

## EMPUXOS DE TERRA

(continuação)

### 5.1.2. Solo coesivo

Neste caso, a expressão que relaciona  $\sigma_1'$  e  $\sigma_3'$  na ruptura é a expressão (10), já apresentada:

$$\sigma_1' = N_\phi \sigma_3' + 2c' \sqrt{N_\phi}$$

Será analisado a seguir cada um dos dois casos, ativo e passivo.

Caso ativo

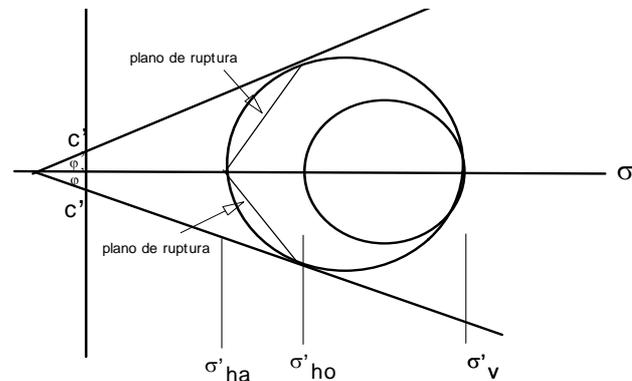


Figura 16

A figura 16 mostra os círculos de Mohr correspondentes à condição em repouso e ao estado ativo. Aplicando-se a expressão 10, tem-se

$$\gamma z = N_\phi \sigma'_{ha} + 2c' \sqrt{N_\phi}$$

$$\sigma'_{ha} = \frac{1}{N_\phi} \gamma z - \frac{2c'}{\sqrt{N_\phi}} \quad (21)$$

e

$$K_a = \frac{1}{N_\phi} - \frac{2c'}{\sigma'_v \sqrt{N_\phi}} \quad (22)$$

A figura 17 apresenta o diagrama da pressão de empuxo ativo.

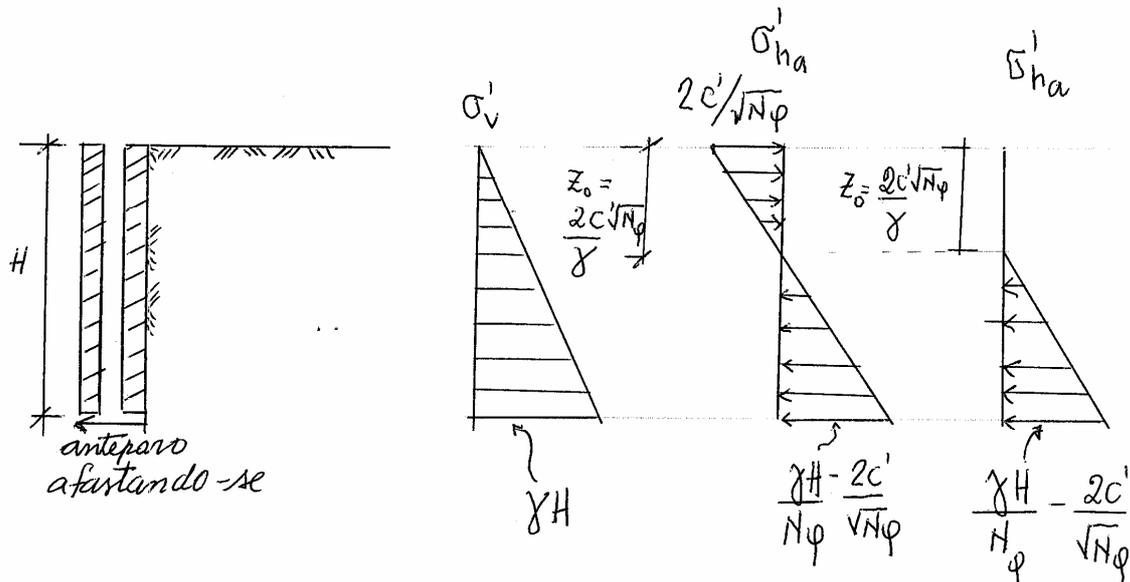


Figura 17

Em virtude do solo apresentar coesão, nem sempre é possível estabelecer uma condição de ruptura no caso ativo. Como se pode observar, os valores de empuxo obtidos até uma profundidade  $z = z_0$  precisam ser negativos para que ocorra a ruptura, mas neste caso há a tendência do solo se “descolar” do muro.

