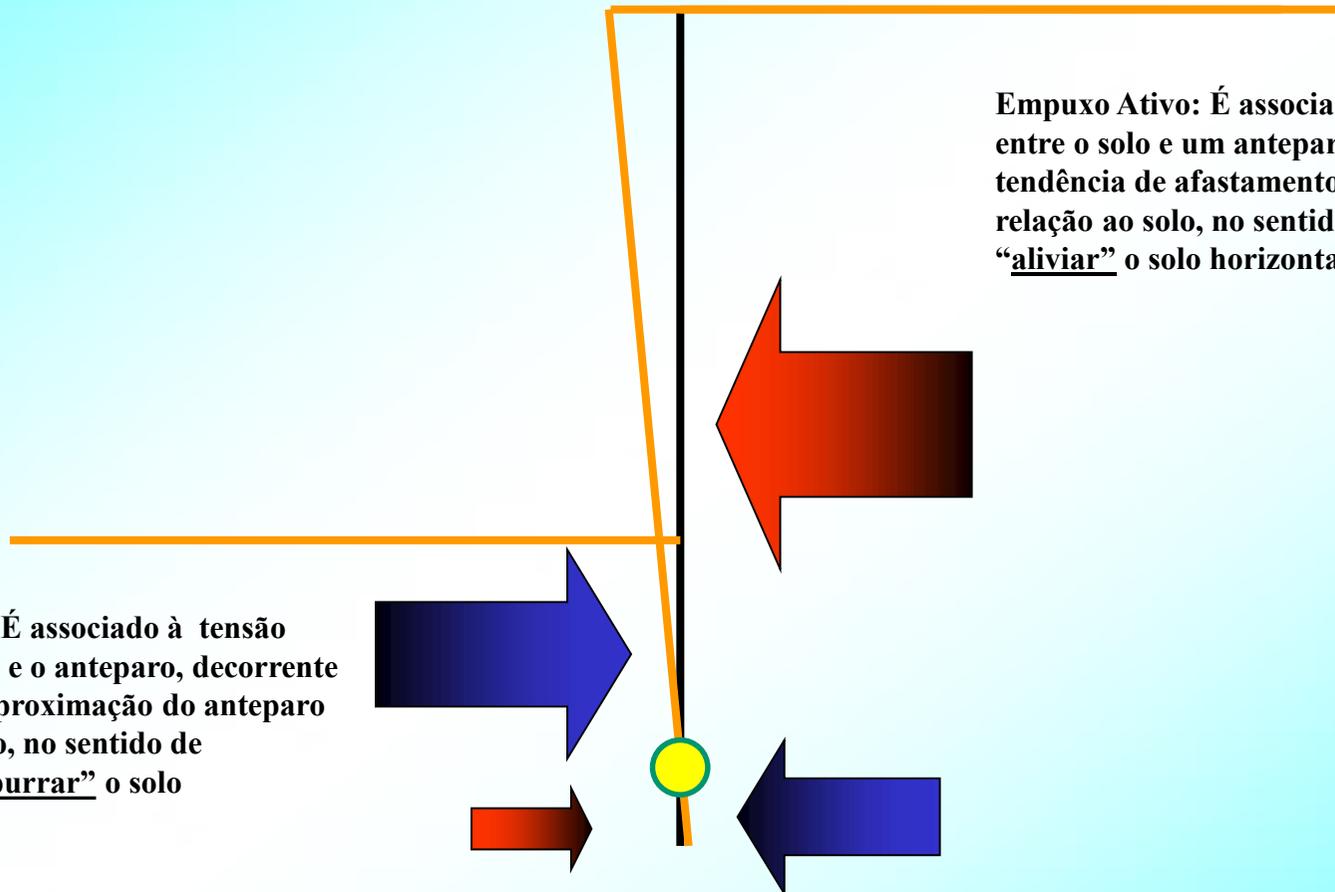


**Fundações**  
**PEF 3405**

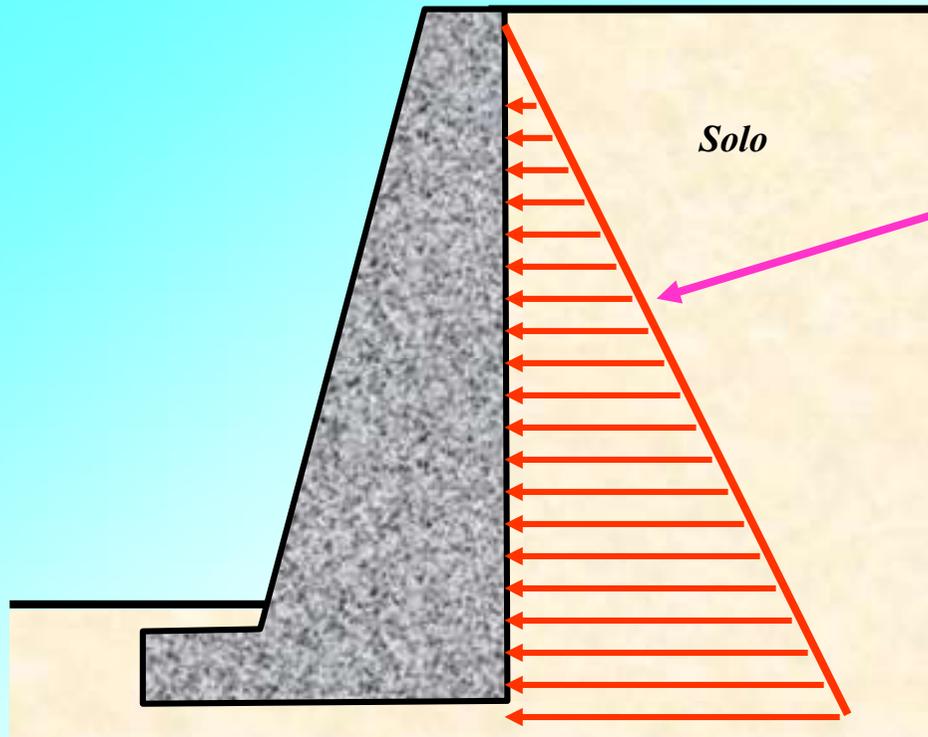
**EMPUXOS DE TERRA**  
**RESUMO**

**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.

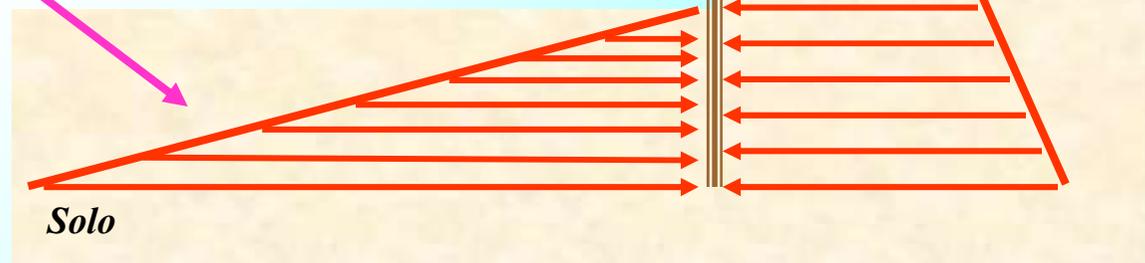


**Empuxo Ativo:** É associado à tensão limite entre o solo e um anteparo, decorrente de tendência de afastamento do anteparo em relação ao solo, no sentido de expandir / “aliviar” o solo horizontalmente.



