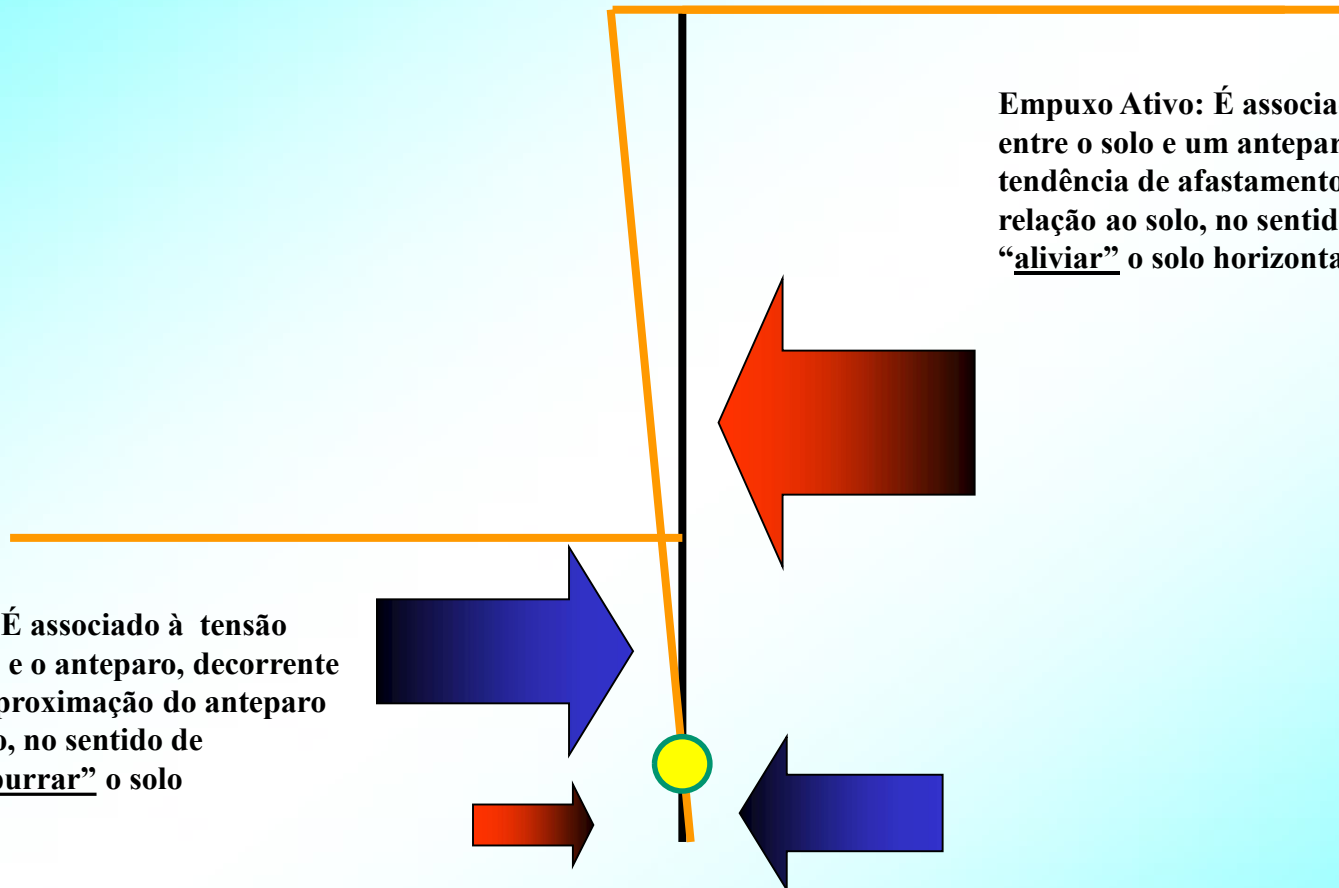


Fundações
PEF 3405

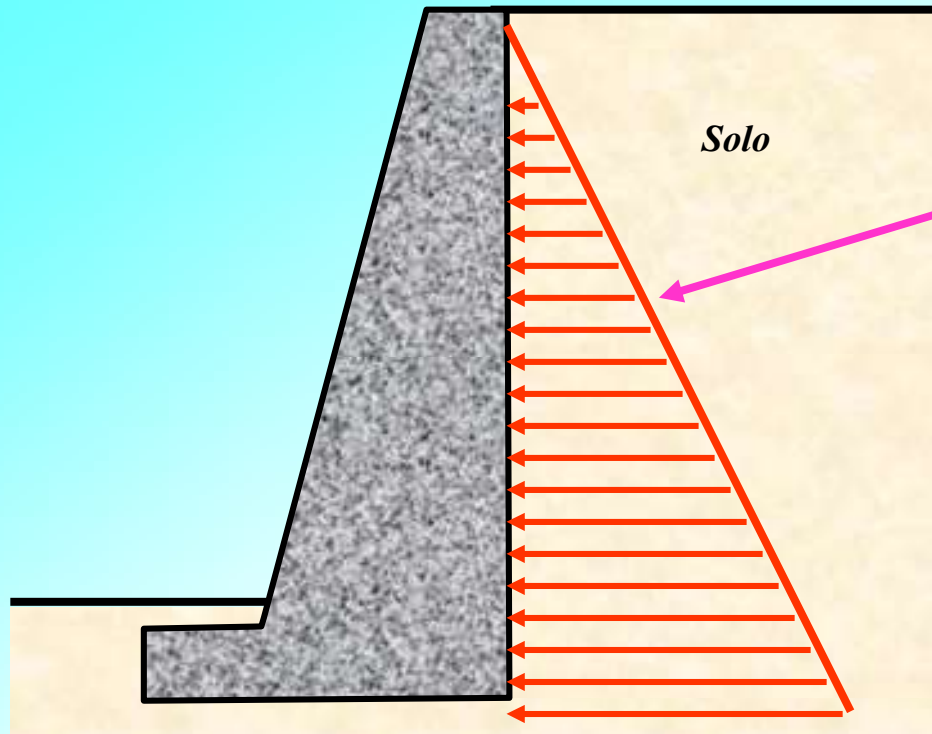
EMPUXOS DE TERRA
RESUMO

Prof. Fernando A. M. Marinho
Prof. Luiz Guilherme de Mello
Prof. Waldemar Hachich

Empuxo Passivo: É associado à tensão limite entre o solo e o anteparo, decorrente de tendência de aproximação do anteparo em relação ao solo, no sentido de comprimir / “empurrar” o solo horizontalmente.

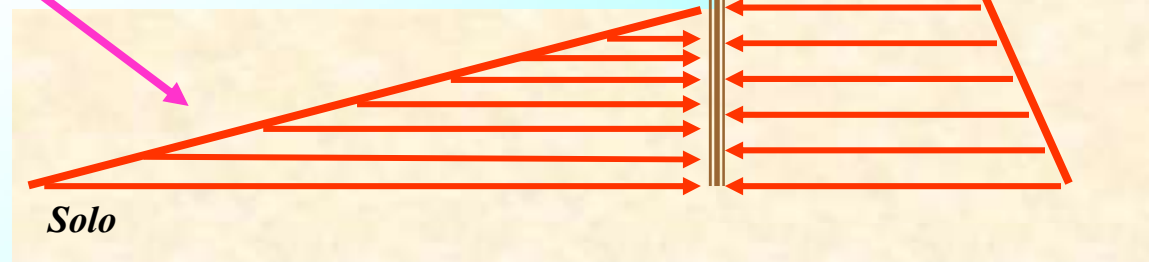


Empuxo Ativo: É associado à tensão limite entre o solo e um anteparo, decorrente de tendência de afastamento do anteparo em relação ao solo, no sentido de expandir / “aliviar” o solo horizontalmente.