A condição de ruptura só será atingida para profundidades iguais ou maiores que  $z_0$ .

Da expressão de  $\sigma'_{ha}$  tem-se:

$$\sigma'_{ha} = \frac{1}{N_\varphi} \gamma z_0 - \frac{2c'}{\sqrt{N_\varphi}} = 0$$

donde resulta

$$z_0 = \frac{2c'}{\gamma} \sqrt{N_\phi} \quad (23)$$

A presença da coesão possibilita manter um corte vertical, sem necessidade de escoramento, até uma altura crítica na qual o empuxo resultante é nulo.

$$H_c = 2z_0 = \frac{4c'}{\gamma} \sqrt{N_\phi} \quad (24)$$

Para efeito do cálculo dos esforços no anteparo, a força de empuxo ativo é calculada não considerando a parcela negativa, como indicado na figura 17. O empuxo ativo valerá então:

$$E_a = \int_{z_0}^H \sigma'_{ha} dz = \int_{z_0}^H \left( \frac{\gamma z}{N_\phi} - \frac{2c'}{\sqrt{N_\phi}} \right) dz = \frac{1}{2} \left( \frac{\gamma H^2}{N_\phi} + \frac{4c'^2}{\gamma} - \frac{4c'H}{\sqrt{N_\phi}} \right) \quad (25)$$

Caso passivo

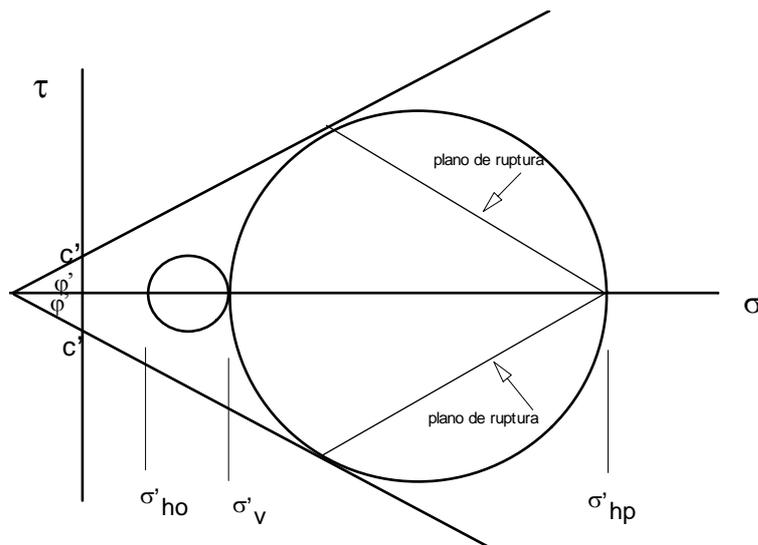


Figura 18

A figura 18 mostra os círculos de Mohr correspondentes à condição em repouso e ao estado passivo. Aplicando-se a expressão 10, tem-se:

$$\sigma'_{hp} = N_{\varphi} \gamma z + 2c' \sqrt{N_{\varphi}} \quad (26)$$

$$K_p = \frac{1}{N_{\varphi}} + \frac{2c' N_{\varphi}}{\sigma'_v} \quad (27)$$

A figura 19 apresenta o diagrama da pressão de empuxo passivo.

