

Revisão de conceitos de mecânica dos solos

Índices Físicos dos Solos

Introdução

Como vimos, o solo é composto por partículas sólidas que apresentam vazios entre si.

Estes vazios podem estar preenchidos por água e/ou ar. Assim, temos 3 fases:

- * fase sólida – formada por partículas sólidas;
- * fase líquida – formada pela água;
- * fase gasosa – formada pelo ar (vapor, gases).

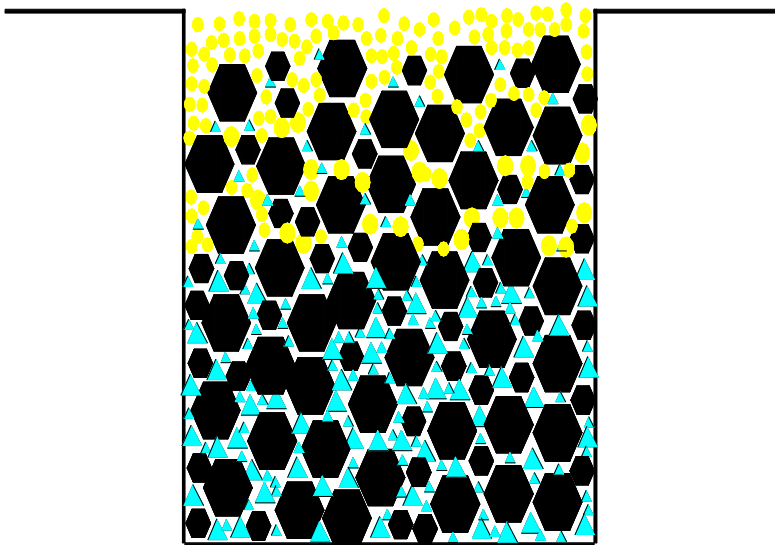


Figura I – Exemplo da composição de um solo.

O comportamento de um solo depende das quantidades relativas de cada uma das fases constituintes. Chamamos de índices físicos as relações entre as fases.

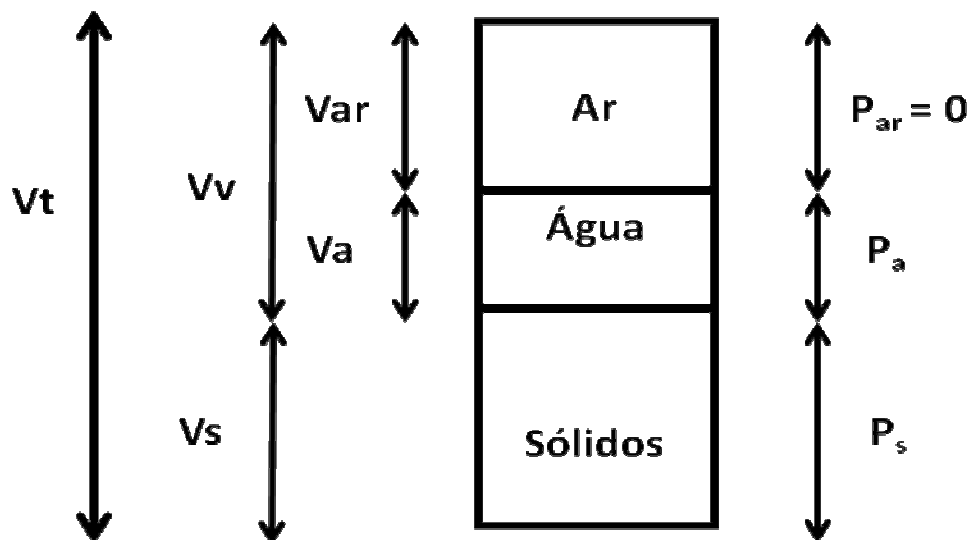


Figura II – Esquema de Volumes/Pesos

Devemos ter em mente os diversos estados que um solo pode estar sujeito, sendo afetados por fatores naturais (chuvas, insolação) ou não (compactação mecânica, cortes, aterros). Assim, por exemplo, após um período chuvoso, um determinado solo apresentará um estado em que os vazios serão preenchidos pela água, e o ar anteriormente presente será expulso. No verão, após a evaporação da água, este mesmo solo apresentará um novo estado, com o ar penetrando nos vazios deixados pela água.

Para identificar o estado em que se encontra um determinado solo, num dado momento, utilizamos os índices físicos.

Grandezas envolvidas:

As principais grandezas de um solo são:

Ps – peso das partículas sólidas;

Pa – peso da água;

* o peso do ar é considerado desprezível.

Vs – volume das partículas sólidas;

Va – volume da água;

Var – volume do ar;

Vv - volume de vazios;

Teremos sempre:

$$P_t = P_s + P_a;$$

$$V_v = V_a + V_{ar};$$

$$V_t = V_s + V_a + V_{ar} = V_s + V_v;$$

As unidades mais usuais são:

- para o peso: g; kg ; t.