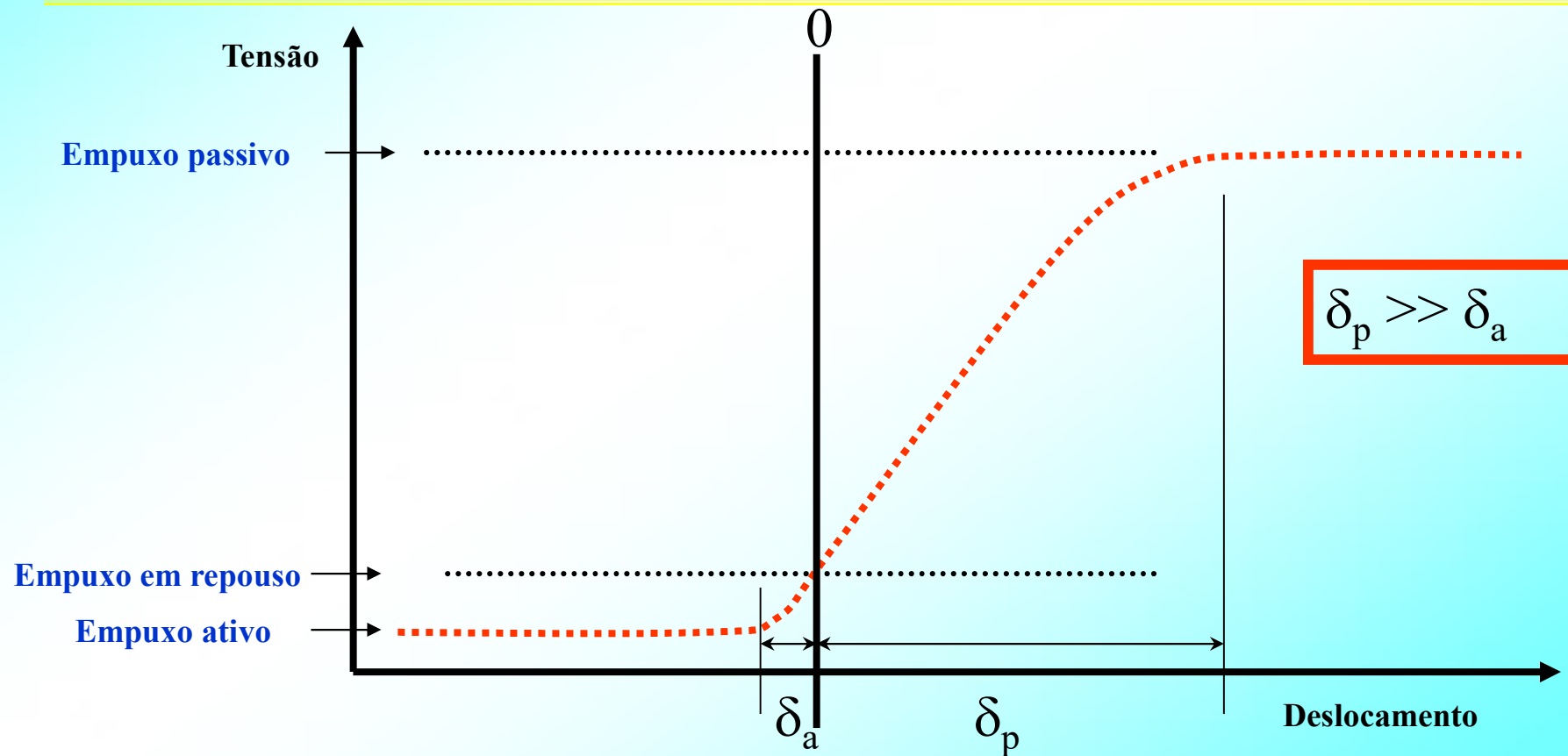
Distribuição teórica do empuxo ativo

Distribuição teórica do empuxo passivo



Empuxo de Terra

- Empuxo em Repouso (nenhum deslocamento do muro e nenhuma mudança nas tensões horizontais).
- Empuxo Ativo (afastamento do muro e decréscimo das tensões horizontais).
- Empuxo Passivo (aproximação do muro e aumento das tensões horizontais).



Coeficientes de empuxo de terra

- Relação **SEMPRE** entre tensões **EFETIVAS** !

- $K = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$

- $K_a = \frac{\sigma'_a}{\sigma'_v}$

ATIVO

- $K_0 = \frac{\sigma'_{h_0}}{\sigma'_{v_0}}$

REPOUSO

(SUBSCRITO 0 INDICA
“SEM DESLOCAMENTO”)

- $K_p = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_v}$

PASSIVO

A rigor deveria ser K' (em vez de K), para explicitar o “efetivo”.

Mas, como se trata de ponto pacífico, imaginado de conhecimento geral, em todo o tratamento do assunto “empuxos” é usual não utilizar o apóstrofo.

Coeficiente(s) de empuxo de água

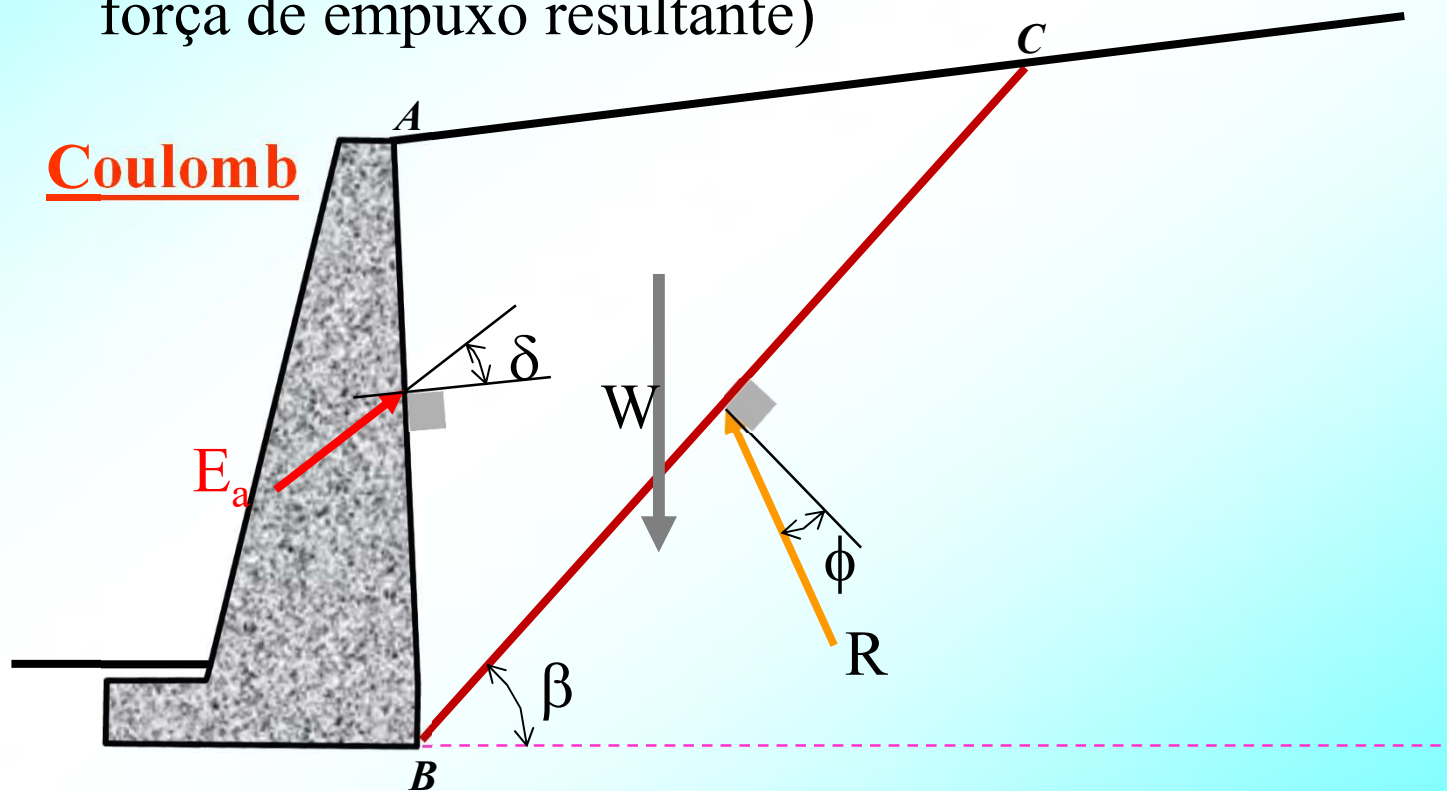
- $K_w = \frac{u_h}{u_v} = 1$

- $K_a = \frac{u_a}{u_v} = 1$ ATIVO

- $K_0 = \frac{u_{h0}}{u_{v0}} = 1$ REPOUSO
(SUBSCRITO 0 INDICA “SEM DESLOCAMENTO”)

