



## Notas de aulas de Mecânica dos Solos II (parte 12)

*Hélio Marcos Fernandes Viana*

Tema:

Empuxos de terras (1.º Parte)

Conteúdo da parte 12

**1 Introdução**

**2 Diretrizes do estudo dos empuxos de terra**

**3 Coeficientes de empuxo em repouso, ativo e passivo**

**4 Deslocamentos do elemento de contenção (ou estrutura suporte) do maciço de solo e empuxos ativo e passivo**

**5 Estimativa do coeficiente de empuxo de repouso dos solos**

## 1 Introdução

### 1.1 Conceitos de empuxo de terra (ou do solo)

i) Empuxo de terra é uma força que se desenvolve a partir do interior do maciço terroso.

ii) Empuxo de terra é uma solicitação do solo sobre a estrutura de engenharia, que está em contato com o maciço terroso (ou de solo).

OBS(s).

a) Como exemplo de estrutura de engenharia que está em contato com o maciço terroso, têm-se:

-> O muro de contenção, ou muro de arrimo (ou de proteção, ou de apôio);

-> As escorações das escavações; e

-> Etc.

b) Maciço terroso (ou de solo) é uma grade massa de terra sólida e espessa.

### 1.2 O cálculo dos empuxos de terra (ou do solo) é uma preocupação antiga

→ O cálculo dos empuxos de terra (ou do solo) é uma das maiores e mais antigas preocupações da Engenharia Civil.

→ A primeira contribuição efetiva ao cálculo dos empuxos de terra data de 1776 e foi dada por Coulomb; Portanto, a contribuição de Coulomb (1776) é uma contribuição anterior ao nascimento da Mecânica dos Solos como ciência autônoma (ou independente).

OBS. Reconhecidamente, a Mecânica dos Solos surgiu como ciência autônoma (ou independente) em 1925, quando Terzaghi publicou o livro intitulado: "Mecânica das construções de terra baseada na Física dos solos".

→ Outra contribuição importante para o cálculo dos empuxos de terra foi dada por Rankine e data de 1857.

### 1.3 Obras de Engenharia Civil que exigem o conhecimento empuxo de terra (ou do solo)

Existe uma diversidade de obras na Engenharia Civil, que exigem o cálculo ou a determinação dos empuxos de terra; Dentre as obras e problemas de Engenharia Civil, que exigem o cálculo dos empuxos de terra, pode-se citar:

-> As placas de encontro das pontes com o solo;

-> Os escoramentos das escavações;

-> Os problemas de capacidade de carga em fundações;

-> Os muros de arrimo (ou proteção ou apôio); e

-> Etc.

## **2 Diretrizes do estudo dos empuxos de terra**

Existem duas diretrizes (ou linhas), que são seguidas no estudo dos empuxos de terra, as quais são:

- a) Um estudo dos empuxos de terra baseado em teorias; e
- b) Um estudo dos empuxos de terra baseado no empirismo-experimental.

OBS. Empirismo é uma doutrina ou atitude baseada na experiência, e não em princípios racionais, que envolvem as ciências racionais tais como: Física, Química e Etc.

### **2.1 Um estudo dos empuxos de terra baseado em teorias**

#### **i) Características do estudo dos empuxos de terra baseado em teorias**

O estudo dos empuxos de terra baseado em teorias apresenta as seguintes características:

- a) O estudo do empuxo baseia-se em teorias, tais como a teoria da relação física existente entre a tensão e a deformação dos solos;
- b) O estudo teórico dos empuxos busca considerar todos os aspectos do comportamento do solo;
- c) O estudo teórico dos empuxos baseia-se em modelos de sólidos deformáveis (ou modelos reológicos); e
- d) O estudo teórico dos empuxos assume (ou toma) algumas hipóteses simplificadoras para aplicar a teoria aos problemas práticos.

#### **ii) Avanço do estudo dos empuxos de terra baseado em teorias**

3 (três) fatos têm contribuído, significativamente, para o avanço do estudo dos empuxos de terra baseado em teorias, tais fatos são:

- a) O surgimento dos computadores, que permitiu a automação e aplicabilidade dos métodos numéricos no estudo dos empuxos, tais como: o método das diferenças finitas e o método dos elementos finitos;
- b) A evolução das técnicas de amostragem geotécnica, que permitem obter amostras de qualidade in situ (ou no campo); e

c) A evolução dos ensaios laboratoriais, que permitem a obtenção das propriedades físicas do solo, tais como: ângulo de atrito efetivo do solo ( $\phi'$ ), coesão do solo ( $c$ ), módulo de elasticidade do solo ( $E$ ) e etc..

OBS. Nesta disciplina (Mecânica dos Solos II) serão tratados (ou considerados) apenas os processos clássicos de determinação de empuxo, que são métodos teóricos baseados na teoria da plasticidade do solo, os quais são:

- a) O método de determinação de empuxo de Rankine; e
- b) O método de determinação de empuxo de Coulomb.

## **2.2 Um estudo dos empuxos de terra baseado no empirismo-experimental**

As principais características do estudo dos empuxos de terra baseado no empirismo-experimental são:

- a) No empirismo-experimental as recomendações para o cálculo dos empuxos são colhidas (ou obtidas) de observações baseadas em modelos de laboratório; e/ou
- b) No empirismo-experimental as recomendações para o cálculo dos empuxos são colhidas (ou obtidas) de observações baseadas em obras experimentais.