- para o volume: cm³; dm³; m³.

Umidade (h%):

É a relação, expressa na forma percentual, entre o peso da água contida num certo volume de solo e o peso da parte sólida existente neste mesmo volume.

$$h\% = \frac{P_a}{P_s} \times 100$$

Para se determinar o teor de umidade de um solo, em laboratório, pesamos uma amostra do solo no seu estado natural (devemos ter o cuidado na retirada e no transporte para o laboratório de não alterarmos a umidade da amostra) e o peso após a completa secagem em estufa (T = 105 °C). Assim teremos P1 e P2.

P1 – peso da amostra natural mais o peso da embalagem (tara);

P2- peso da amostra seca mais o peso da embalagem (tara).

$$P_a = P_1 - P_2 \text{ e}$$

$$P_s = P_2 - P_{tara}.$$

Um outro meio muito simples e rápido é a utilização do aparelho Speedy. Este aparelho consiste num reservatório metálico fechado que se comunica com um manômetro destinado a medir a pressão interna. Dentro do reservatório é colocada uma quantidade determinada da amostra de solo, juntamente com uma porção determinada de carbureto de cálcio (CaC_2). A reação da água contida na amostra de solo com o carbureto, resulta em gás acetileno, de acordo com a expressão:



Assim, estabelecemos uma relação entre a variação da pressão interna no reservatório, com o teor de umidade da amostra de solo. Outro método utilizado é o chamado “método expedito do álcool”.

É grande a variação de umidade de um solo para outro, algumas argilas do México, por exemplo, apresentam umidade da ordem de 400%. A umidade é um índice muito expressivo, principalmente para os solos argilosos, que têm sua resistência dependente do teor de água presente nos mesmos.

Na natureza não existem solos com teor de umidade igual a zero. Esta condição é apenas obtida em laboratório, mesmo assim, após um determinado período exposto ao tempo, a amostra irá absorver a umidade do ar.

Peso específico aparente do solo natural (γ):

É a relação entre o peso total (P_t) e o volume total (V_t). A umidade h é diferente de zero.

$$\gamma = \frac{P_t}{V_t}$$

No campo, a determinação de γ pode ser feita entre outros métodos, pelo “processo do frasco de areia”.

A unidade padrão é o kN/m^3 , mas as mais usadas são: g/cm^3 ; kg/dm^3 ; t/m^3 .

OBS: Se o solo estiver saturado, ou seja, com todos os seus vazios preenchidos pela água, teremos o peso específico saturado γ_{sat} , se o solo, além de saturado, estiver submerso, as partículas sólidas sofrerão o empuxo da água, e o peso específico efetivo do solo será o γ_{sat} menos o γ_a . Assim, $\gamma_{\text{sub}} = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_a = \gamma_{\text{sat}} - 1$.

Peso específico aparente do solo seco (γ_s):

É a relação entre o peso das partículas sólidas (P_s) e o volume total (V_t). A umidade (h) da amostra é retirada.

$$\gamma_s = \frac{P_s}{V_t}$$

A sua determinação é feita a partir do peso específico do solo natural (γ) e da umidade (h).

A unidade padrão é o kN/m^3 , mas as mais usadas são: g/cm^3 ; kg/dm^3 ; t/m^3 .

Peso específico real ou das partículas sólidas (γ_g):

É a relação entre o peso das partículas sólidas (P_s) e o volume das partículas sólidas (V_s). Varia pouco de um solo a outro, oscilando entre 25 e 29 kN/m^3 , tendo valor menor para um solo com elevado teor de matéria orgânica, e valor maior para solo rico em óxido de ferro.

$$\gamma_g = \frac{P_s}{V_s}$$

A unidade padrão é o kN/m^3 , mas as mais usadas são: g/cm^3 ; kg/dm^3 ; t/m^3 .

Peso específico da água (γ_a):

É a relação entre o peso (P_a) e o volume da água (V_a).

$$\gamma_a = \frac{P_a}{V_a} = 1,00\text{g/cm}^3 = 1,00\text{kg/dm}^3 = 1,00\text{t/m}^3 = 10,00\text{kN/m}^3$$

Densidade relativa das partículas (δ):

É a relação entre o peso específico das partículas sólidas (γ_g) e o peso específico da água (γ_a).

$$\delta = \frac{\gamma_g}{\gamma_a} = \frac{\gamma_g}{1,0} = \gamma_g$$

É adimensional. Para a maioria dos solos varia entre 2,50 e 3,00.

Índice de vazios (ϵ):

É a relação entre o volume de vazios (V_v) e o volume das partículas sólidas (V_s).

$$\epsilon = \frac{V_v}{V_s}$$

É adimensional e expresso em percentagem.

Porosidade (η):

É a relação entre o volume de vazios (V_v) e o volume total (V_t).

$$\eta = \frac{V_v}{V_t}$$

É adimensional e expresso em percentagem.