- $K_p = \frac{u_p}{u_h} = 1$ PASSIVO

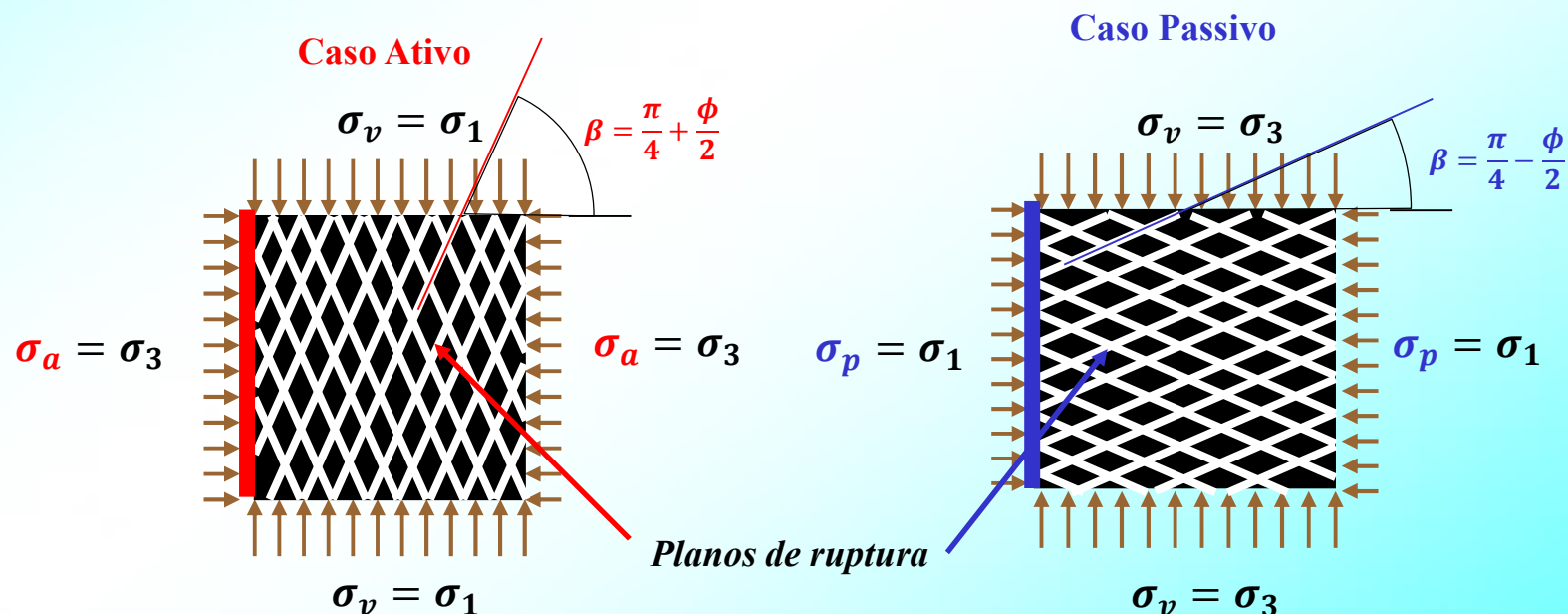
- Teoria de Empuxo de Coulomb (1776):
 - admite atrito entre o muro e o solo
 - admite superfície de escorregamento plana
 - não faz hipótese sobre forma do diagrama (só calcula força de empuxo resultante)



➤ Teoria de Empuxo de Rankine (1857) admite (em sua forma original):

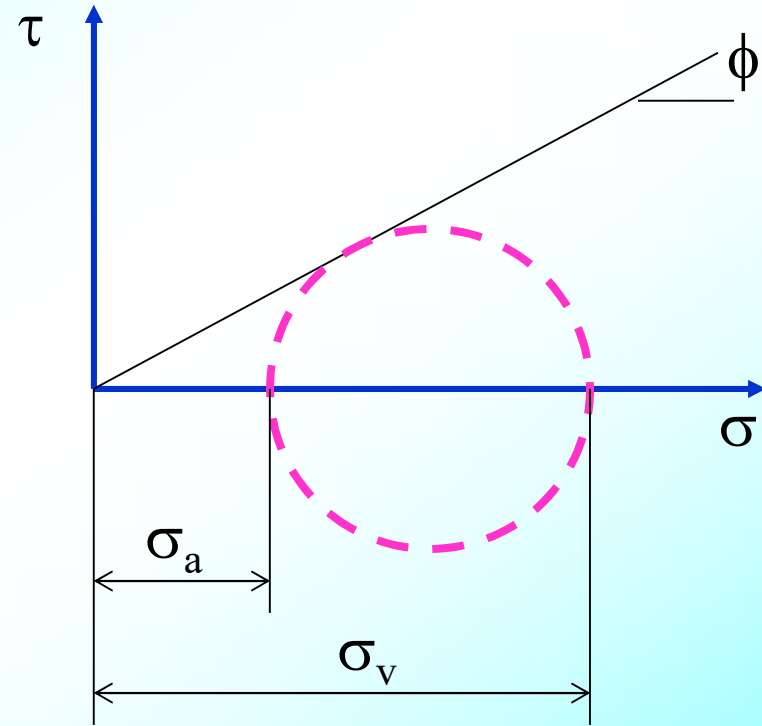
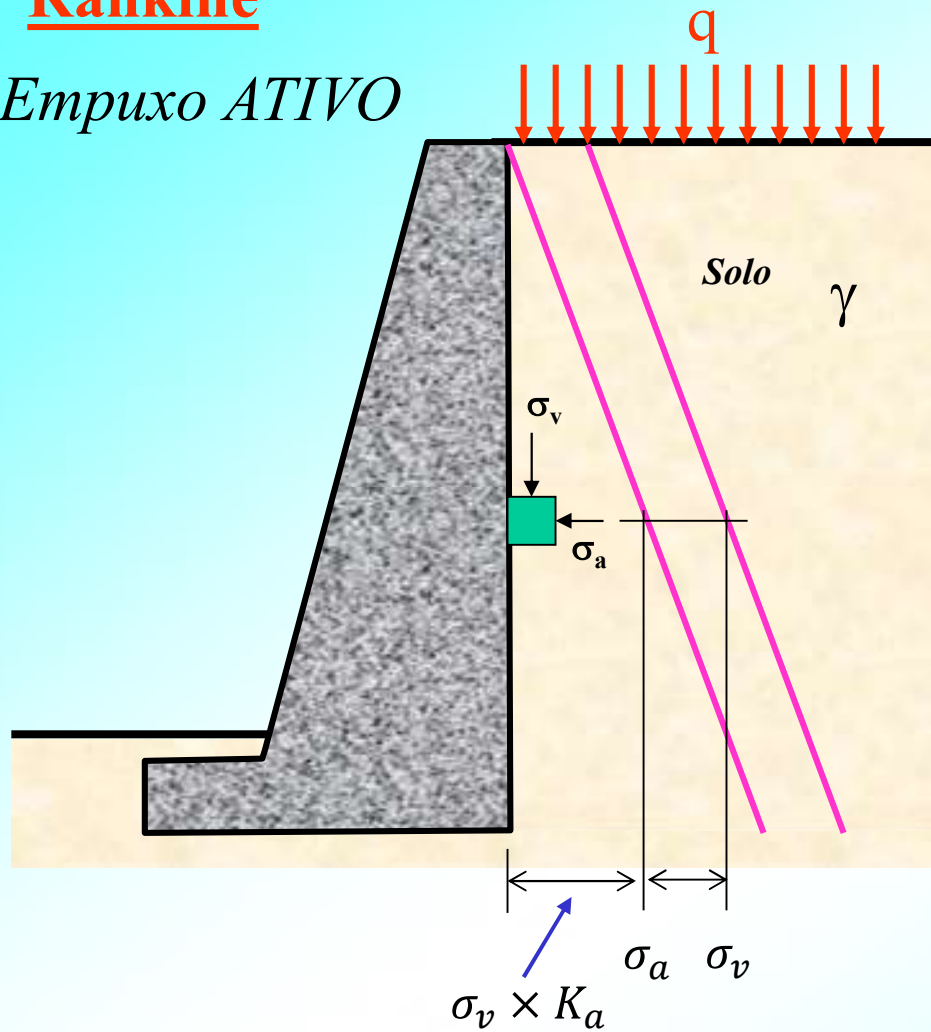
- interface muro-solo sem atrito
- paramento do muro é vertical
- o terrapleno é horizontal
- o muro é flexível e em semi-espaco infinito
- solo não coesivo