## **3 Coeficientes de empuxo em repouso, ativo e passivo**

### **3.1 Determinação do coeficiente de empuxo de repouso**

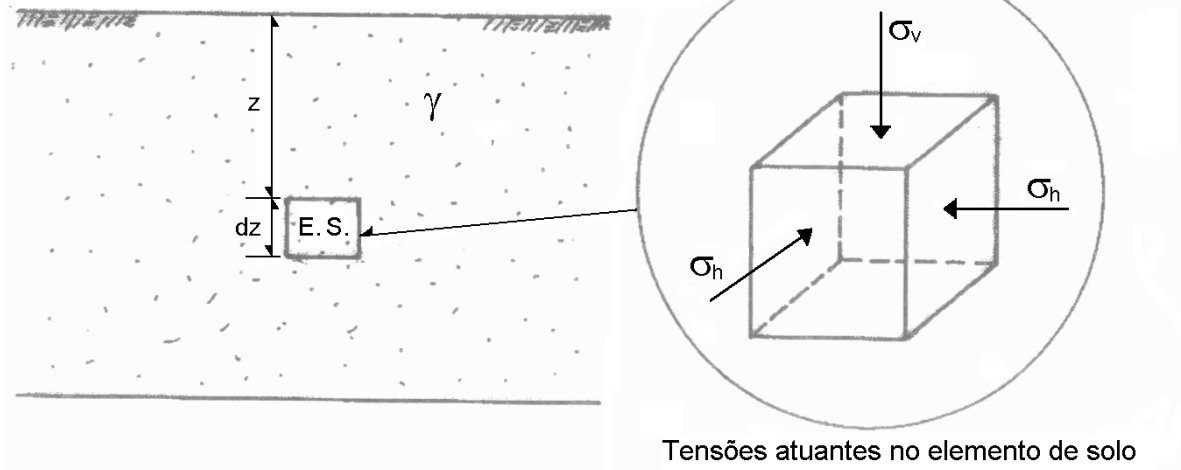
Para determinação do coeficiente de empuxo de repouso do solo considere:

- a) Um solo granular (ou arenoso), homogêneo, isotrópico e não saturado, que está situado em um semi-espaço considerado infinito;
- b) Considere que a superfície do solo é horizontal;
- c) Considere um elemento (ou pequena parte) de solo de espessura  $dz$  situado no interior do solo; e
- d) Considere que o elemento (ou pequena parte) de solo está situado a uma profundidade  $z$  no solo.

A Figura 3.1 ilustra as tensões geostáticas atuantes no elemento (ou pequena parte) de solo que está sendo considerado, o qual está no interior de um solo granular (ou arenoso), homogêneo, isotrópico e que possui superfície horizontal.

A Figura 3.1 é útil para entender a determinação dos coeficientes de empuxo em repouso, ativo e passivo.

$\sigma_v$  e  $\sigma_h$  = tensões geotáticas vertical e horizontal respectivamente, atuantes no elemento de solo;  
 E. S. = elemento (ou pequena parte) de solo;  
 z = profundidade do elemento de solo;  
 dz = espessura do elemento de solo; e  
 $\gamma$  = peso específico do solo.



**Figura 3.1 - Tensões geotáticas atuantes em elemento de solo, no interior de maciço de solo de extensão semi-infinita, homogêneo e isotrópico**

OBS. As tensões geotáticas são as tensões geradas devido ao peso próprio do solo.

Observe na Figura 3.1 que sobre as faces do elemento (ou pequena parte) de solo atuam tensões verticais e horizontais,  $\sigma_v$  e  $\sigma_h$  respectivamente.

Sabe-se que as deformações verticais e horizontais, que podem ser causadas no elemento de solo devido às tensões são dadas pelas seguintes equações:

**a) Equação para determinação da deformação vertical do elemento de solo**

$$\varepsilon_v = \frac{(\sigma_v - \sigma_h \cdot 2 \cdot \mu)}{E} \quad (3.1)$$

em que:

$\varepsilon_v$  = deformação vertical do elemento de solo;

$\sigma_v$  = tensão vertical atuante no elemento de solo;

$\sigma_h$  = tensão horizontal atuante no elemento de solo;

$\mu$  = coeficiente de Poisson do solo; e

E = módulo de elasticidade do solo.

**b) Equação para determinação da deformação horizontal do elemento de solo**

$$\varepsilon_h = \frac{[\sigma_h - \mu \cdot (\sigma_v + \sigma_h)]}{E} \quad (3.2)$$

em que:

$\varepsilon_h$  = deformação horizontal do elemento de solo;

$\sigma_v$  = tensão vertical atuante no elemento de solo;

$\sigma_h$  = tensão horizontal atuante no elemento de solo;

$\mu$  = coeficiente de Poisson do solo; e

$E$  = módulo de elasticidade do solo.

OBS. Os símbolos  $\varepsilon$  e  $\mu$  são as letras gregas “épsilon” e “mi”.