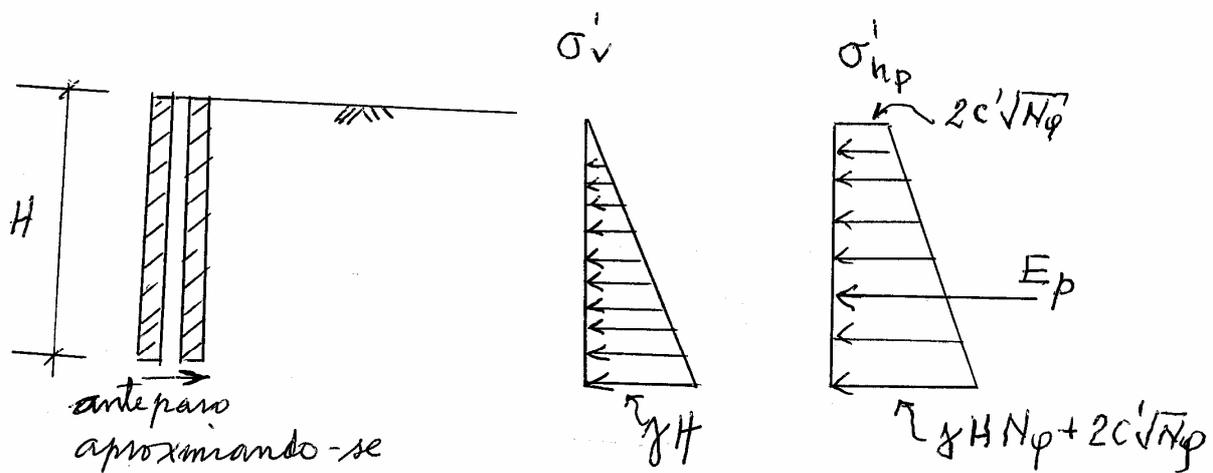


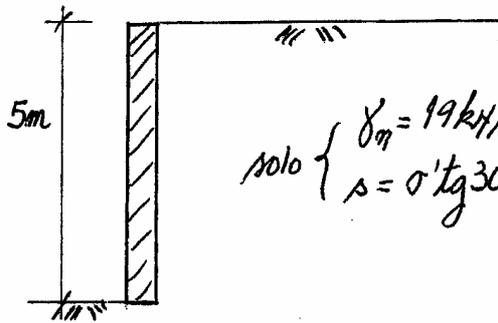
Figura 19

O empuxo passivo vale:

$$E_p = \int_0^H \sigma'_{hp} dz = \int_0^H (N_{\varphi} \gamma z + 2c' \sqrt{N_{\varphi}}) dz = \frac{1}{2} (\gamma H^2 N_{\varphi} + 4cH \sqrt{N_{\varphi}}) \quad (28)$$

### 5.1.3. Exemplos de cálculo

a) Calcular o empuxo ativo e o seu ponto de aplicação



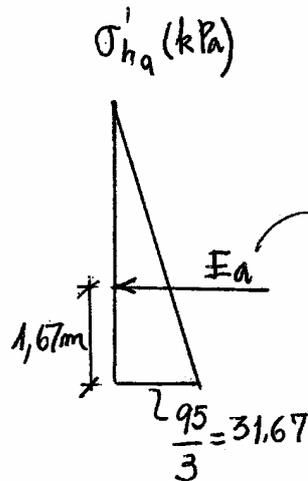
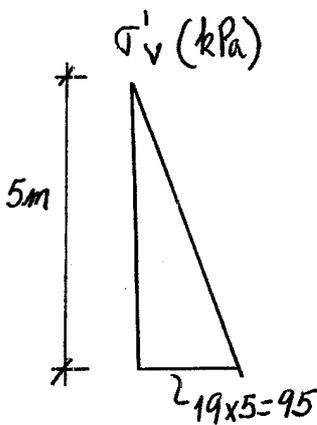
$$\text{solo} \begin{cases} \gamma_m = 19 \text{ kN/m}^3 \\ \rho = \sigma' \tan 30^\circ \end{cases}$$