Diagrama triangular de tensões de empuxo decorre



Rankine

Empuxo ATIVO

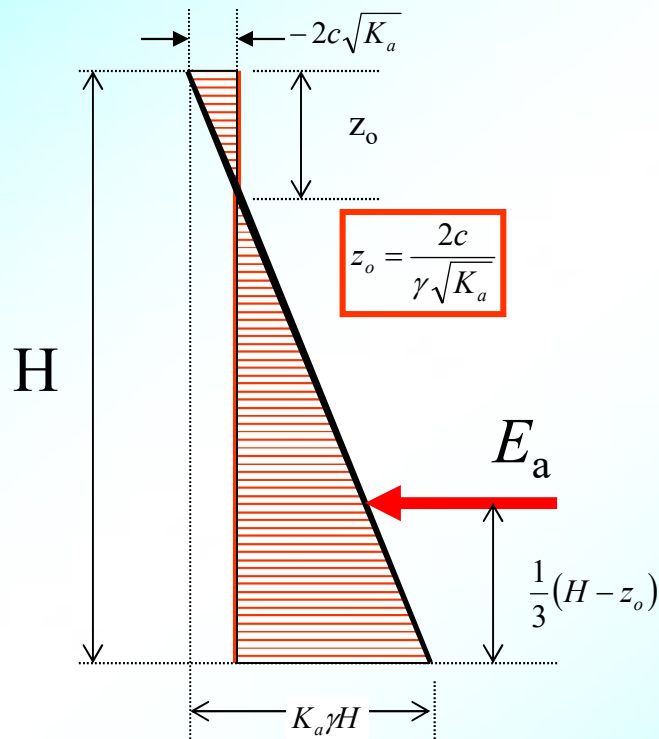


$$K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right)$$

RELEBRANDO: O COEFICIENTE DE EMPUXO SÓ SE APLICA A TENSÕES EFETIVAS

Rankine

**Distribuição do empuxo ATIVO
(sem sobrecarga superficial)**



$$\sigma_a = K_a \gamma z - 2c\sqrt{K_a}$$

K_a - coeficiente de empuxo ativo

$$E_a = \int_{z_0}^H \sigma_a dz \quad (\text{desconsiderada a tração})$$

$$E_a = \frac{1}{2} K_a \gamma (H^2 - z_0^2) - 2c\sqrt{K_a} (H - z_0)$$

$$E_a = \frac{K_a \gamma (H - z_0)^2}{2} \quad \text{Força de empuxo ATIVO}$$

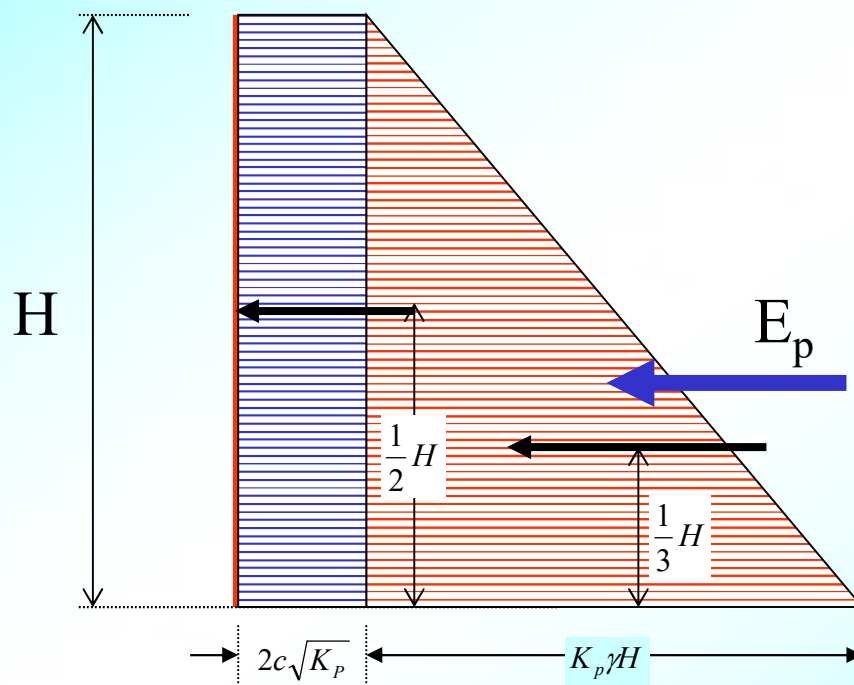
Rankine

$$\sigma_p = K_p \gamma z + 2c\sqrt{K_p}$$

K_p - coeficiente de empuxo passivo

$$K_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right)$$

Distribuição do empuxo PASSIVO

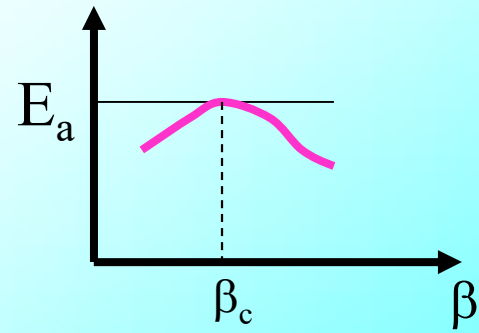
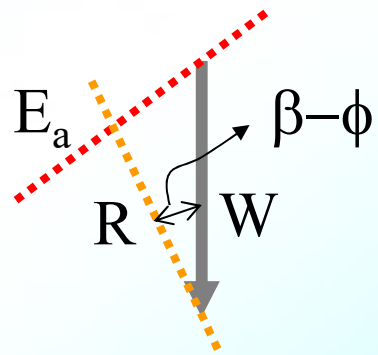
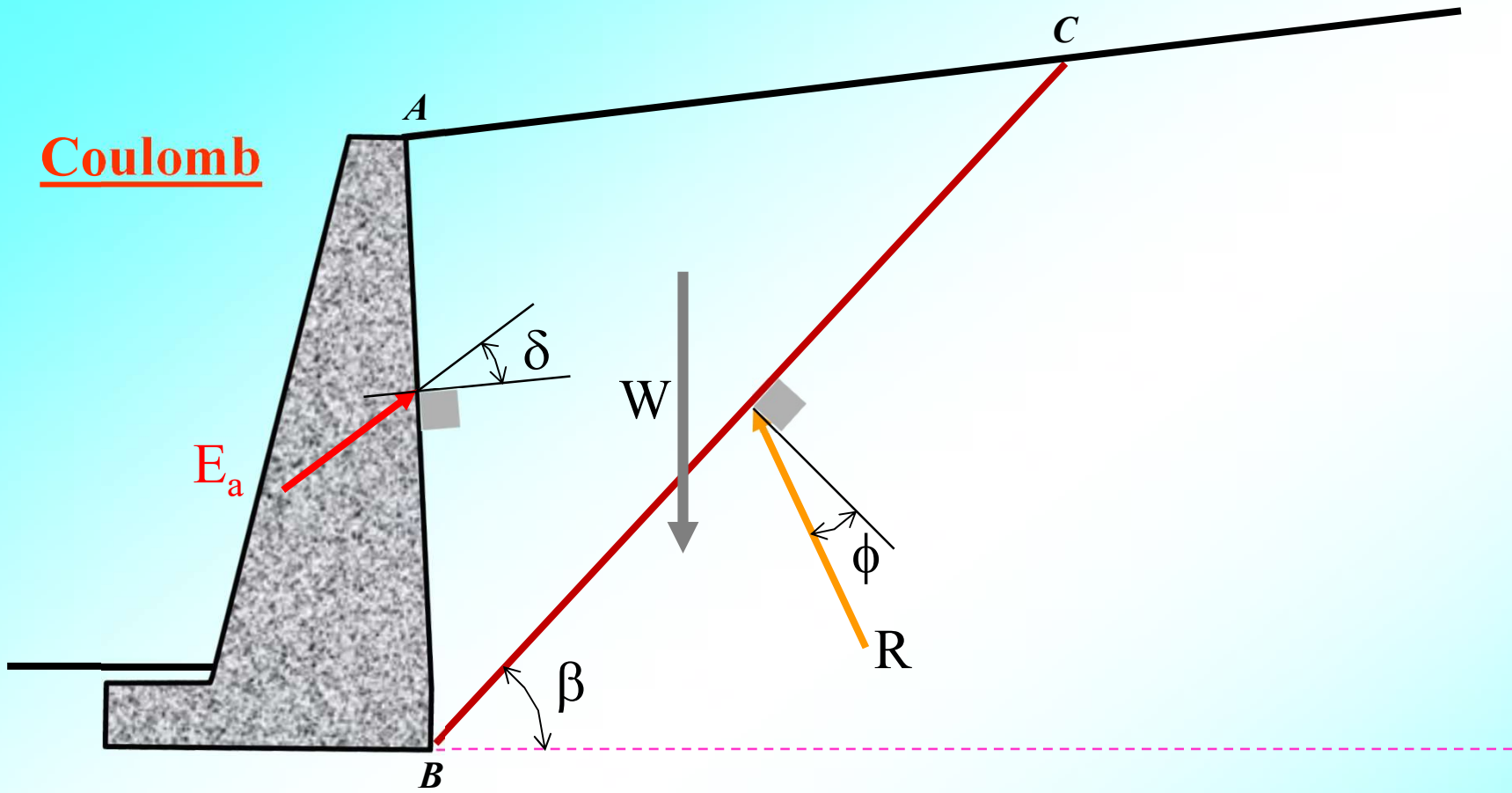