Bem, considerando-se que as deformações horizontais (ou laterais) do elemento de solo da Figura 3.1 são impedidas; Então  $\varepsilon_h = 0$ ; Assim sendo, desenvolvendo a eq.(3.2), tem-se que:

$$\varepsilon_h = 0 = \frac{[\sigma_h - \mu \cdot (\sigma_v + \sigma_h)]}{E}$$

$$0 = \sigma_h - \mu \cdot (\sigma_v + \sigma_h)$$

$$0 = \sigma_h - \mu \cdot \sigma_h - \mu \cdot \sigma_v$$

$$\mu \cdot \sigma_v = \sigma_h \cdot (1 - \mu);$$

Logo :

$$\frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{\mu}{1 - \mu}$$

Diante do exposto, chamando-se de coeficiente de empuxo de repouso do solo ( $K_0$ ) a relação entre as tensões horizontal e vertical atuantes no elemento (ou pequena parte) de solo em repouso, tem-se que:

$$K_0 = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{\mu}{1 - \mu} \quad (3.3)$$

em que:

$K_0$  = coeficiente de empuxo de repouso do solo;

$\sigma_v$  = tensão vertical atuante no elemento de solo;

$\sigma_h$  = tensão horizontal atuante no elemento de solo; e

$\mu$  = coeficiente de Poisson do solo.

A eq.(3.3) é válida para condição de deformações horizontais ou laterais do elemento de solo nulas, ou seja,  $\varepsilon_h = 0$ .

OBS(s).

a) Solo isotrópico é o solo que apresenta as mesmas propriedades físicas em todos os planos ou direções, ou seja:

$$E_x = E_y = E_z; \text{ ou } \mu_x = \mu_y = \mu_z$$

em que:

$E_x$ ,  $E_y$  e  $E_z$  = módulos de elasticidade do solo nas direções x, y e z respectivamente;  
e

$\mu_x$ ,  $\mu_y$  e  $\mu_z$  = coeficientes de Poisson do solo nas direções x, y e z respectivamente.

- b) Solo homogêneo é o solo formado por um único material, ou seja, um material que apresenta a mesma natureza química e física;
- c) Solo não saturado é o solo cujos vazios não estão totalmente preenchidos pela água; e
- d) Semi-espaço infinito é um espaço considerado suficiente para resolução do problema em questão.

### **3.2 Determinação do coeficiente de empuxo ativo do solo, e do coeficiente de empuxo passivo do solo**

#### **i) Introdução**

Para determinação dos coeficientes de empuxo ativo e passivo do solo considere:

- a) Uma estrutura suporte em contato com um maciço de solo; A estrutura suporte pode ser, por exemplo, um muro de arrimo (ou de contenção);
- b) Considere que o maciço de solo em contato com a estrutura suporte (ou muro de contenção) seja:
  - > Um maciço formado por um solo homogêneo;
  - > Um maciço formado por um solo isotrópico;
  - > Um maciço formado por um solo granular (ou arenoso); e
  - > Um maciço formado por um solo não saturado.
- c) Considere que o maciço de solo esteja situado num semi-espaço infinito;
- d) Considere a superfície do maciço de solo horizontal;
- e) Considere um elemento (ou pequena parte) de solo de espessura dz situado no interior do maciço de solo;
- f) Considere que o elemento (ou pequena parte) de solo está situado a uma profundidade z; e
- g) Finalmente, considere que a face esquerda do elemento (ou pequena parte) de solo está em contato com a estrutura suporte do maciço de solo (por exemplo: um muro de arrimo).

A Figura 3.2 mostra uma estrutura de suporte do maciço de solo, em repouso e em contato com um elemento de solo situado a uma profundidade z; A Figura 3.2 representa a série de considerações feitas anteriormente (tópico 3.2 e considerações de a até g).

A Figura 3.2 é útil para entender o processo de obtenção dos coeficientes de empuxo ativo e passivo do solo.

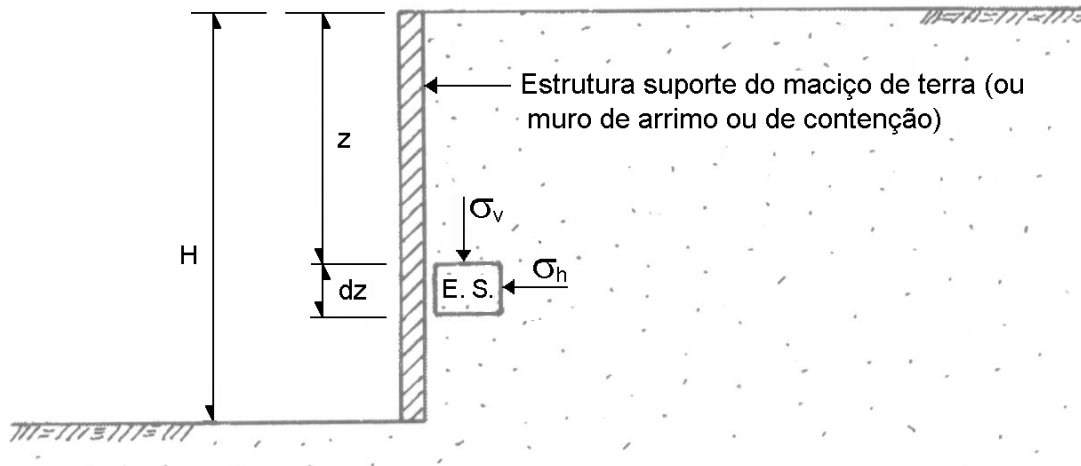
E. S. = elemento de solo;

$\sigma_v$  e  $\sigma_h$  = tensões totais vertical e horizontal respectivamente, atuantes no E. S.;

$z$  = profundidade do elemento de solo;

$dz$  = espessura do elemento de solo; e

$H$  = altura da estrutura suporte do maciço de solo (ou muro de arrimo ou de contenção).