$$\sigma'_{ha} = \frac{\sigma'_v}{N\varphi} - \frac{2c'}{\sqrt{N\varphi}}$$

$$N\varphi = \frac{1 + \sin \varphi'}{1 - \sin \varphi'} = \frac{1,5}{0,5} = 3$$

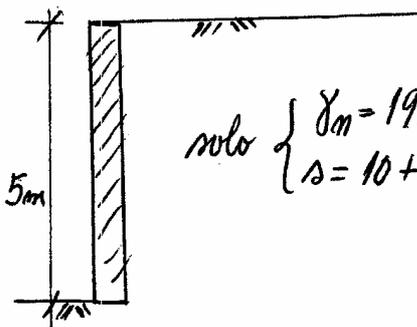
$$c' = 0$$

$$\sigma'_{ha} = \frac{\sigma'_v}{3}$$



$$E_a = \frac{31,67 \times 5}{2} = 79,17 \text{ kN/m}$$

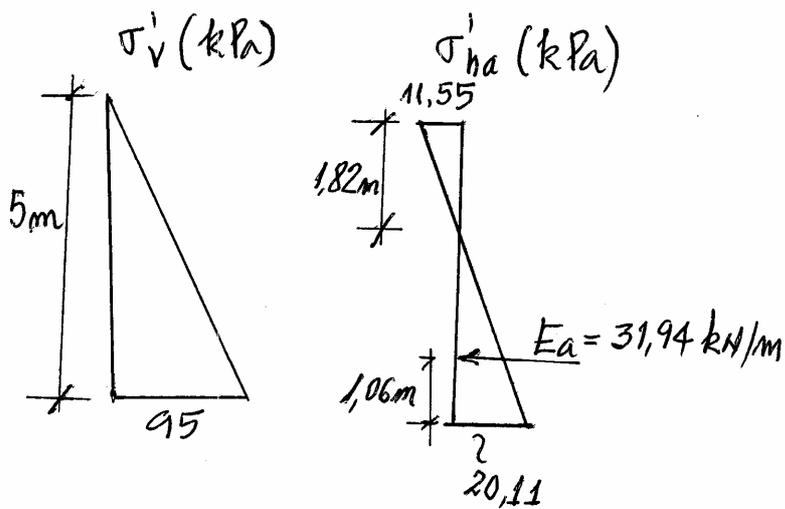
b) Idem, para:



$$\text{solo} \begin{cases} \gamma_m = 19 \text{ kN/m}^3 \\ \rho = 10 + \sigma' \tan 30^\circ \text{ (kPa)} \end{cases}$$

$$N\varphi = 3$$

$$\sigma'_{ha} = \frac{\sigma'_v}{3} - \frac{20}{\sqrt{3}} = \frac{\sigma'_v}{3} - 11,55$$

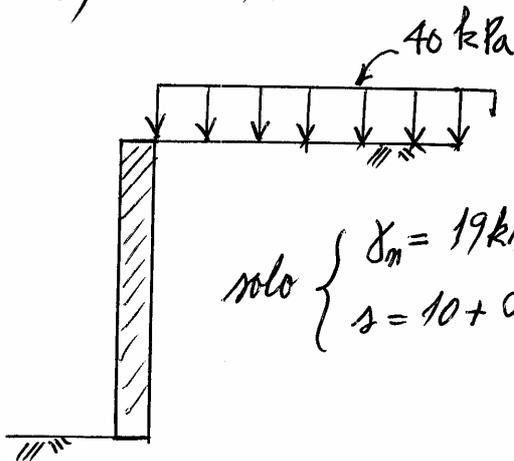


$$z_0 = \frac{2c'}{\gamma} \sqrt{N_q} = \frac{20}{19} \sqrt{3} = 1,82 \text{ m}$$

Não considerando a parcela negativa:

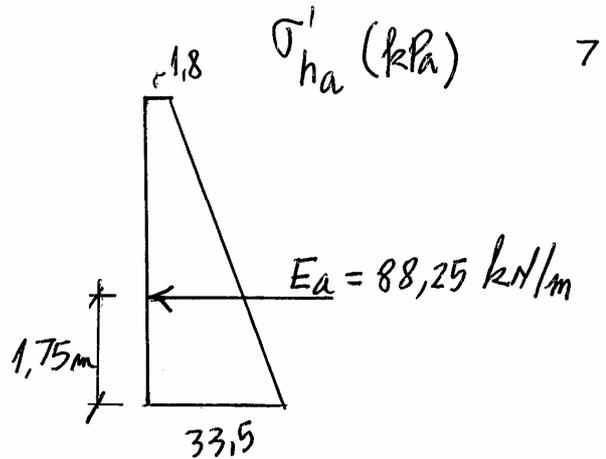
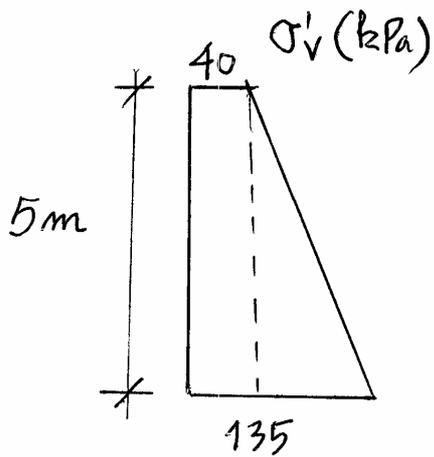
$$E_a = \frac{20,11 \times (5 - 1,82)}{2} = 31,94 \text{ kN/m}$$

c) idem, para:



$$\text{solo} \begin{cases} \gamma_m = 19 \text{ kN/m}^3 \\ \phi = 10 + \sigma'_v \text{ tg } 30^\circ \end{cases}$$

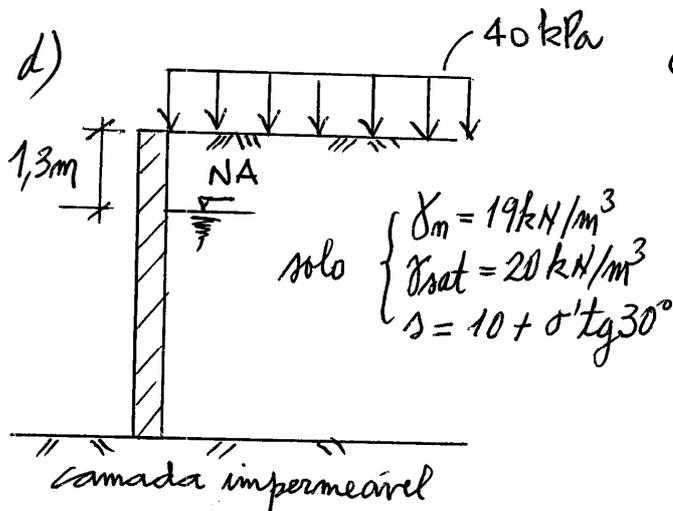
$$\sigma'_{ha} = \frac{\sigma'_v}{3} - 11,55$$



$$E_a = 1,8 \times 5 + \frac{31,7 \times 5}{2} = 9 + 79,25 = 88,25$$

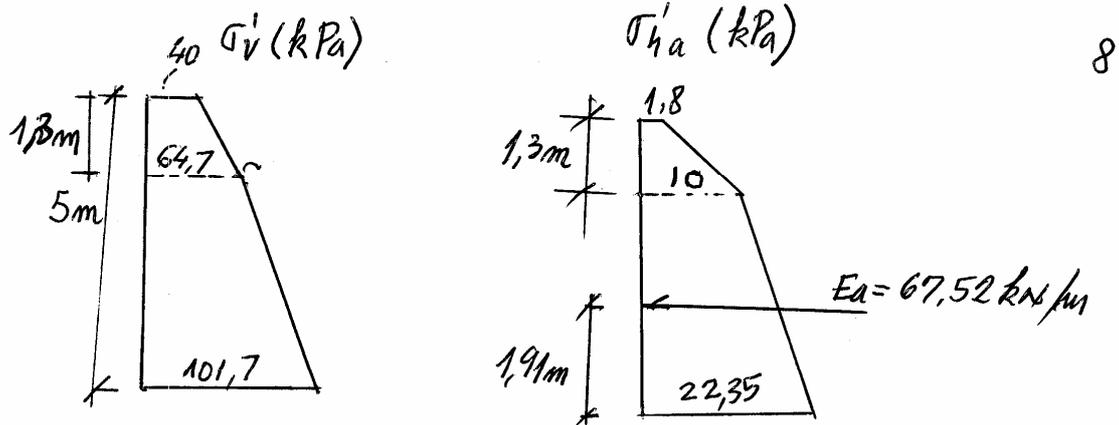
$$88,25 d = 9 \times 2,5 + 79,25 \times \frac{5}{3} = 22,5 + 132,1 = 154,6$$

$$d = \frac{154,6}{88,25} = 1,75$$



Calcular os empuxos ativos e hidrostático e seus pontos de aplicação.