$$E_p = \int_{z_0}^H \sigma_p dz$$

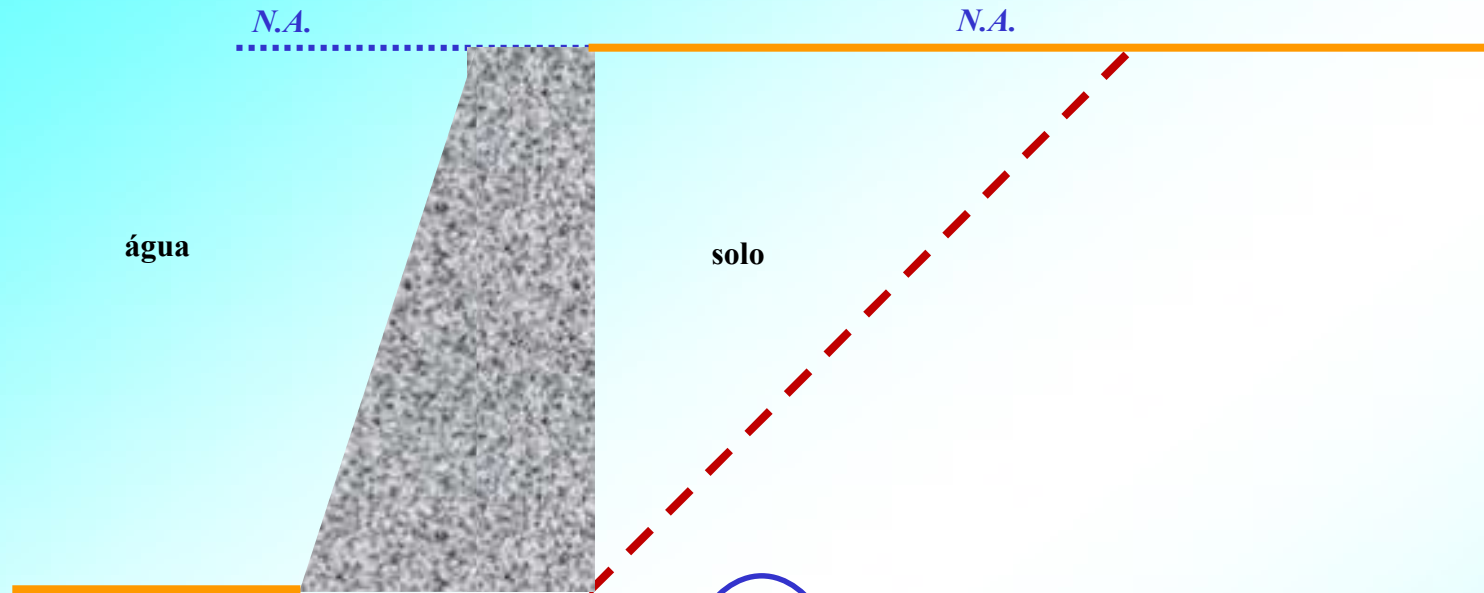
$$E_p = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2 + 2cH \sqrt{K_p}$$

Força de empuxo PASSIVO

Coulomb



Muro Submerso



$$E_a = \frac{1}{2} \gamma_w H^2 + \frac{1}{2} \gamma_{sub} H^2 K_a$$

E_w

Empuxo exercido pela água intersticial: possui a mesma magnitude, com ou sem a presença do solo.

Empuxo (efetivo) exercido pelo solo devido ao peso próprio. No caso do N.A. estar na superfície do terreno, o peso específico é o submerso.

Projeto de Muros de Arrimo – o essencial

- ❖ **Função do muro (tipos diferentes para propósitos diferentes)**
- ❖ **Condições necessárias para qualquer bom projeto de qualquer muro**
 - ❖ **Conhecimento pleno de tipos de empuxos, condições de manifestação, modelos de cálculo**
 - ❖ **Perfeito entendimento de fluxo de água em meios porosos**
 - ❖ **Perfeito entendimento do papel da drenagem**

Projeto de Muros de Arrimo - parâmetros

❖ Propriedades dos solos (do terrapleno e da fundação)

- Peso específico**
- Ângulo de atrito**
- Coesão**

❖ Propriedades da interface

- Ângulo de atrito solo-muro**

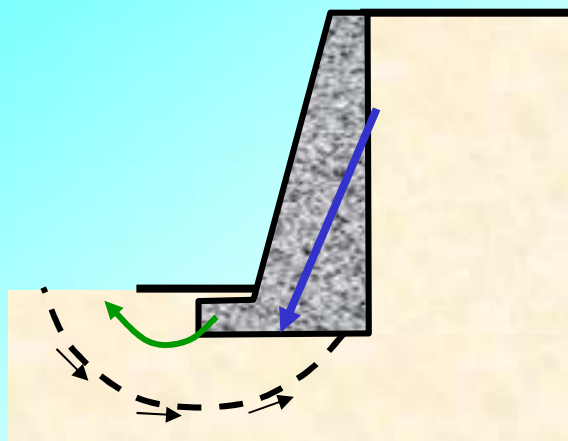
Projeto de Muros de Arrimo – verificações de segurança

❖ Segurança geotécnica

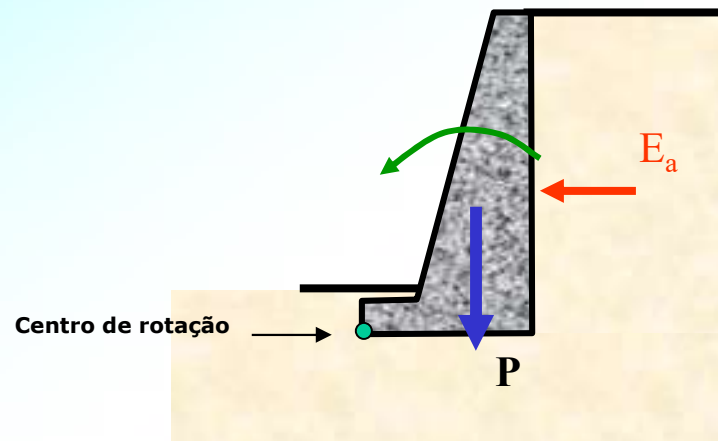
- Deslizamento (ou escorregamento)**
- Tombamento (ou rotação pelo pé)**
- Carga última de fundação**
- Estabilidade global (ou ruptura geral)**

