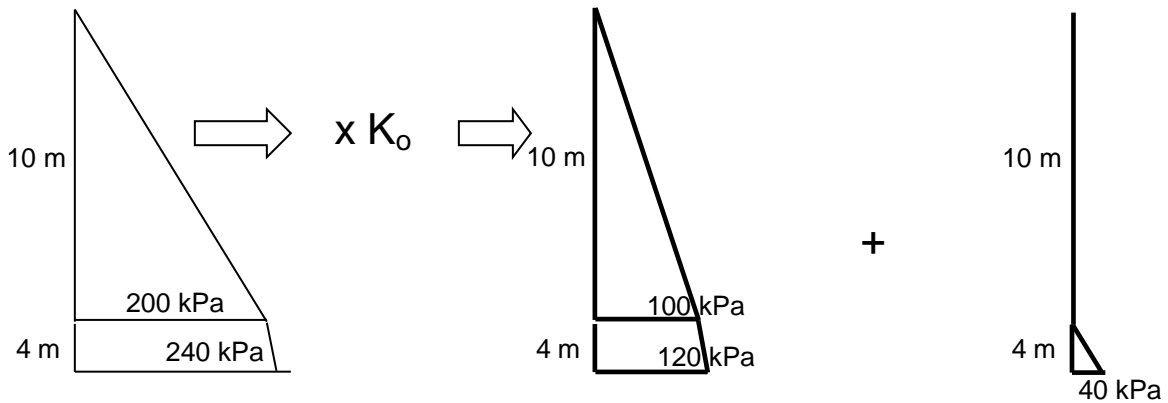
1) Recordando as aulas de PEF3305, estimar o coeficiente de empuxo em repouso, K_0 , e esboçar o diagrama de empuxo em repouso até a profundidade de 14 m.

Sem pré-compressão ou sobre-adensamento, vale aproximadamente...

Jaky: $K_0 = 1 - \text{sen } \phi' = 1 - 0,5 = 0,5$

Expressões que levam em conta OCR do solo: cap. 12 CSP.

Tensões verticais efetivas \Rightarrow Empuxo em repouso (de solo) + Empuxo de água



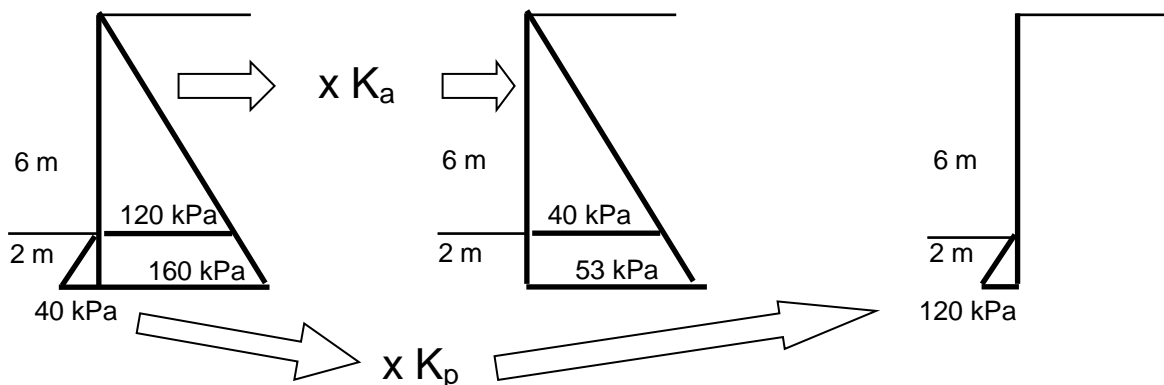
Imagine uma escavação muito longa de 6 m de altura, suportada por um muro de arrimo cujas fundações estão 2 m abaixo do fundo da escavação (isto é, 8 m abaixo da superfície original do terreno).

2) Ainda recordando as aulas de PEF3305, utilize o processo de Rankine (vide, por exemplo, Braja Das, itens 13.1 a 13.9) para calcular o empuxo ativo sobre o muro e o empuxo passivo disponível à frente da ficha (os 2 m abaixo do fundo da escavação). Esboce os respectivos diagramas. Lembre-se de que o processo de Rankine pressupõe a inexistência de atrito solo-muro.

Sem atrito ($\delta' = 0^\circ$) significa que não há atrito mesmo (raro) OU muro e terrapleno deslocam-se juntos. Nessas condições, para o ativo pode-se utilizar Rankine. Para o passivo, discutível (vamos utilizar, mas somente neste exercício).