Grau de saturação (S%):

É a percentagem de água que preenche os vazios do solo.

$$S\% = \frac{V_a}{V_v} \times 100$$

Relação entre os índices:

$$\text{I - } \gamma_s = \frac{\gamma}{(1+h\%)};$$

$$\text{II - } \eta = \frac{\epsilon}{(1+\epsilon)};$$

$$\text{III - } \epsilon = \frac{\gamma_g}{\gamma_s} - 1;$$

$$\text{IV - } h = \frac{S \times \epsilon}{\delta};$$

$$\text{V - } \gamma = \frac{(1+h)}{(1+\epsilon)} \times \gamma_g;$$

$$\text{VI - } \gamma = \frac{(\delta + S \times \epsilon)}{(1+\epsilon)};$$

EXERCÍCIOS:

1) Uma amostra de um solo pesa 22 kg. O volume correspondente a esta amostra é 12,20 litros. Desta amostra subtrai-se uma parte, para a qual determina-se: $P_t = 70\text{g}$; $P_s = 58\text{g}$; $\gamma_g = 2,67 \text{ g/cm}^3$. Pede-se determinar:

- a) $h\%$;
- b) P_s da amostra maior;
- c) P_a ;
- d) V_s ;
- e) V_v ;
- f) ϵ ;
- g) η ;
- h) γ ;
- i) γ_s da amostra maior;
- j) $S\%$;
- k) $h_{\text{sat}}\%$ (ou seja $h\%$ para quando tivermos $S\%=100\%$);
- l) γ_{sat} (ou seja γ para $S\%=100\%$).

2) O peso total de uma amostra saturada ($V_a = V_v$) é 805 g. O volume correspondente é 500 cm^3 . Esta amostra depois de seca passou a pesar 720 g. Pede-se calcular:

- a) $h\%$;
- b) P_s ;
- c) P_a ;
- d) V_s ;
- e) V_v ;
- f) ϵ ;
- g) η ;
- h) γ ;
- i) γ_s ;
- j) $S\%$;

3) Uma determinada amostra de solo tem peso específico aparente de $1,8\text{g/cm}^3$ e teor de umidade de 30%. Qual o peso específico aparente seco?

4) Uma determinada amostra de um solo tem peso específico aparente seco de $1,7\text{g/cm}^3$ e teor de umidade de 23%. Qual o peso específico aparente?

5) Demonstre matematicamente as seguintes relações:

$$\gamma_s = \frac{\gamma}{(1+h\%)}; \eta = \frac{\varepsilon}{(1+\varepsilon)}; \varepsilon = \frac{\gamma_g}{\gamma_s} - 1; h = \frac{S \times \varepsilon}{\delta}; \gamma = \frac{(1+h)}{(1+\varepsilon)} \times \gamma_g;$$

6) Uma determinada amostra de um solo tem peso específico aparente de $1,8\text{g/cm}^3$ e peso específico aparente seco de $1,6\text{g/cm}^3$. Qual o teor de umidade da amostra?

8) Um solo saturado tem teor de umidade igual a 42% e densidade de 2,68. Calcular:

- a) ε ;
- b) η ;
- c) γ ;
- d) quantidade de água por m^3 de solo.

8) O peso específico de um solo no estado natural é $1,8\text{g/cm}^3$, o teor de umidade é de 25% e a densidade relativa das partículas sólidas é 2,65. Determinar:

- a) γ ;
- b) γ_s ;
- c) γ_g ;
- d) ε ;
- e) η ;
- f) S;
- g) Qual deve ser a quantidade de água, que deve chover, por m^3 de solo, para que se obtenha a saturação do solo?

h) Qual será o peso da parte sólida de uma amostra que tem peso total = 3,5t?

9) O peso específico de um solo é $1,75\text{g/cm}^3$ e seu teor de umidade é de 6%. Qual a quantidade de água a ser adicionada, por m^3 de solo, para que o teor de umidade passe a 13%?

10) Do corte feito no terreno do novo Hospital de Palmas, foram retirados $17.000,00\text{ m}^3$ de solo, com índice de vazios igual a 1,25. Quantos m^3 de aterro com 0,85 de índice de vazios poderão ser adicionados a um terreno defronte ao terreno do Hospital?

11) Calcular o volume da escavação feito em um poço cilíndrico, com raio de base de 0,60 m e altura de 40m, sabendo-se que o índice de vazios do solo, após a escavação, aumentou 30%

12) O teor de umidade de uma amostra é de 25%, o peso inicial da amostra é de 300 g. Qual a quantidade de água existente na amostra?