**Figura 3.2 - Estrutura de suporte do maciço de solo, em repouso e em contato com um elemento de solo situado a uma profundidade  $z$**

## **ii) Determinação do coeficiente de empuxo ativo e limite ativo**

→ Considere a estrutura suporte (ou muro de contenção) em contato com o maciço de solo, como mostra a Figura 3.2.

→ Bem, mantendo-se a tensão total vertical ( $\sigma_v$ ) atuante no elemento de solo, situado na profundidade  $z$ , como constante, e deslocando a estrutura suporte (ou muro de contenção) do maciço de solo para esquerda, tem-se que:

a) O deslocamento da estrutura suporte (ou muro de contenção) do maciço de solo para a esquerda causa expansão do solo até a ruptura do maciço de solo;

b) A ruptura do maciço de solo devido à expansão do solo ocorre quando:

-> A tensão total horizontal atuante no elemento de solo (E. S.) situado em uma profundidade  $z$  alcança um valor mínimo simbolizado por  $\sigma_{ha}$ ; e

-> A estrutura suporte (ou muro de contenção) do maciço de solo se desloca para esquerda causando expansão do solo.

c) A ruptura do maciço de solo devido à expansão do solo ocorre quando a tensão total horizontal atuante no elemento de solo é igual a  $\sigma_{ha}$ ; Ainda, tal ruptura do solo é denominada RUPTURA ATIVA DO SOLO.



OBS. A RUPTURA ATIVA DO SOLO devido à expansão do solo corresponde ao LIMITE ATIVO DO SOLO.

Finalmente, tem-se que o coeficiente de empuxo ativo do solo ( $K_A$ ) é dado pela seguinte equação:

$$K_A = \frac{\sigma_{ha}}{\sigma_v} \quad (3.4)$$

em que:

$K_A$  = coeficiente de empuxo ativo do solo;

$\sigma_{ha}$  = tensão total horizontal mínima, atuante no elemento de solo situado em uma profundidade  $z$ , quando ocorre a ruptura do maciço de solo devido à expansão do solo; e

$\sigma_v$  = tensão total vertical, atuante no elemento de solo situado a uma profundidade  $z$ .

### **iii) Determinação do coeficiente de empuxo passivo e limite passivo**

→ Considere a estrutura suporte (ou muro de contenção) em contato com o maciço de solo, como mostra a Figura 3.2.

→ Bem, mantendo-se a tensão total vertical ( $\sigma_v$ ) atuante no elemento de solo, situado na profundidade  $z$ , como constante, e deslocando a estrutura suporte (ou muro de contenção) do maciço de solo para direita, tem-se que:

a) O deslocamento da estrutura suporte (ou muro de contenção) do maciço de solo para a direita causa a compressão do solo até a ruptura do maciço de solo por compressão;

b) A ruptura do maciço de solo devido à compressão do solo ocorre quando:

-> A tensão total horizontal atuante no elemento de solo (E. S.) situado em uma profundidade  $z$  alcança um valor máximo simbolizado por  $\sigma_{hp}$ ; e

-> A estrutura suporte (ou muro de contenção) do maciço de solo se desloca para direita causando compressão do solo.

c) A ruptura do maciço de solo devido à compressão do solo ocorre quando a tensão total horizontal atuante no elemento de solo é igual a  $\sigma_{hp}$ ; Ainda, tal ruptura do solo é denominada RUPTURA PASSIVA DO SOLO.

OBS. A RUPTURA PASSIVA DO SOLO devido à compressão do solo corresponde ao LIMITE PASSIVO DO SOLO.

Finalmente, tem-se que o coeficiente de empuxo passivo do solo ( $K_P$ ) é dado pela seguinte equação:

$$K_P = \frac{\sigma_{hp}}{\sigma_v} \quad (3.5)$$

em que:

$K_p$  = coeficiente de empuxo passivo do solo;

$\sigma_{hp}$  = tensão total horizontal máxima, atuante no elemento de solo situado em uma profundidade  $z$ , quando ocorre a ruptura do maciço de solo devido à compressão do solo; e

$\sigma_v$  = tensão total vertical, atuante no elemento de solo situado a uma profundidade  $z$ .

#### 4 Deslocamentos do elemento de contenção (ou estrutura suporte) do maciço de solo e empuxos ativo e passivo

##### i) Empuxo ativo

A Figura 4.1 mostra um maciço de solo submetido à condição ativa, quando o elemento de contenção do maciço de solo se desloca para esquerda.