❖ Segurança estrutural das sessões do próprio muro como elemento estrutural

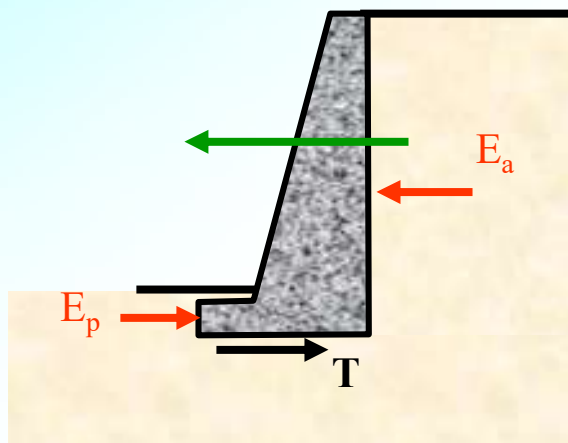
Mecanismos de Ruptura



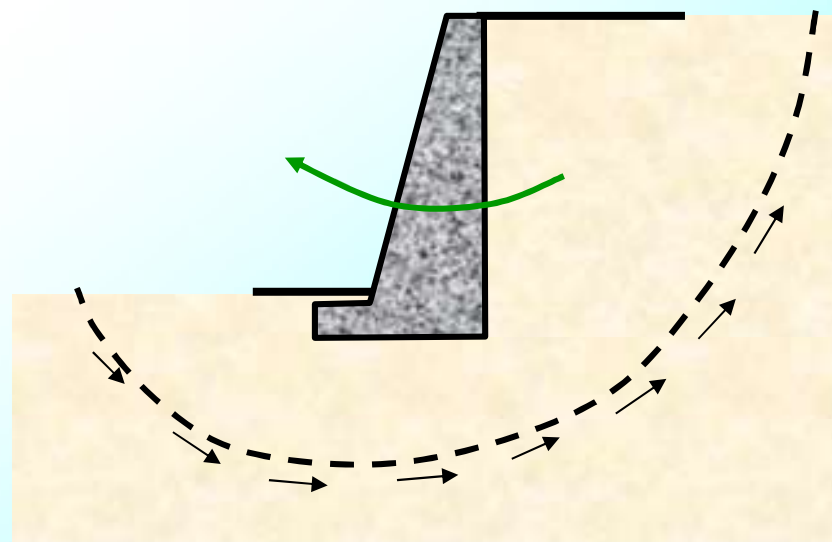
Carga última de fundação



Tombamento

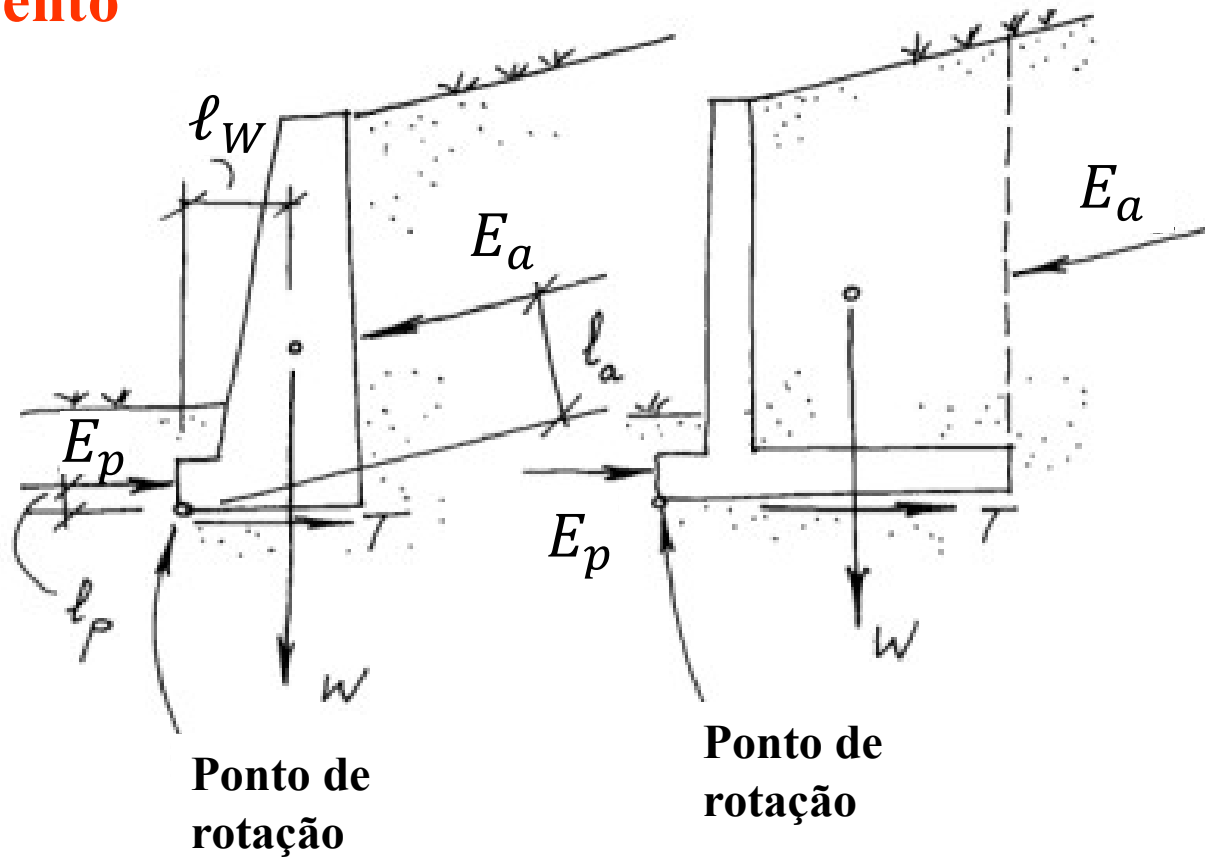


Deslizamento



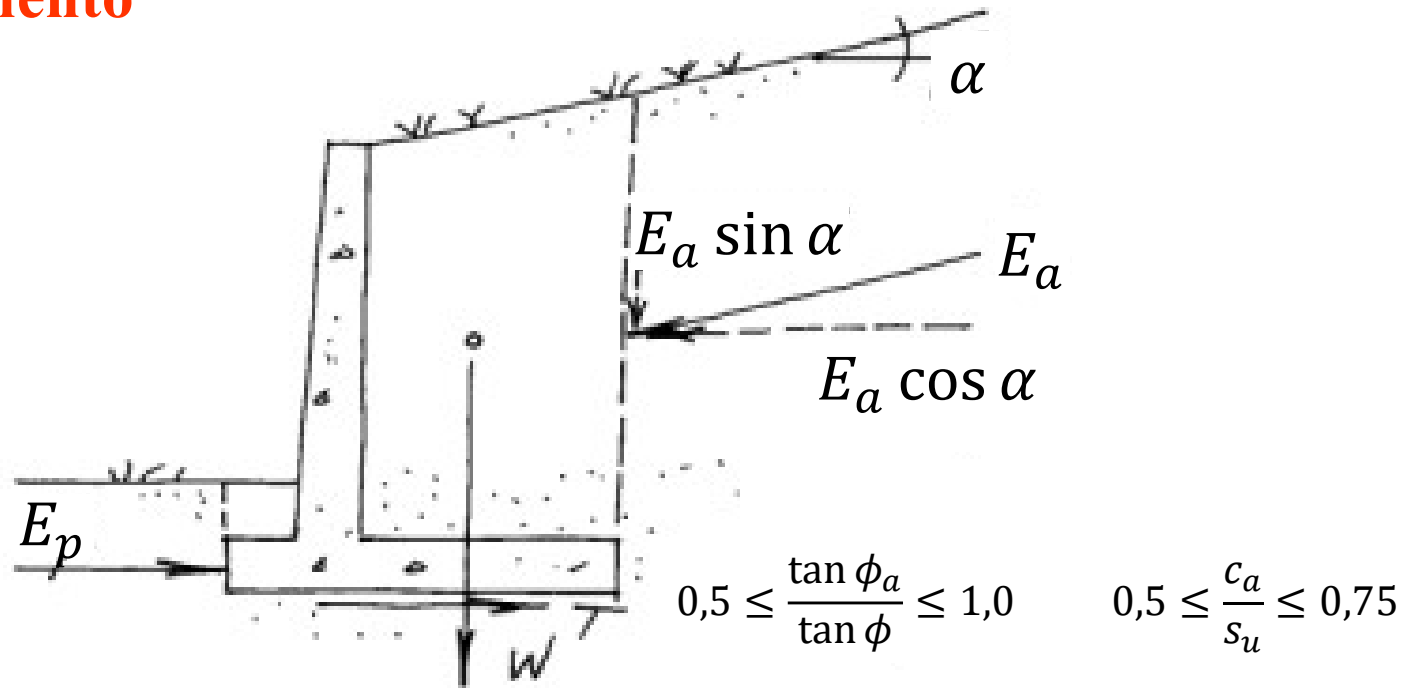
Estabilidade global

Tombamento



$$FS = \frac{\sum \text{Momentos resistentes}}{\sum \text{Momentos atuantes}} \geq 1,5$$