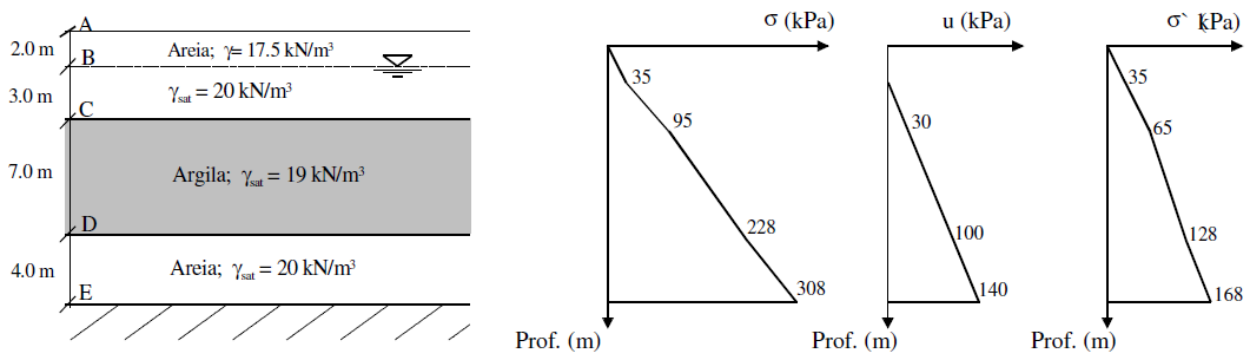
13) O peso de uma amostra de solo saturado é de 870g. O volume correspondente é de 520 cm^3 . Sendo o índice de vazios igual a 65%, determinar o peso específico real do solo?

14) Uma amostra de solo úmido pesa 920 g, com o teor de umidade de 30%. Que quantidade de água é necessária acrescentar nessa amostra, para que o teor de umidade passe para 35%?

Empuxo de terra

Por que estudar Distribuição das Pressões no solo?

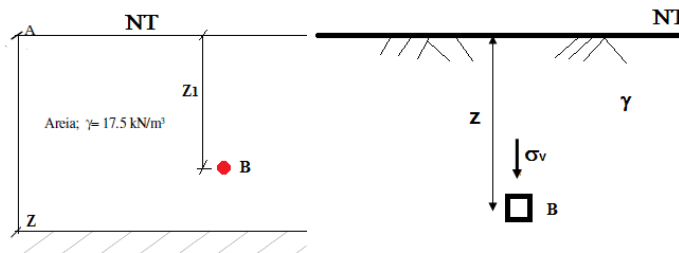
Em muitos problemas de engenharia, tais como: Recalque, empuxo de terra e capacidade de carga dos solos, é de grande importância o conhecimento da distribuição de pressões (ou tensões) nas várias profundidades abaixo da superfície do terreno. Tais conhecimentos evitam acidentes na sua maioria das vezes fatais.



Tensões Iniciais nos Solos

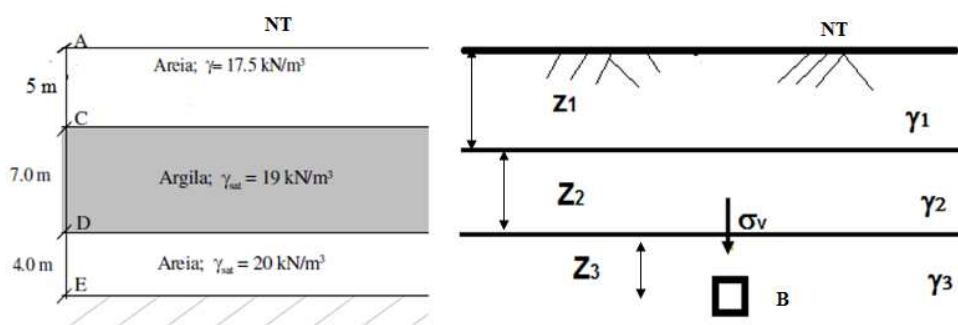
O ponto **B** está na profundidade **z**, onde se deseja a tensão normal vertical inicial **sv**. O valor de **sv** pode ser obtido multiplicando o peso específico do solo pela profundidade em que se encontra o ponto em questão, no caso deste exemplo o Ponto **B**, ou seja:

$$\sigma_v = \gamma \cdot z$$



Por outro lado se o solo acima do ponto B for estratificado, isto é, composto por n camadas de solos, o valor de σ_v é dado pelo somatório de $\gamma_i \cdot z_i$, ($i = 1, n$), ou seja:

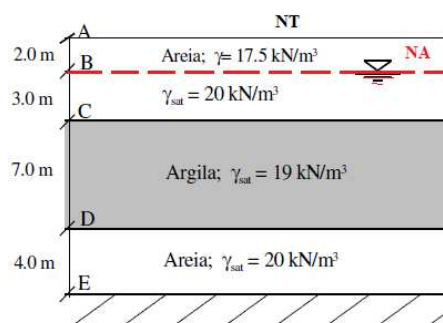
$$\sigma_v = \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot z_i$$