$\phi' = 30^\circ \Rightarrow K_a = 0,33$ e $K_p = 3$

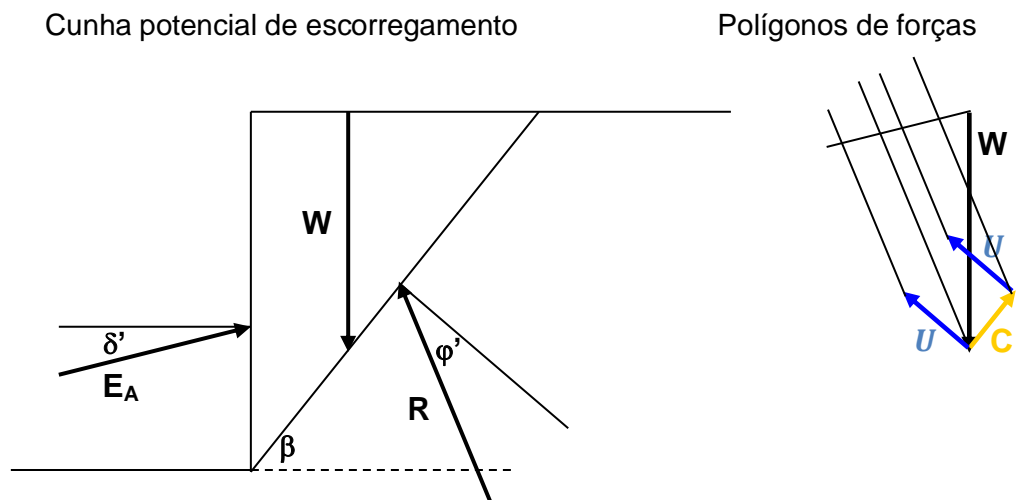
Tensões verticais efetivas Empuxo ativo (de solo) Empuxo passivo (de solo)



Para levar em conta o atrito solo-muro há um outro processo, denominado processo de **Coulomb**, baseado em **equilíbrio limite** (tal como os processos de análise de estabilidade de taludes): postula-se uma superfície de ruptura plana, resistência plenamente mobilizada ($F=1$) nessa superfície e no contato muro-solo, e as equações de equilíbrio permitem calcular a força de empuxo (vide, por exemplo, Braja Das, itens 13.10 a 13.15).

3) Recalcule o **empuxo ativo** do exercício 2 considerando um ângulo de atrito $\delta' = 20^\circ$ entre o solo e a face do muro. (Obs.: há, na literatura, tabelas que permitem calcular esse empuxo ativo a partir de um coeficiente de empuxo ativo, K_A , que é função de ϕ' e de δ'). Para $\delta' = 20^\circ$ e também para $\delta' = 0^\circ$, compare os valores de empuxo ativo obtidos pelo processo de Coulomb com aqueles do exercício 2, obtidos pelo processo de Rankine.

Empuxo **ativo com atrito** solo-muro: processo de **Coulomb** (superfície de ruptura ~ **plana**).



Na figura está indicada uma possível cunha de ruptura inclinada de β em relação à horizontal. As expressões do processo de Coulomb (págs. 379 a 384 do Braja Das) derivam da determinação da superfície crítica (caracterizada por β_c), para a qual E_A atinge valor máximo. O polígono de forças representa o equilíbrio de forças na cunha: a direção de todas as forças é conhecida, mas duas delas (R e E_A) têm módulos desconhecidos, que podem no entanto ser determinados pelo fechamento do polígono (equilíbrio de forças).

Exercício importante: identifique, na figura à esquerda, as direções correspondentes às diversas forças dos polígonos da direita e, nesses polígonos, os módulos de E_A para quatro situações distintas: sem coesão e sem pressão neutra, só com coesão, só com pressão neutra (de rede de fluxo, por exemplo), com coesão e pressão neutra. Analise os efeitos da coesão e das pressões neutras no empuxo.

	$\delta' (^\circ)$					
$\phi' (^\circ)$	0	5	10	15	20	25
28	0,3610	0,3448	0,3330	0,3251	0,3203	0,3186
30	0,3333	0,3189	0,3085	0,3014	0,2973	0,2959
32	0,3073	0,2945	0,2852	0,2791	0,2755	0,2745
34	0,2827	0,2714	0,2633	0,2579	0,2549	0,2542
36	0,2596	0,2497	0,2426	0,2379	0,2354	0,2350
38	0,2379	0,2292	0,2230	0,2190	0,2169	0,2167
40	0,2174	0,2098	0,2045	0,2011	0,1994	0,1995
42	0,1982	0,1916	0,1870	0,1841	0,1828	0,1831

Coulomb vai levar a $K_a = 0,2973$ (Braja Das, tabela 12.5). Menor que Rankine, mas não muito menor. Para $\delta' = 0^\circ$ seria obtido exatamente o mesmo resultado de Rankine ($K_a = 0,33$). **Refazer**

diagrama do ex. 2. Se a superfície do terrapleno for irregular e com sobrecargas próximas ao muro, a solução gráfica de Culmann (págs. 384 a 387 do Braja Das) pode ser a mais prática.