Quando o elemento de contenção do solo da Figura 4.1 se desloca para esquerda ocorre que:

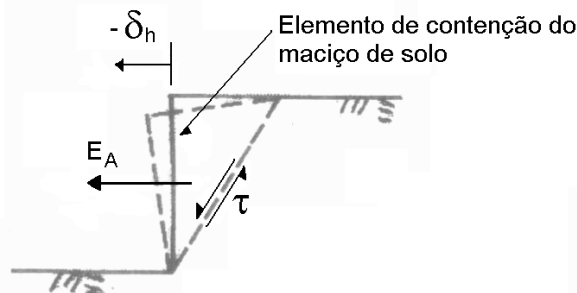
- Os deslocamentos horizontais do elemento de contenção do maciço de solo ( $\delta_h$ ) são negativos;
- O deslocamento do elemento de contenção do maciço de solo para esquerda corresponde a uma condição ativa do solo, quando o solo se expande; e
- O empuxo atuante no elemento de contenção do maciço de solo é o empuxo ativo, e causa expansão do solo.

OBS. O peso próprio do solo pode causar a força denominada empuxo ativo.

$\tau$  = tensão cisalhante atuante na superfície de ruptura do maciço de solo;

$E_A$  = empuxo ativo atuante no elemento de contenção do maciço de solo; e

$-\delta_h$  = deslocamento horizontal negativo do elemento de contenção do maciço de solo.



**Figura 4.1 - Maciço de solo submetido à condição ativa, quando o elemento de contenção do maciço de solo se desloca para esquerda e causa expansão do solo**

## **ii) Empuxo passivo**

A Figura 4.2 mostra o maciço de solo submetido à condição passiva, quando o elemento de contenção do maciço de solo se desloca para direita.

Quando o elemento de contenção de solo da Figura 4.2 se desloca para direita ocorre que:

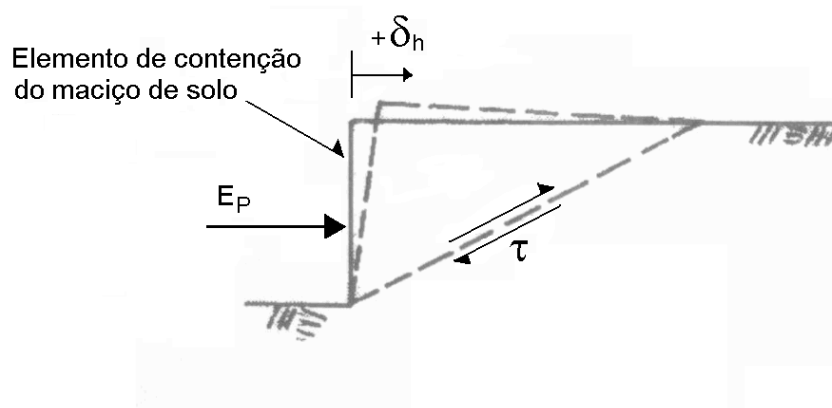
- Os deslocamentos horizontais do elemento de contenção do maciço de solo ( $\delta_h$ ) são positivos;
- O deslocamento do elemento de contenção do maciço de solo para direita corresponde a uma condição passiva do solo, quando o solo é comprimido; e
- O empuxo atuante no elemento de contenção do maciço de solo é o empuxo passivo, e causa compressão do solo.

OBS. Uma estaca carregada lateralmente pode causar um empuxo passivo no solo.

$\tau$  = tensão cisalhante atuante na superfície de ruptura do maciço de solo;

$E_p$  = empuxo passivo atuante no elemento de contenção do maciço de solo; e

$+\delta_h$  = deslocamento horizontal positivo do elemento de contenção do maciço de solo.



**Figura 4.2 - Maciço de solo submetido à condição passiva, quando o elemento de contenção do maciço de solo se desloca para direita e causa compressão do solo**

OBS. Os símbolos  $\delta$  e  $\tau$  são as letras gregas “delta” e “tau” respectivamente.

## **iii) Variação do empuxo de terra em função do deslocamento do elemento de contenção do maciço de solo**

A Figura 4.3 ilustra a variação dos empuxos de terra em função do deslocamento do elemento de contenção do maciço de solo; por exemplo: um muro de arrimo (ou de proteção).

Pode-se observar, na Figura 4.3, que:

a) Os deslocamentos horizontais ( $\delta_h$ ) do elemento de contenção do maciço de solo (ou muro de arrimo) além do deslocamento que corresponde ao deslocamento horizontal de ruptura ativa do solo ( $\delta_{hA}$ ) não afetam mais o valor correspondente ao empuxo ativo de ruptura do solo ( $E_A$ );

b) O empuxo ativo correspondente à ruptura ativa do solo é simbolizado por  $E_A$ ;

OBS. Na verdade, o deslocamento  $\delta_{hA}$  corresponde a um deslocamento de plastificação do solo e não de ruptura.

c) Os deslocamentos horizontais ( $\delta_h$ ) do elemento de contenção do maciço de solo (ou muro de arrimo) além do deslocamento que corresponde ao deslocamento horizontal de ruptura passiva do solo ( $\delta_{hP}$ ) não afetam mais o valor correspondente ao empuxo passivo de ruptura do solo ( $E_P$ );

d) O empuxo passivo correspondente à ruptura passiva do solo é simbolizado por  $E_P$ ;