Água no Solo

A presença de água no solo faz com que apareça uma pressão a mais que deve ser considerada nos cálculos das pressões verticais atuantes no solo em questão, conhecida como pressão neutra ou poropressão. E dada pela equação abaixo:

$$u = \gamma_w \cdot z_w$$

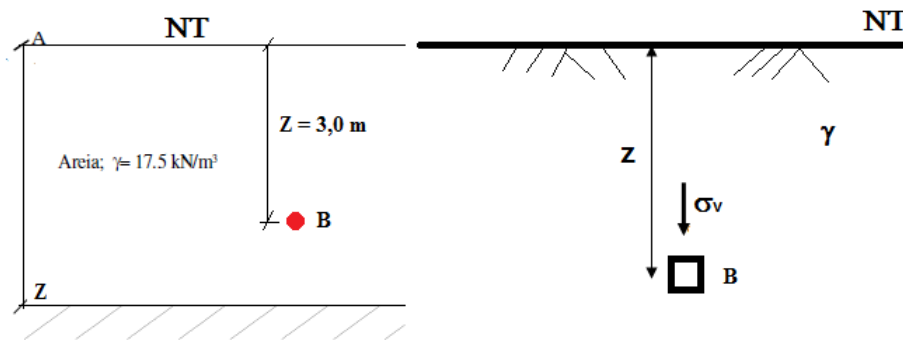


Pressões verticais totais

Com o que foi visto anteriormente, é fácil concluir que:

As tensões totais, em um ponto qualquer, em solos secos são dadas por:

$$\sigma_v = \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot z_i; \text{ ou } \sigma_v = \gamma \cdot z$$

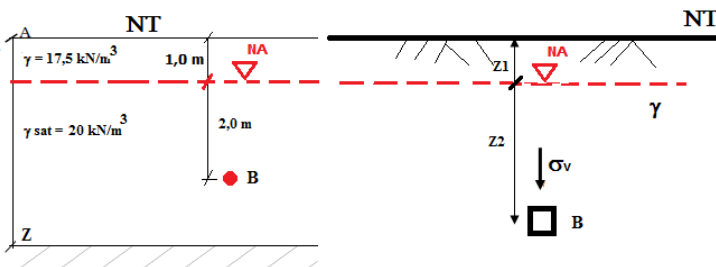


$$\begin{aligned} \sigma_v &= \gamma \cdot z \\ \sigma_v &= 17,5 \cdot 3,0 \\ \sigma_v &= 52,5 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Pressões verticais totais

Se o solo apresentar água, basta considerar separadamente as camadas abaixo e acima do nível de água:

$$\sigma_v = \gamma_1 \cdot z_1 + \gamma_{sat} \cdot z_2$$

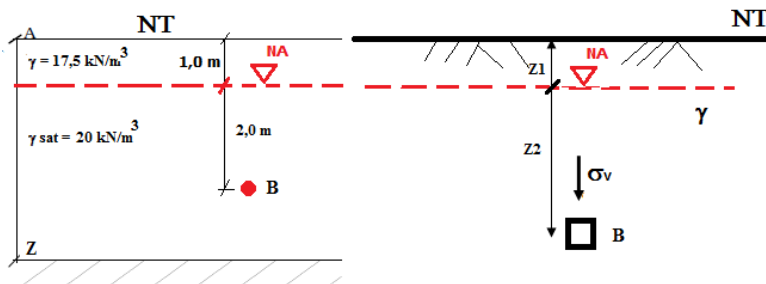


$$\begin{aligned} \sigma_v &= \gamma_1 \cdot z_1 + \gamma_{sat} \cdot z_2 \\ \sigma_v &= 17,5 \cdot 1,0 + 20 \cdot 2,0 \\ \sigma_v &= 57,5 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Princípio da pressão vertical efetiva

Esse princípio vem de que o comportamento dos solos saturados quanto à compressibilidade e à resistência ao cisalhamento depende fundamentalmente da pressão média intergranular, ou seja, da pressão efetiva. Esse conceito é representado matematicamente por:

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



$$u = 10 \cdot 2$$

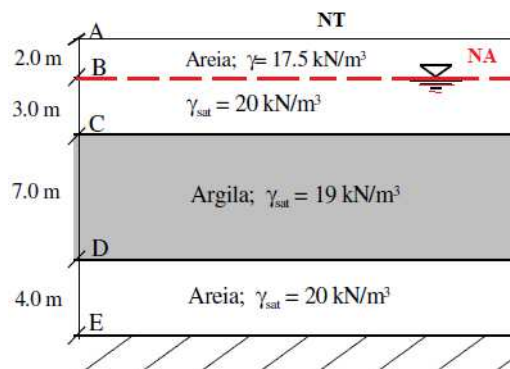
$$u = 20 \text{ kPa}$$

$$\sigma' = 57,5 - 20$$

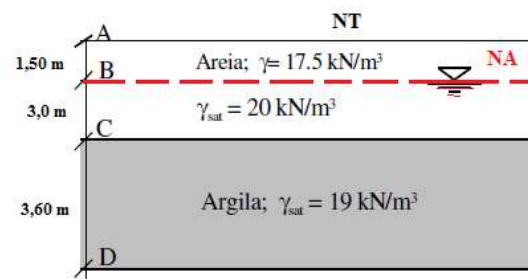
$$\sigma' = 37,5 \text{ kPa}$$

■ Exercícios

1 – Calcular e desenhar os diagramas das pressões verticais atuantes no pontos A, B, C, D e E do perfil de solo abaixo.