O processo de **Coulomb** é realista para o cálculo do **empuxo ativo**, mas a hipótese de superfície de ruptura plana foge **muito** da realidade no caso de empuxo passivo. Outros processos, sempre baseados em *equilíbrio limite*, foram propostos (vide, por exemplo, Braja Das, capítulo 14).

- 4) Recalcule também o **empuxo passivo** para $\delta' = 0^\circ$ e para $\delta' = 20^\circ$ utilizando a tabela de K_p abaixo, proposta por Shields e Tolunay, 1973 (trata-se de um refinamento da solução mais difundida, de Cacquot e Kérisel, 1948). Discuta a diferença entre os valores de empuxo passivo deste exercício e aqueles do exercício 2.

Para este caso, Coulomb levaria a $K_p = 6,105$ (Braja Das, tabela 12.8), portanto mais do que o dobro de Rankine, mas não exclusivamente por causa do atrito solo-muro. Diferenças têm a ver também com a **forma** da superfície de ruptura (**errada, para empuxo passivo, a hipótese de superfície plana do Coulomb**).

$\phi' (^\circ)$	$\delta' (^\circ)$									
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
20	2,04	2,26	2,43	2,55	2,70					
25	2,46	2,77	3,03	3,23	3,39	3,63				
30	3,00	3,43	3,80	4,13	4,40	4,64	5,03			
35	3,69	4,29	4,84	5,34	5,80	6,21	6,59	7,25		
40	4,69	5,44	6,26	7,05	7,80	8,51	9,18	9,83	11,03	
45	5,83	7,06	8,30	9,55	10,80	12,04	13,26	14,46	15,60	18,01

Empuxo passivo com atrito solo-muro: processos que levam em conta a **curvatura** da superfície de escorregamento (tipo **Cacquot-Kérisel** ou outros dele derivados; Braja Das, págs. 408 a 417). A tabela acima, baseada em superfície de ruptura curva (tipo espiral-logarítmica), leva a $K_p = 4,40$. O atrito solo-muro causa, de fato, aumento do empuxo passivo (comparar com $K_p = 3,0$ do Rankine), mas não tão significativo quanto Coulomb faria supor. **Refazer diagrama do ex. 2.** Considerando-se que o atrito depende da **tendência de movimentação relativa solo-muro**, no caso passivo o seu desenvolvimento é *mais provável* do que no caso ativo. Descubra por quê.

- 5) Suponha agora que o solo tem um pequeno intercepto de coesão $c' = 10$ kPa. Qual a profundidade da **fenda de tração**? Qual a sua influência no **empuxo ativo** (tanto Rankine quanto Coulomb)?

$$\sigma_a = \gamma z K_a - 2c' \sqrt{K_a} \quad \sigma_a = 0 \quad \Rightarrow \quad z_c = 2c' / (\gamma \sqrt{K_a})$$

$$K_a = 0,2973 \text{ (exercício 3 acima)} \quad \Rightarrow \quad z_c = 1,83 \text{ m}$$

- 6) Ainda para o caso de $c' = 10$ kPa, qual a influência no **empuxo passivo**?

$$\sigma_p = \gamma z K_p + 2c' \sqrt{K_p} \quad K_p = 4,40 \text{ (exercício 4 acima)} \quad \Rightarrow \quad 2c' \sqrt{K_p} \cong 41,95 \text{ kPa de}$$

acréscimo uniforme em todo o diagrama de empuxo passivo.

- 7) Solo argiloso, $\gamma = 18$ kN/m³, solicitação não drenada, resistência (critério de Tresca) dada por $s_u = 36$ kPa. Qual a profundidade da fenda de tração? Você faria um corte vertical extenso com essa altura? Por que? Compare com a situação de aterro sobre solo mole da Coleção 2, em que a condição não drenada era a mais crítica. Explique a diferença.

$$z_c = 2 s_u / \gamma = 4 \text{ m}$$

A curto prazo, solicitação **não drenada**, corte de 4 m seria estável (mas sem nenhuma margem de segurança). Mas com o tempo o solo aliviado pela escavação tende a absorver água, expandir, aumentando o índice de vazios e reduzindo a resistência. Para garantir a estabilidade de médio prazo é **essencial** restringir o acesso à água (drenagem superficial e impermeabilização) e proceder à escavação de forma conservadora (cachimbos). Portanto, jamais fazer corte vertical extenso com essa altura nesse material! Em aterros sobre solos moles o solo carregado tende a expulsar água, comprimir, reduzindo o índice de vazios e aumentando a resistência.