OBS. Na verdade, o deslocamento  $\delta_{hP}$  corresponde a um deslocamento de plastificação do solo e não de ruptura.

e) Os deslocamentos horizontais do elemento de contenção do maciço de solo entre os deslocamentos limites de ruptura ativa ( $\delta_{hA}$ ) e ruptura passiva ( $\delta_{hP}$ ) do solo são designados de deslocamentos elásticos do solo, e são deslocamentos insuficientes para causar a plastificação do solo, ou ruptura do solo;

OBS. Estado plástico do solo corresponde a um estado onde as deformações do solo crescem e o nível de tensões atuantes no solo permanecem constantes; Portanto, se os deslocamentos ou as deformações do solo ultrapassarem o estado elástico, e entrarem no estado plástico do solo implica em um perigo de ruptura do solo.

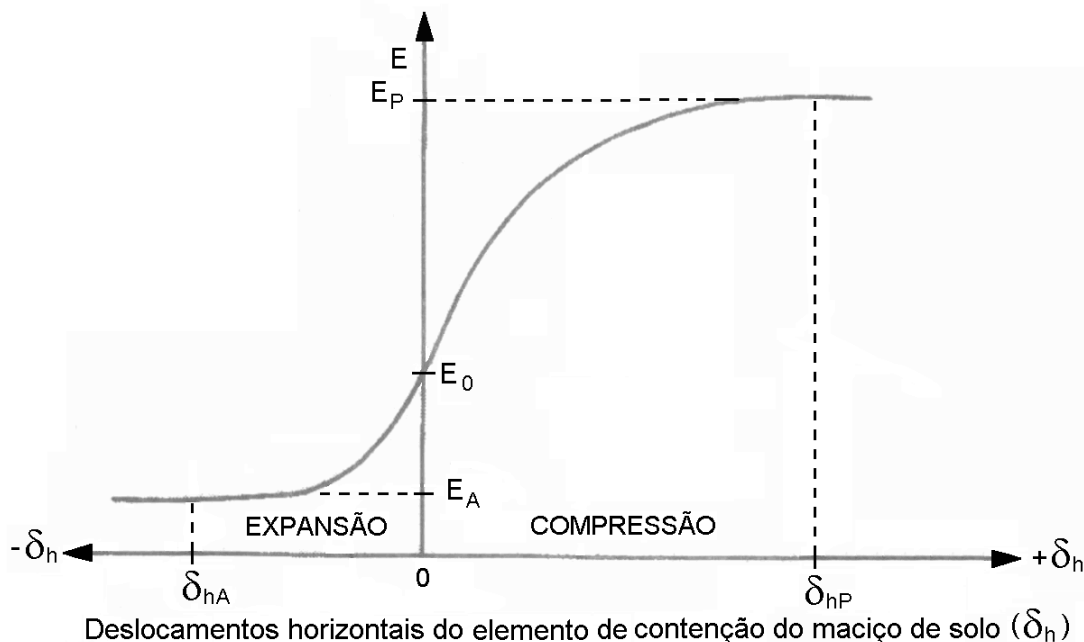
f) São considerados empuxos ativos e passivos insuficientes para causar a ruptura do solo, os empuxos ativos e passivos situados no intervalo de deslocamento elástico do solo, ou seja, entre os deslocamentos do elemento de contenção correspondentes à ruptura ativa ( $\delta_{hA}$ ) e passiva ( $\delta_{hP}$ );

g) Os deslocamentos horizontais do elemento de contenção do maciço de solo além dos deslocamentos de ruptura ativa ( $\delta_{hA}$ ) e passiva ( $\delta_{hP}$ ) do solo correspondem à deslocamentos do solo plastificado ou do solo considerado rompido; e

h)  $E_0$  corresponde ao empuxo de repouso atuante no solo, quando o elemento de contenção (ou muro de arrimo do solo) não se desloca horizontalmente.

OBS. Diante do que foi exposto, o modelo da Figura 4.3 que define os empuxos ativo de ruptura ( $E_A$ ) e passivo de ruptura ( $E_P$ ) do solo é denominado modelo elasto-plástico.

$\delta_{hA}$  e  $\delta_{hP}$  = deslocamentos horizontais ativo e passivo do elemento de contenção respectivamente, correspondentes à plastificação ou ruptura do solo;  
 $E_A$  e  $E_P$  = empuxos ativo e passivo respectivamente, correspondentes à plastificação ou ruptura do solo; e  
 $E_0$  = empuxo do solo em repouso.