2 – Calcular e desenhar os diagramas das pressões verticais atuantes no pontos A, B, C e D do perfil de solo abaixo.



Empuxo do Solo

Definição de Empuxo

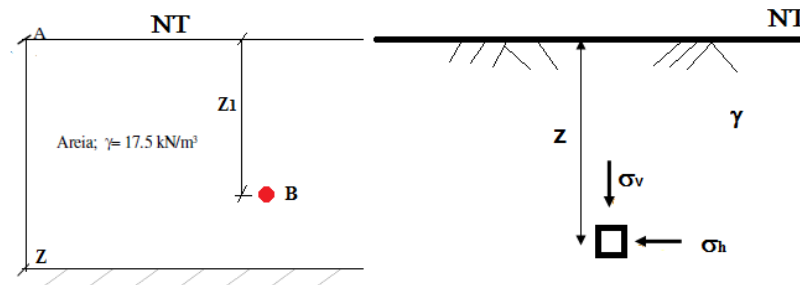
Entende-se por empuxo de terra a ação horizontal produzida por um maciço de solo sobre as obras com ele em contato.

A determinação do valor do empuxo de terra é fundamental para a análise e o projeto de obras como muros de arrimo, cortinas de estacas-prancha, construção de subsolos, encontro de pontes, etc. O valor do empuxo de terra, assim como a distribuição de tensões ao longo do elemento de contenção, depende da interação solo-elemento estrutural durante todas as fases da obra.

Tensões Horizontais – Empuxo no Repouso

Até agora foram vistas as tensões verticais iniciais, porém não é suficiente para se analisar a tensão total que sofre um ponto qualquer no solo, pois em uma análise bidimensional se faz necessário o conhecimento das tensões horizontais. A tensão horizontal é definida pelo coeficiente **K0**, que representa o coeficiente de empuxo no

repouso, pois se trata de uma relação entre tensões efetivas iniciais e tensões horizontais, este coeficiente é determinado por ensaios.



■ Coeficiente de Empuxo no Repouso – K_0

- Areia no estado **Natural**

$$K_0 = \frac{\sigma'_{h0}}{\sigma'_{v0}}$$

$$K_0 = 1 - \text{sen}\phi$$

$$\sigma_{h0} = \underbrace{K_0 \cdot \sigma'_{v0}}_{\sigma_{h0}} + u$$

- Areia no estado **Compactado**

$$K_0 = (1 - \text{sen}\phi) + \left[\frac{\gamma_d}{\gamma_{d(\text{min})}} - 1 \right] \cdot 5,5$$

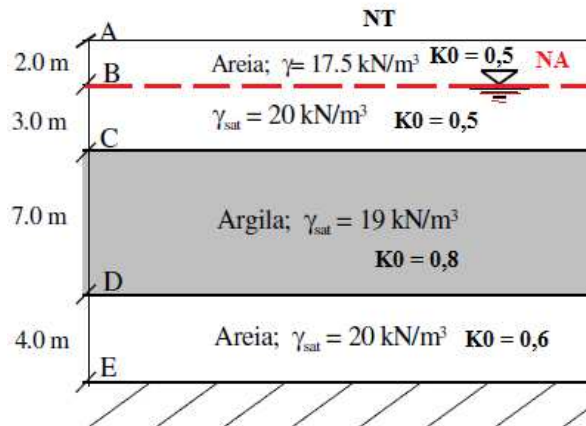
- Solos **Sobreadensados**

$$K_0 = (1 - \text{sen}\phi) + (OCR)$$

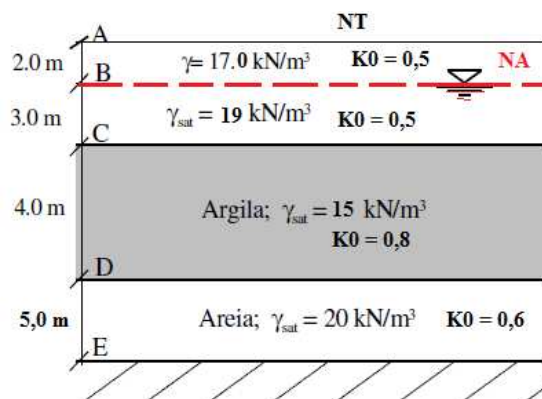
- Solos **Normalmente Adensados**

$$K_0 = 0,44 + 0,42 \cdot \left[\frac{IP(\%)}{100} \right]$$

3 – Calcular as tensões efetivas verticais e horizontais nos ponto A, B, C, D e E do perfil geotécnico e desenhar os respectivos diagramas de variação dessas tensões.