$$\sigma'_{ha} = \frac{\sigma'_v}{3} - 11,55$$

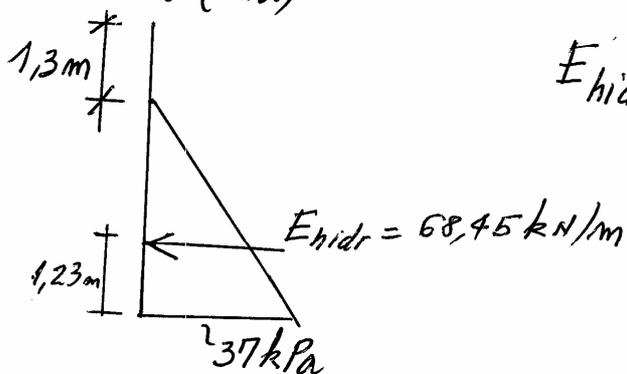


$$E_a = 10 \times 5 + \frac{8,2 \times 1,3}{2} + \frac{8,2 \times 3,7}{2} + \frac{12,35 \times 3,7}{2} = 9 + 5,33 + 30,34 + 22,85 = 67,52 \text{ kN/m}$$

$$67,52 \times d = 9,0 \times 2,5 + 5,33 \times 4,13 + 30,34 \times 1,85 + 22,85 \times 1,23$$

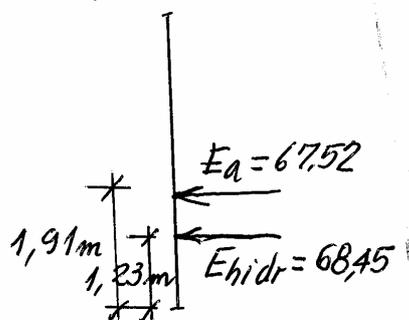
$$d = 1,91 \text{ m}$$

Empuxo hidrostático  
u (kPa)



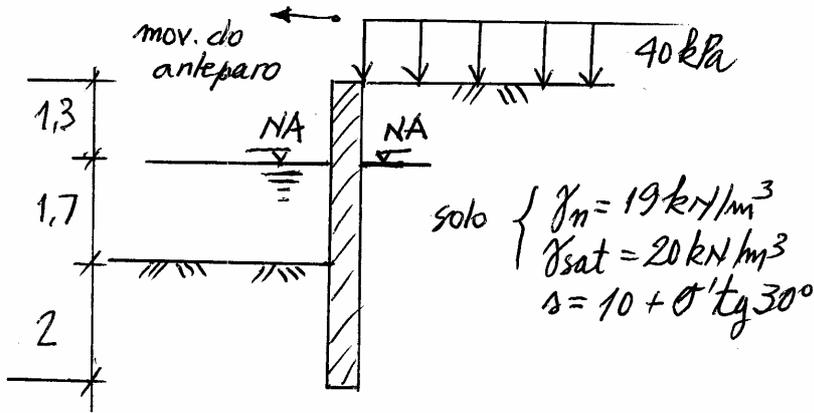
$$E_{hidr} = \frac{37 \times 3,7}{2} = 68,45 \text{ kN/m}$$