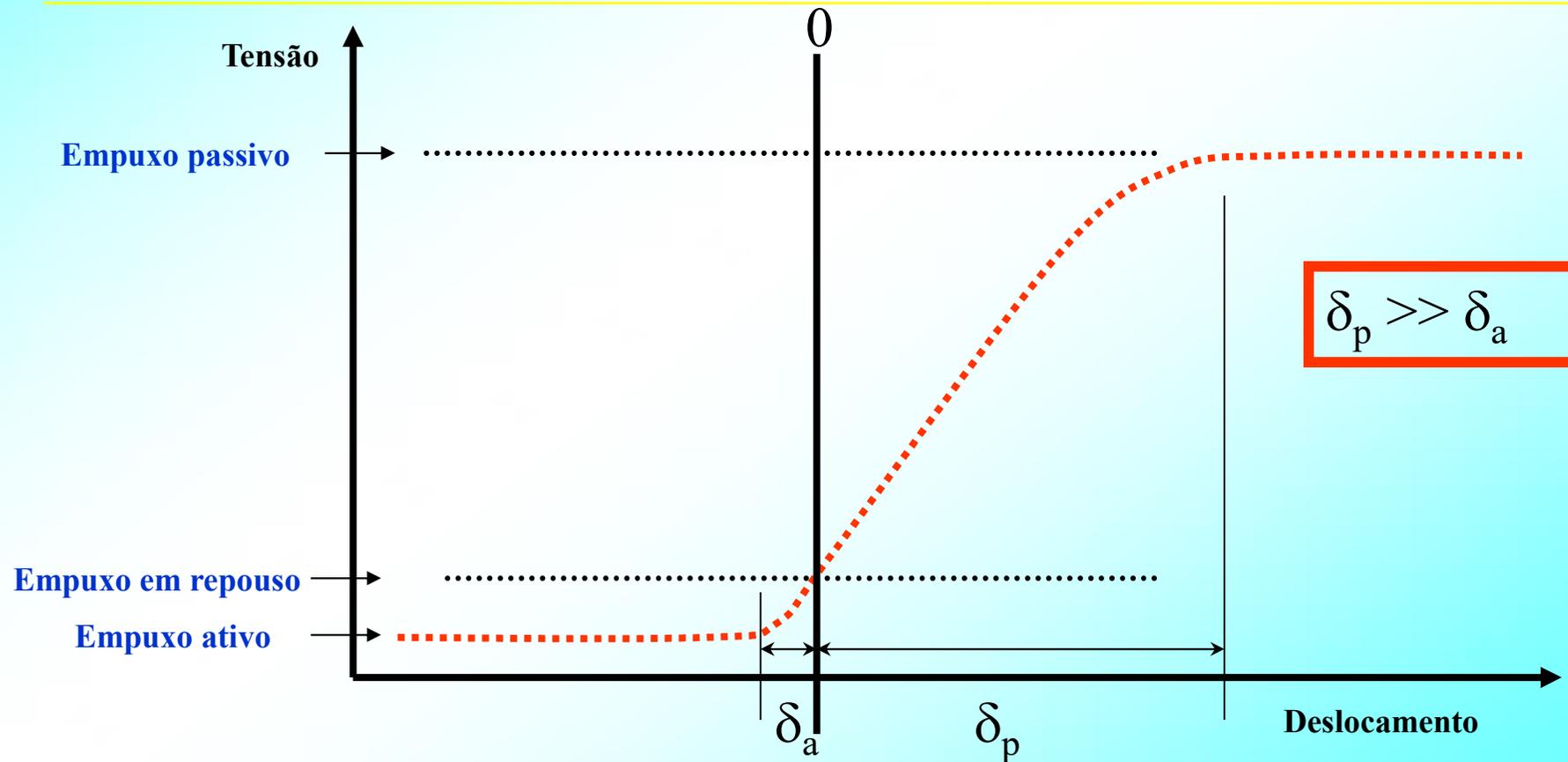
*Distribuição teórica do empuxo ativo*

*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

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

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