4 – Calcular as tensões efetivas verticais e horizontais nos ponto A, B, C, D e E do perfil geotécnico e desenhar os respectivos diagramas de variação dessas tensões.



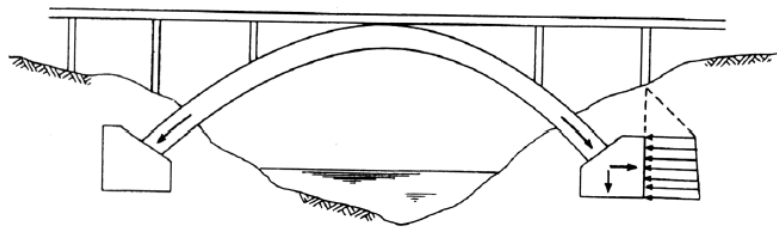
Empuxo passivo

É a **estrutura que é empurrada contra o solo**. A força exercida pela estrutura sobre o solo é de **natureza passiva**. Um caso típico deste tipo de interação solo-estrutura é o de fundações que transmitem ao maciço forças de elevada componente horizontal, como é o caso de pontes em arco.

Coefficiente de Empuxo Passivo - K_p

$$K_p = \text{tg}^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

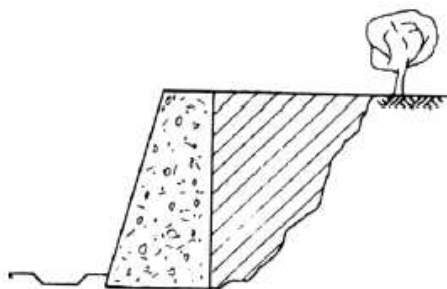
$$E_p = \frac{1}{2} \cdot K_p \cdot \gamma \cdot h^2$$



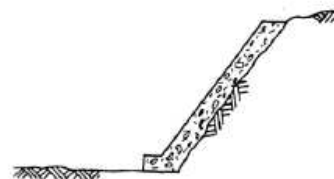
Exemplo de obra em que os empuxos são de natureza passiva

Empuxo ativo

Verifica-se quando determinada estrutura é construída para suportar um maciço de solo. Neste caso, as forças que o solo exerce sobre as estruturas são **de natureza ativa**. O solo **“empurra” a estrutura**, que reage, tendendo a afastar-se do maciço.



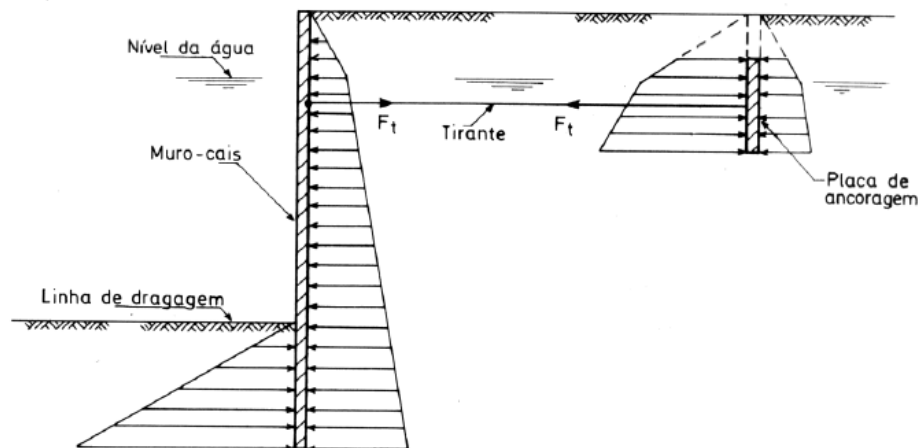
(a) Muros de gravidade



(b) Muro de proteção contra a erosão superficial

Empuxo Ativo e Passivo

Verifica-se em alguns tipos de obras a existência concomitante dos dois tipos de empuxo o ativo e o passivo, como é o caso da estaca prancha da Figura abaixo.



Muro-cais ancorado – caso em que se desenvolvem pressões ativas e passivas

Empuxo Total

- Teoria de Rankine:**
- Em resumo, o método de Rankine (1857) considera o solo em estado de equilíbrio plástico e baseia-se nas seguintes hipóteses:
- Solo isotrópico;*
- Solo homogêneo;*
- Superfície do terreno plana;*
- A ruptura ocorre em todos os pontos do maciço simultaneamente;*
- A ruptura ocorre sob o estado plano de deformação;*

- O Empuxo total é calculado a partir da integral da distribuição de tensões horizontais;