Resumo



9

e) Calcular os empuxos ativo, passivo e hidrostático

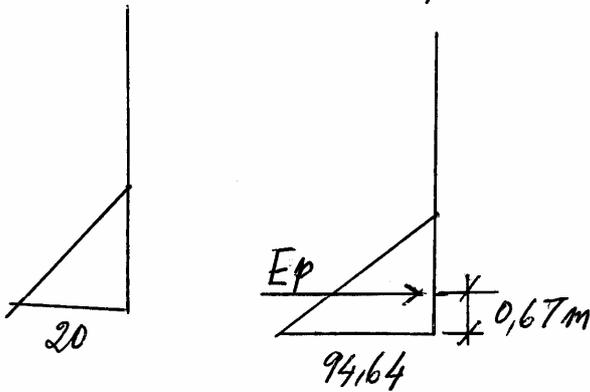


do lado direito, idem ao exercício d.

do lado esquerdo:

$$\sigma'_{hp} = \sigma'_v \cdot N_\phi + 2c' \sqrt{N_\phi} = 3 \sigma'_v + 20\sqrt{3} = 3 \sigma'_v + 34,64$$

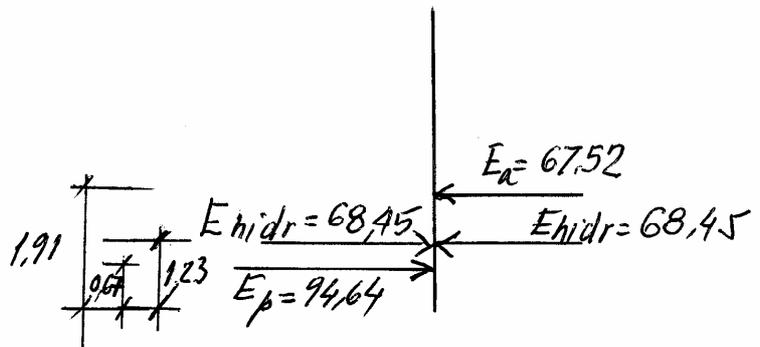
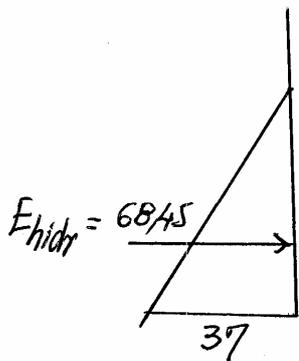
$\sigma'_v \text{ (kPa)}$                        $\sigma'_{hp}$



$$E_p = \frac{94,64 \times 2}{2} = 94,64 \text{ kN/m}$$

Empuxo hidrostático

Resumo



## 5.2. Situação Não Drenada

Os solos de baixa permeabilidade, principalmente os argilosos, podem atingir tanto o estado ativo quanto o passivo em condição não drenada.

Será analisado aqui o caso mais típico que é das argilas saturadas não drenadas.

### 5.2.1 Argilas saturadas não drenadas

Neste caso os parâmetros de resistência são  $\varphi=0$  e  $c = s_u$ .

E a expressão 10:

$$\sigma_1' = N_\varphi \sigma_3' + 2c' \sqrt{N_\varphi} \quad (10)$$

passa a ser:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + 2s_u \quad (29)$$

Caso ativo

As expressões (21) e (22) tornam-se:

$$\sigma_{ha} = \gamma z - 2s_u \quad (30)$$

$$K_a = 1 - \frac{2s_u}{\sigma_v} \quad (31)$$

Caso passivo

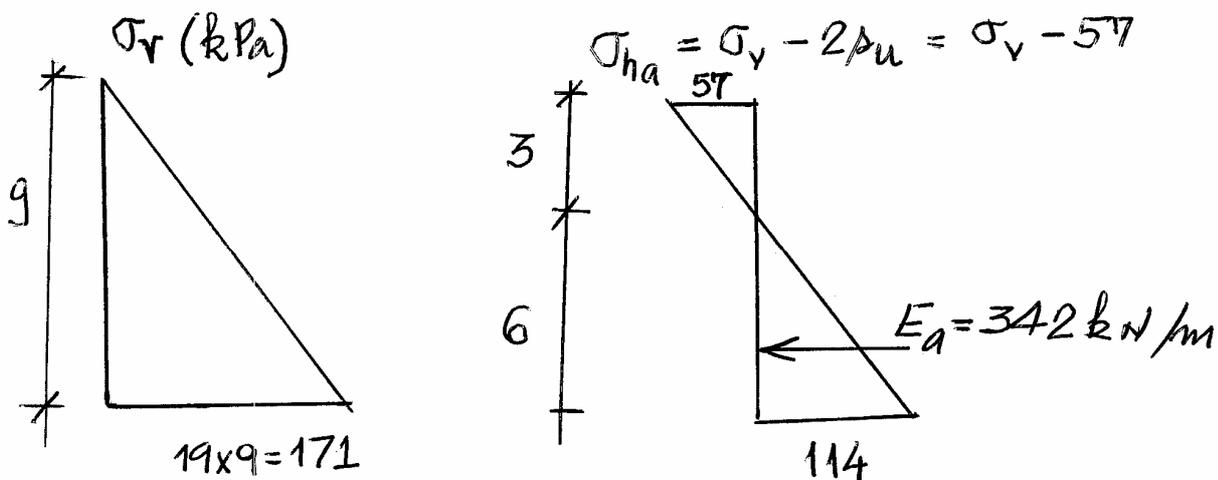
As expressões (26) e (27) resultam para este caso:

$$\sigma_{hp} = \gamma z + 2s_u \quad (32)$$

$$K_p = 1 + \frac{2s_u}{\sigma_v} \quad (33)$$

### 5.2.2. Exemplos de Cálculo

a) Um muro de arrimo com paramento interno vertical tem 9 m de altura e suporta um aterro de argila com  $\gamma_n = 19 \text{ kN/m}^3$ ,  $s_u = 28,5 \text{ kPa}$  e  $\varphi = 0$ . Encontre o empuxo sobre o muro por metro de muro.

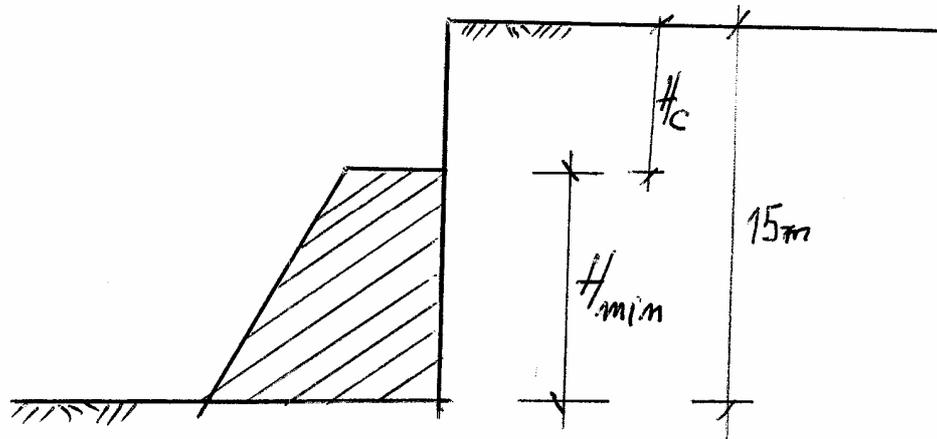


$$z_0 = \frac{2pu}{\gamma_n} = \frac{57}{19} = 3 \text{ m}$$

Não considerando a parcela negativa:

$$E_a = \frac{114 \times 6}{2} = 342 \text{ kN/m}$$

b) Pretende-se fazer um corte vertical de 15 m de altura em uma maciço argiloso (resistência não drenada de 30 kPa e peso específico natural igual a  $15 \text{ kN/m}^3$ ). Determinar qual a altura mínima que poderá ter o muro de arrimo indicado de forma que se possa deixar a parte superior do corte sem arrimo com um coeficiente de segurança igual a 2.



$$H_c = \frac{4 p_u}{\gamma_m} = \frac{4 \times 30}{15} = \frac{120}{15} = 8 \text{ m}$$

Fator de segurança igual a 2  $\rightarrow H_c = 4 \text{ m}$

$$H_{\min} = 15 - 4 = 11 \text{ m}$$