**Figura 4.3 - Empuxos em função do deslocamento horizontal do elemento de contenção (ou muro de arrimo) do maciço de solo**

#### **iv) Resultados de experimentos laboratoriais**

Experimentos realizados com areias em laboratório demonstraram que:

a) A ruptura por empuxo ativo do elemento de contenção do solo ocorre quando o deslocamento horizontal do elemento de contenção é dado pela seguinte equação:

$$\delta_{hA} \geq \frac{L}{1000} \quad (4.1)$$

em que:

$\delta_{ha}$  = deslocamento horizontal do elemento de contenção do solo, que corresponde à ruptura por empuxo ativo atuante no solo; e

L = altura do elemento de contenção do solo.

b) A ruptura por empuxo passivo do elemento de contenção do solo ocorre quando o deslocamento horizontal do elemento de contenção é dado pela seguinte equação:

$$\delta_{hP} \geq \frac{4.L}{100} \quad (4.2)$$

em que:

$\delta_{hP}$  = deslocamento horizontal do elemento de contenção do solo, que corresponde à ruptura por empuxo passivo “atuante no solo”; e

L = altura do elemento de contenção do solo.

## 5 Estimativa do coeficiente de empuxo de repouso dos solos

### 5.1 Introdução

Como já mencionado anteriormente, o coeficiente de empuxo de repouso é obtido (ou definido) quando não há deformações laterais ou horizontais no solo ( $\varepsilon_h = 0$ ), e o coeficiente de empuxo de repouso do solo corresponde à seguinte equação:

$$K_0 = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (5.1)$$

em que:

$K_0$  = coeficiente de empuxo de repouso do solo;

$\sigma_h$  = tensão total horizontal atuante no solo a uma profundidade z; e

$\sigma_v$  = tensão total vertical atuante no solo a uma profundidade z.

### 5.2 Técnicas empregadas para estimar o valor do coeficiente de empuxo de repouso ( $K_0$ )

O coeficiente de empuxo de repouso do solo ( $K_0$ ) pode ser estimado pelas seguintes formas:

- i) A partir de ensaios de laboratório;
- ii) A partir de ensaios de campo ou in situ; e
- iii) A partir de relações com as propriedades do solo.

#### **i) Obtenção do coeficiente de empuxo de repouso do solo a partir de ensaios de laboratório**

A estimativa do coeficiente de empuxo de repouso do solo ( $K_0$ ) a partir de ensaios de laboratório apresentam as seguintes dificuldades:

- > A determinação de  $K_0$  exige equipamentos de grande sensibilidade;
- > Os ensaios para determinação de  $K_0$  são trabalhosos; e
- > Os ensaios para determinação de  $K_0$  não são rotineiros nos laboratórios.

Bishop e Henkel (1957 apud Bueno e Vilar 2002) apresentam uma técnica para determinação do coeficiente de empuxo de repouso do solo do solo ( $K_0$ ), que é baseada em ensaios triaxiais com as deformações laterais do corpo-de-prova impedidas ( $\varepsilon_h = 0$ ). Sendo que, os ensaios triaxiais podem ser realizados de forma

drenada ou não drenada, utilizando-se amostras de solo saturadas ou parcialmente saturadas.

OBS. Uma amostra de solo é saturada, quando apresenta todos os vazios do solo preenchidos pela água, ou seja,  $S_r$  (grau de saturação) = 100%.

### **ii) Obtenção do coeficiente de empuxo de repouso do solo a partir de ensaios de campo**

A estimativa do coeficiente de empuxo de repouso do solo ( $K_0$ ) a partir de ensaios de campo ou in situ apresenta as seguintes dificuldades:

- > Os ensaios para determinação de  $K_0$  no campo exigem equipamentos de grande sensibilidade; e
- > Os ensaios para determinação de  $K_0$  no campo são ensaios trabalhosos.

A estimativa do valor do coeficiente de empuxo do solo no campo ou in situ pode ser feita com base nos seguintes ensaios:

- > Ensaio de penetração do piezocone (CPTU); e
- > Ensaio com o pressiômetro.

OBS. O piezocone é um cone de penetração no solo que mede: a resistência de ponta do cone ( $q_c$ ), o atrito lateral do cone ( $F_s$ ) e a pressão neutra atuante no solo ( $u$ ).

### **iii) Obtenção do coeficiente de empuxo de repouso do solo a partir de relações**

Diante das dificuldades de obtenção do coeficiente de empuxo de repouso do solo ( $K_0$ ), através dos ensaios de campo e laboratório foram desenvolvidas diversas relações empíricas para a obtenção do coeficiente de empuxo de repouso do solo ( $K_0$ ).

Dentre as relações empíricas para obtenção do coeficiente de empuxo de repouso do solo ( $K_0$ ), pode-se citar:

#### **a) A relação de Jack (1944 apud Bueno e Vilar 2002)**

A relação de Jack (1944 apud Bueno e Vilar 2002) é válida para solos normalmente adensados e é dada pela seguinte equação:

$$K_0 = 1 - \text{sen}\phi' \quad (5.2)$$

em que:

$K_0$  = coeficiente de empuxo de repouso do solo; e

$\phi'$  = ângulo de atrito efetivo do solo (graus).

**b) A relação de Alpan (1967 apud Bueno e Vilar 2002) para argilas normalmente adensadas**

A relação de Alpan (1967 apud Bueno e Vilar 2002) para argilas normalmente adensadas é dada pela seguinte equação:

$$K_0 = 0,19 + 0,233.\text{Log}(\text{IP}) \quad (5.3)$$

em que:

$K_0$  = coeficiente de empuxo de repouso do solo; e

IP = índice de plasticidade da argila (%).