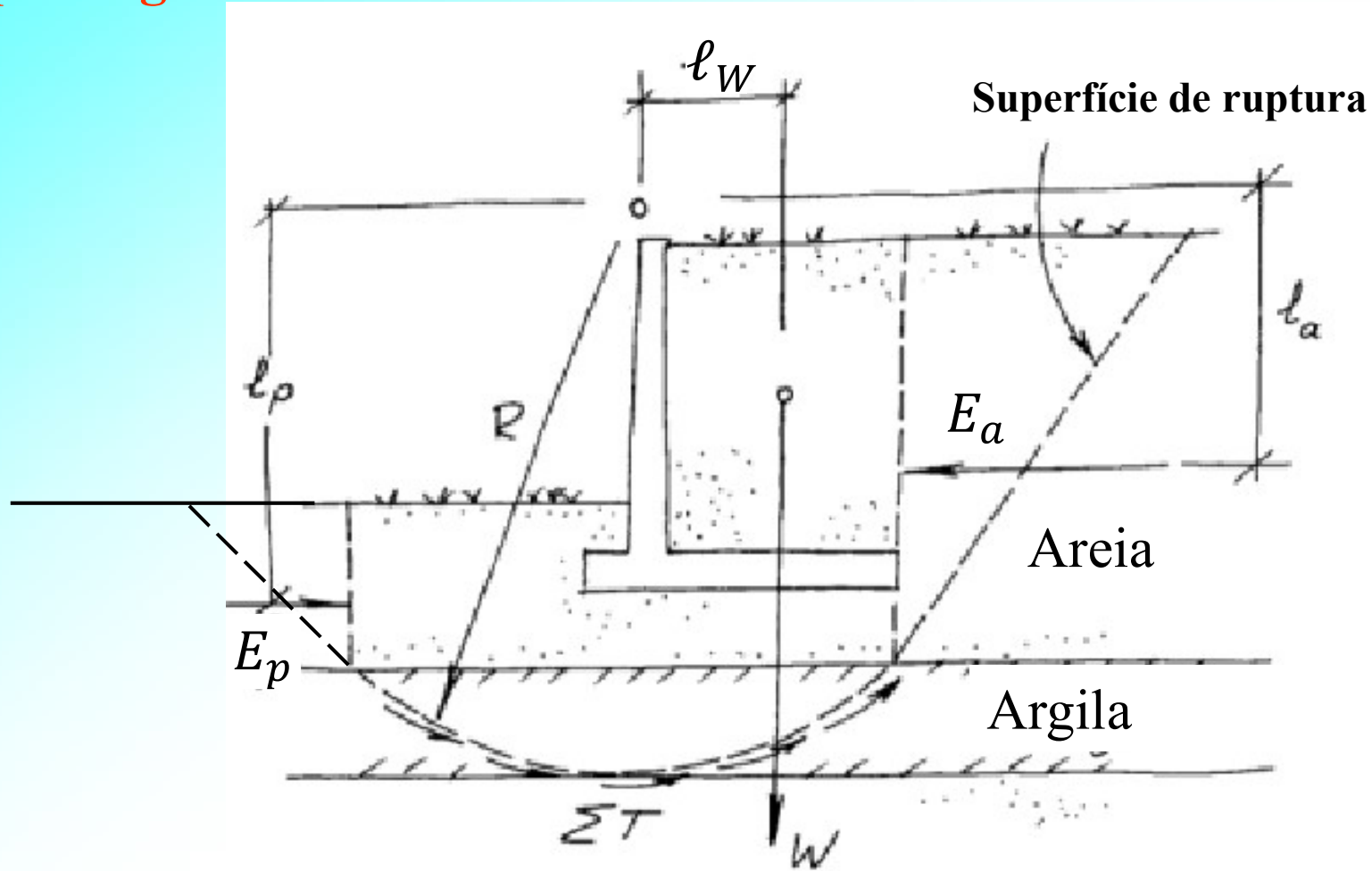
Deslizamento



$$F = \frac{\sum \text{forças resistentes}}{\sum \text{forças atuantes}} \geq 1,5$$

(há quem adote $\geq 2,0$ para argilas)