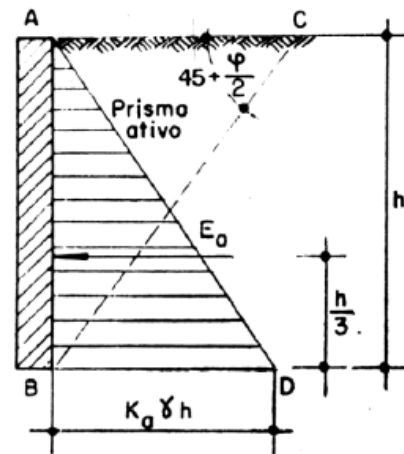
Solo Não coesivo

- Empuxo Ativo**
- No caso mais simples, considerando um solo homogêneo, seco, com $c = 0$, valor do **empuxo ativo total E_a** é igual a área do triângulo ABD e pode ser obtido pela expressão:

$$E_a = \int_0^h K_a \cdot \gamma \cdot z \cdot dz = \frac{\gamma \cdot h^2 \cdot K_a}{2}$$

$$K_a = \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right)$$

$$E_a = \frac{1}{2} \cdot K_a \cdot \gamma \cdot h^2$$



Solo Não coesivo:

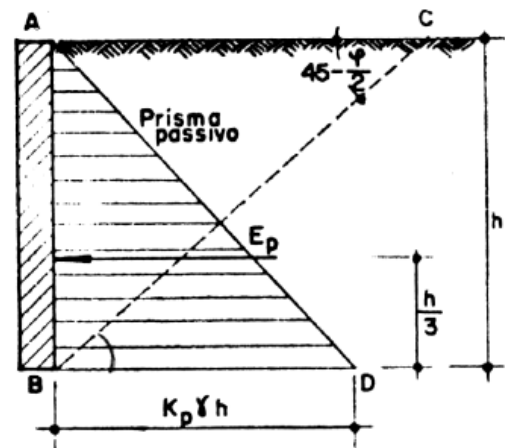
Empuxo Passivo

Admitindo-se agora, que a parede se desloque contra o terrapleno. Para que se produza o deslizamento, o empuxo deverá ser maior do que o peso do terrapleno. Assim, a tensão principal maior será horizontal. Neste caso, valor do empuxo ativo E_p é igual a área do triângulo ABD e pode ser obtido pela expressão:

$$E_p = \int_0^h K_p \cdot \gamma \cdot z \cdot dz = \frac{\gamma \cdot h^2 \cdot K_p}{2}$$

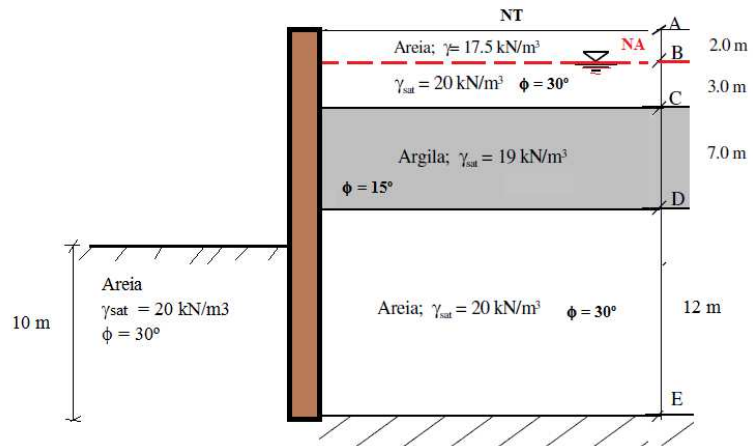
$$K_p = \operatorname{tg}^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot K_p \cdot \gamma \cdot h^2$$

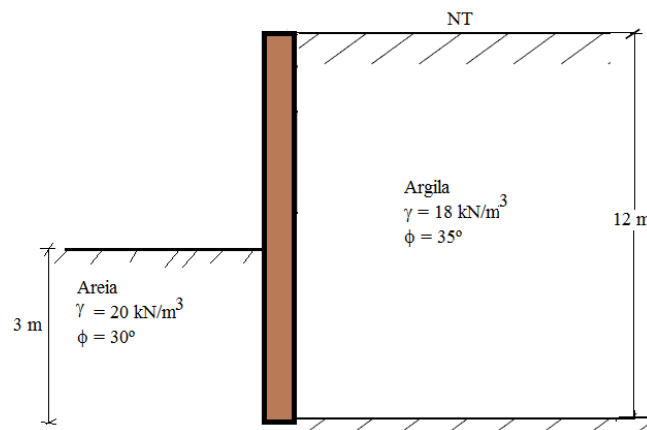


■ Valores de K_a e K_p para diferentes ângulos de atrito do solo (ϕ):

ϕ	K_a	K_p
0°	1,00	1,00
10°	0,70	1,42
20°	0,49	2,04
25°	0,41	2,47
30°	0,33	3,00
35°	0,27	3,69
40°	0,22	4,40
45°	0,17	5,83
50°	0,13	7,55
60°	0,07	13,90



■ Exercício: Calcular e desenhar os diagramas de empuxo passivo e ativo do perfil geotécnico abaixo.



- Exercício: Calcular e desenhar os diagramas de empuxo passivo e ativo do perfil geotécnico abaixo.