**c) A relação de Mayne e Kulhawy (1982 apud Craig 2007) para argilas pré-adensadas**

A relação de Mayne e Kulhawy (1982 apud Craig 2007) para argilas pré-adensadas é dada pela seguinte equação:

$$K_0 = (1 - \text{sen}\phi') \cdot \text{OCR}^{\text{sen}\phi'} \quad (5.4)$$

em que:

$K_0$  = coeficiente de empuxo de repouso do solo;

$\phi'$  = ângulo de atrito efetivo do solo (graus); e

OCR = razão de pré-adensamento do solo.

**d) A relação de Alpan (1967) para solos arenosos**

A relação de Alpan (1967) para solos arenosos é dada pela seguinte equação:

$$K_0 = 1 - \text{sen}\phi' \quad (5.5)$$

em que:

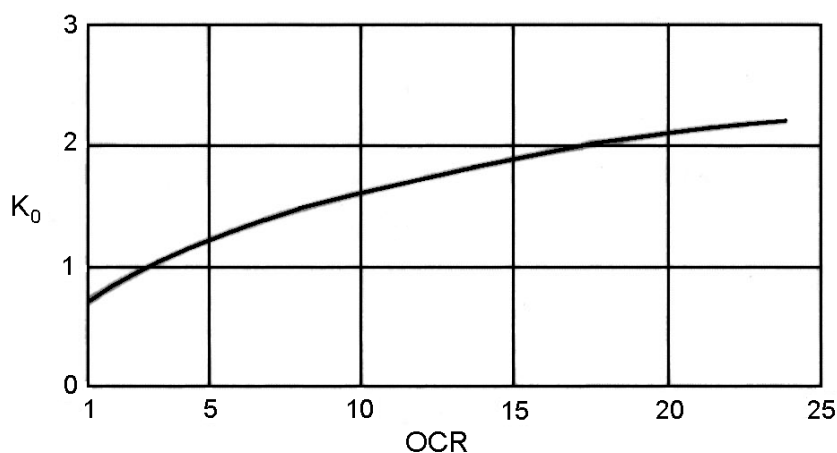
$K_0$  = coeficiente de empuxo de repouso do solo; e

$\phi'$  = ângulo de atrito efetivo do solo (graus).

**e) Relação entre o coeficiente de empuxo de repouso e a razão de pré-adensamento (ou sobre-adensamento) do solo ou OCR**

Craig (2007) fornece uma relação típica entre o coeficiente de empuxo de repouso do solo ( $K_0$ ) e a razão de pré-adensamento (ou sobre-adensamento) do solo ou OCR, tal relação é apresentada na Figura 5.1.





**Figura 5.1 - Relação típica entre o coeficiente de empuxo de repouso do solo ( $K_0$ ) e a razão de pré-adensamento do solo (OCR) (Fonte: Craig, 2007)**

#### **iv) Valores típicos do coeficiente de empuxo de repouso do solo ( $K_0$ )**

A Tabela 5.1 mostra valores típicos do coeficiente de empuxo de repouso do solo ( $K_0$ ) para diversos solos, tais valores foram obtidos de diversas fontes, as quais são indicadas na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1 - Valores típicos do coeficiente de empuxo de repouso do solo ( $K_0$ ) para diversos solos**

Solo	$K_0$	Fonte
Areia fofa	0,60	Craig (2007)
Areia compacta	0,35	Craig (2007)
Argilas normalmente adensadas	0,50 a 0,60	Craig (2007)
Argila pré-adensada com OCR = 3,5	1,00	Craig (2007)
Argila pré-adensada com OCR = 20	2,80	Craig (2007)
Areia solta ou fofa	0,45 a 0,50	Caputo (1976)
Areia compacta	0,40 a 0,45	Caputo (1976)
Areia fofa	0,64	Bueno e Vilar (2002)
Areia média	0,52	Bueno e Vilar (2002)
Areia compacta	0,49	Bueno e Vilar (2002)
Areia fofa saturada	0,46	Bueno e Vilar (2002)
Areia compacta saturada	0,36	Bueno e Vilar (2002)
Areias compactadas por camadas	0,80	Bueno e Vilar (2002)
Argilas	0,60 a 0,80	Bueno e Vilar (2002)

**Referências Bibliográficas**

BISHOP, A. W.; HENKEL, D. J. ***The measurement of soil properties in the triaxial test.*** Edward Arnould. London, 1957.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. ***Mecânica dos solos. Apostila 69.*** Viçosa - MG: Universidade Federal de Viçosa, 1980. 131p.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. ***Mecânica dos solos.*** Vol. 2. São Carlos - SP: Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 2002. 219p. (Bibliografia Principal)

CAPUTO, H. P. ***Mecânica dos solos e suas aplicações.*** Vol. 2. Rio de Janeiro - RJ: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1976. 456p.

CRAIG, R. F. ***Mecânica dos solos.*** 7. ed., Rio de Janeiro - RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 2007. 365p.

FERREIRA, A. B. H. ***Novo dicionário da língua portuguesa.*** Rio de Janeiro - RJ: Nova Fronteira S. A., 1986. 1838p.

SCHNAID, F. ***Ensaio de campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações.*** São Paulo - SP: Oficina de Textos, 2005. 189p.