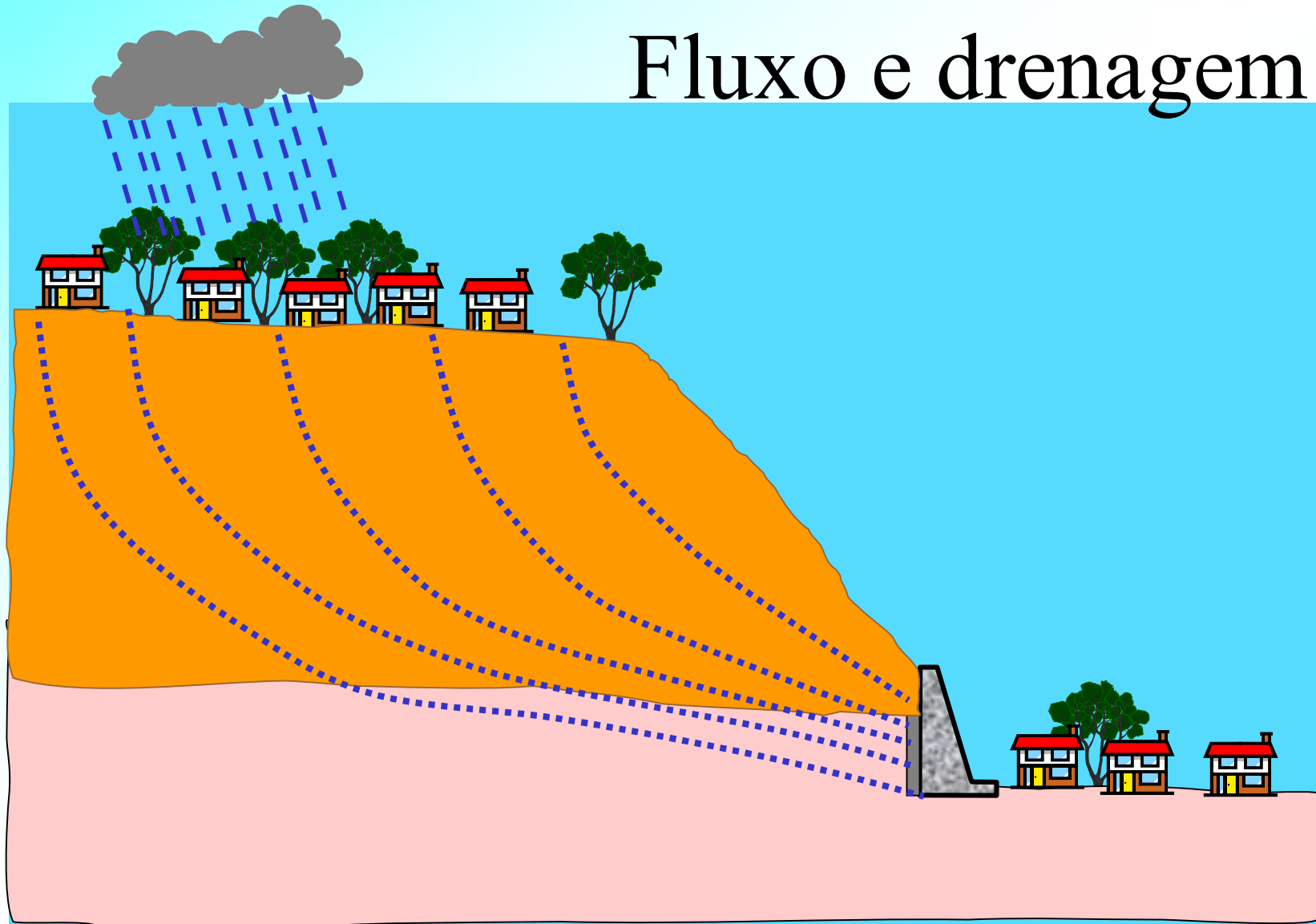
Ruptura geral

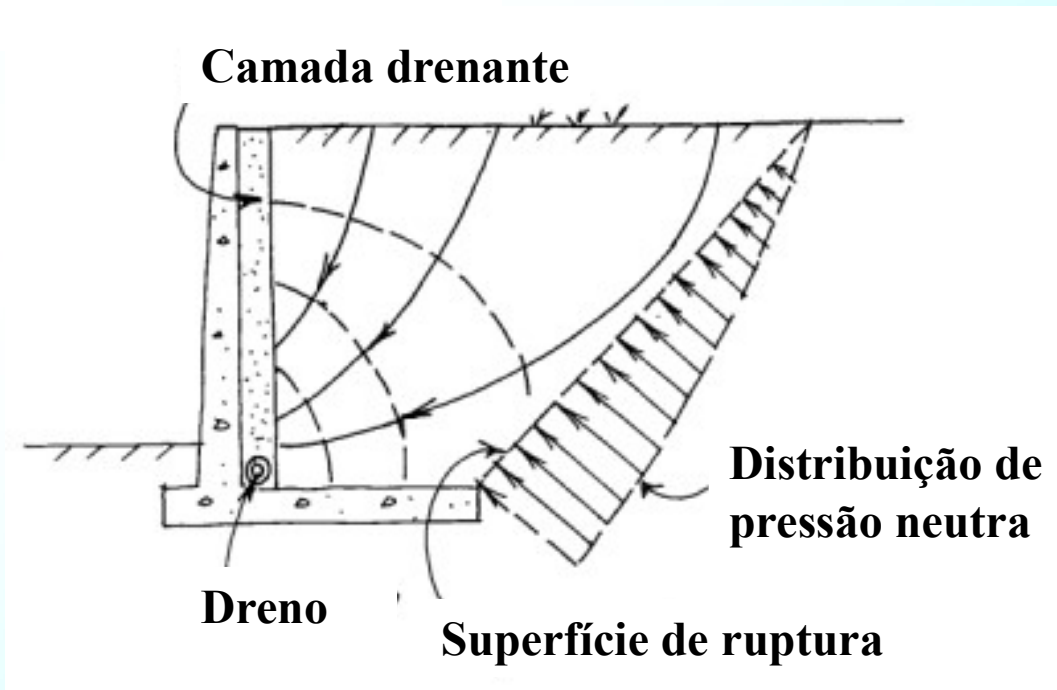
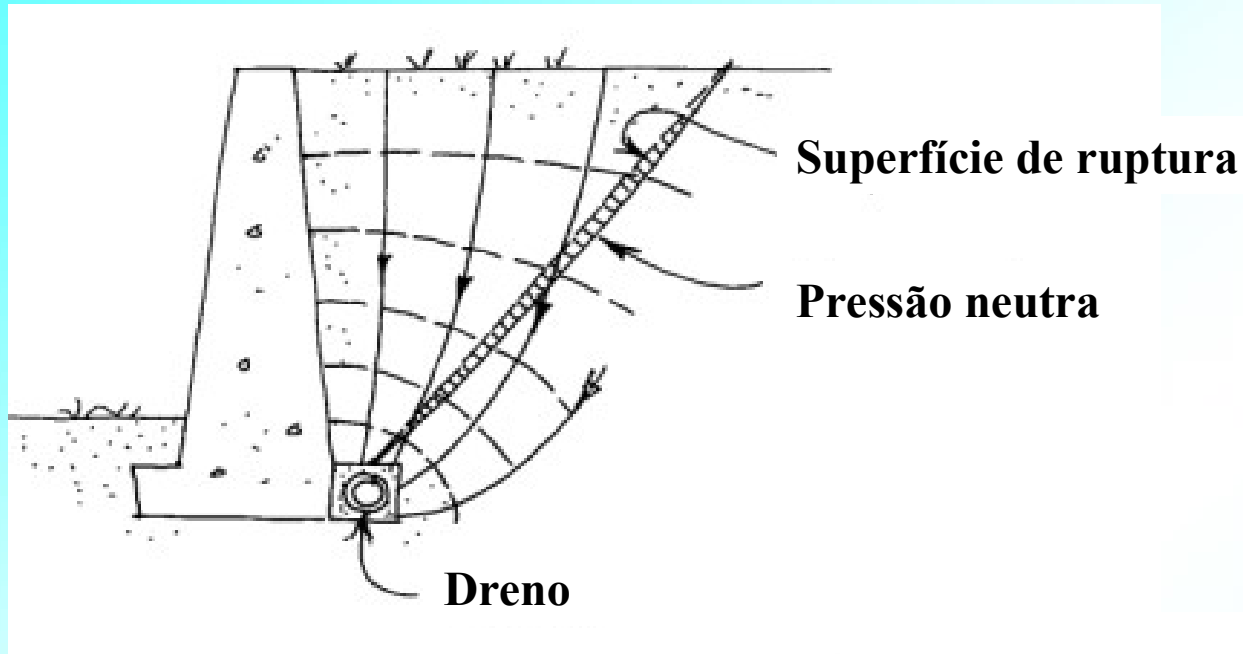


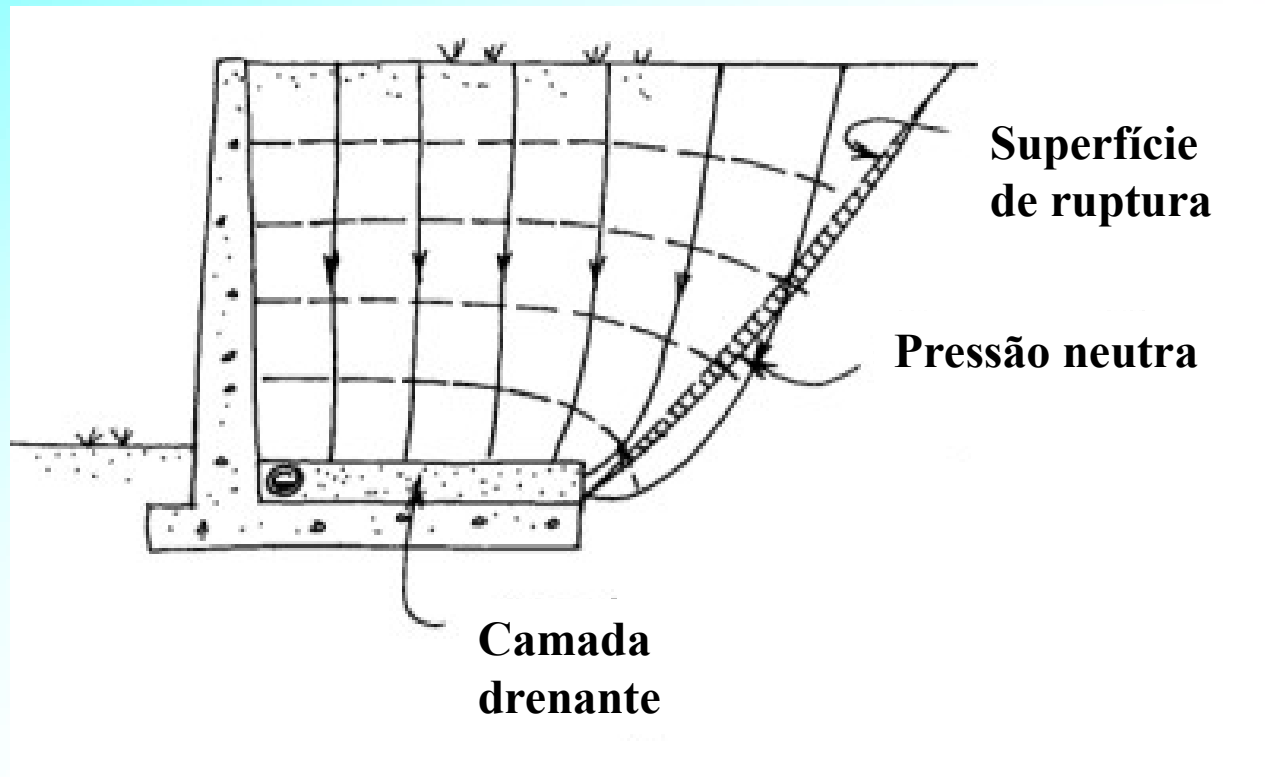
$$F = \frac{\sum \text{momentos resistentes}}{\sum \text{momentos atuantes}} \geq 1,5$$

Verificação pode ser feita pelos processos usuais (Bishop, por exemplo)

Fluxo e drenagem







Importante: fluxo vertical \Rightarrow pressões neutras nulas!

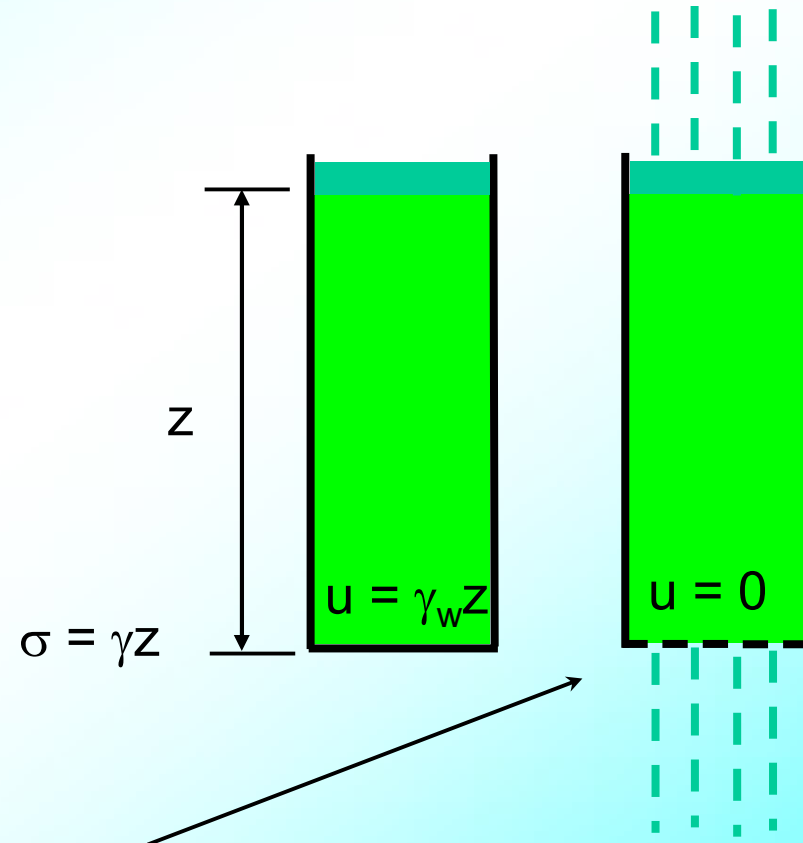
Effective stress

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

σ' (red) σ (green) $-$ u (blue)

↓ ↓ ↓

governs all soil behaviour $(q + \gamma z)$ pore pressure



Importante: fluxo vertical \Rightarrow pressões neutras nulas!