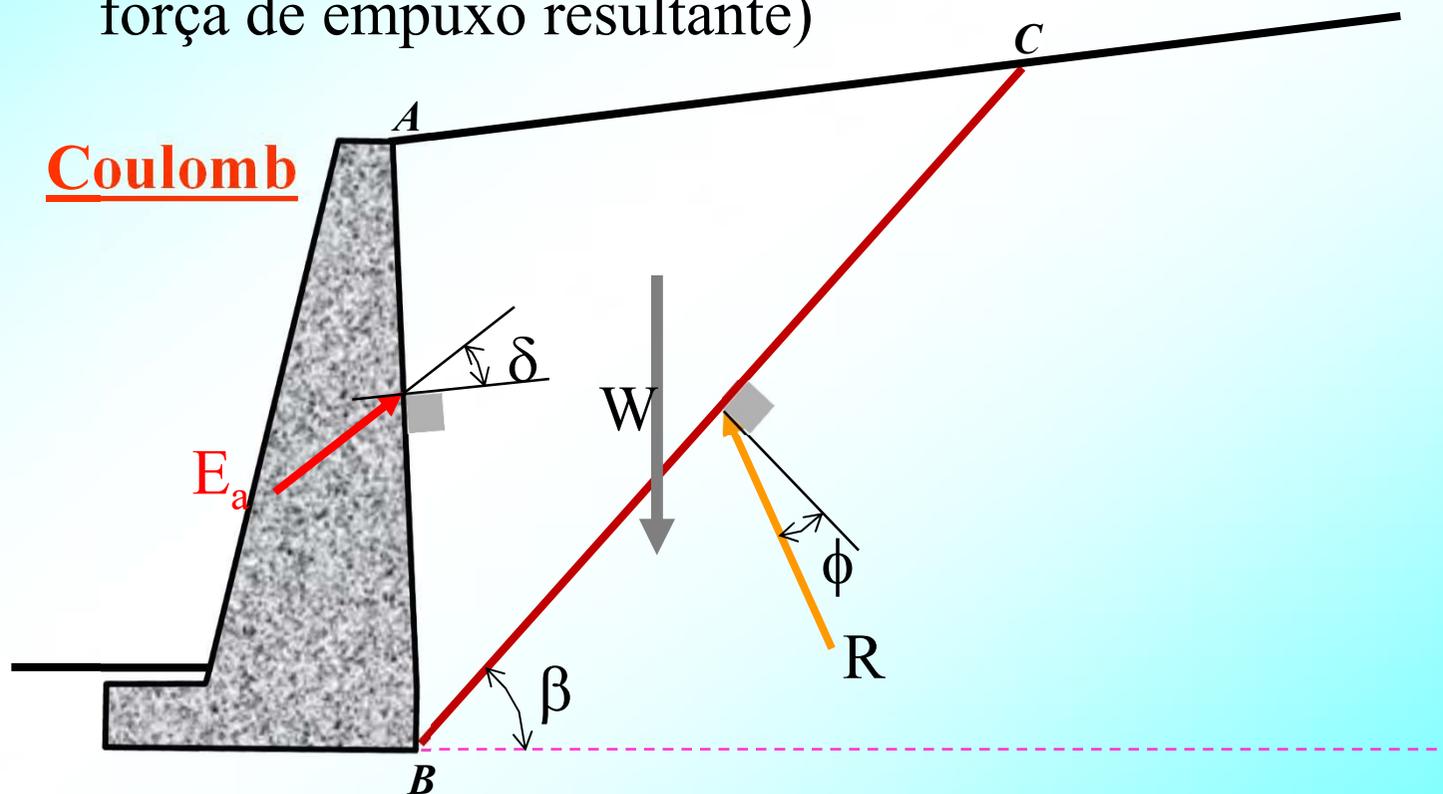
- $K_w = \frac{u_h}{u_v} = 1$

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

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

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

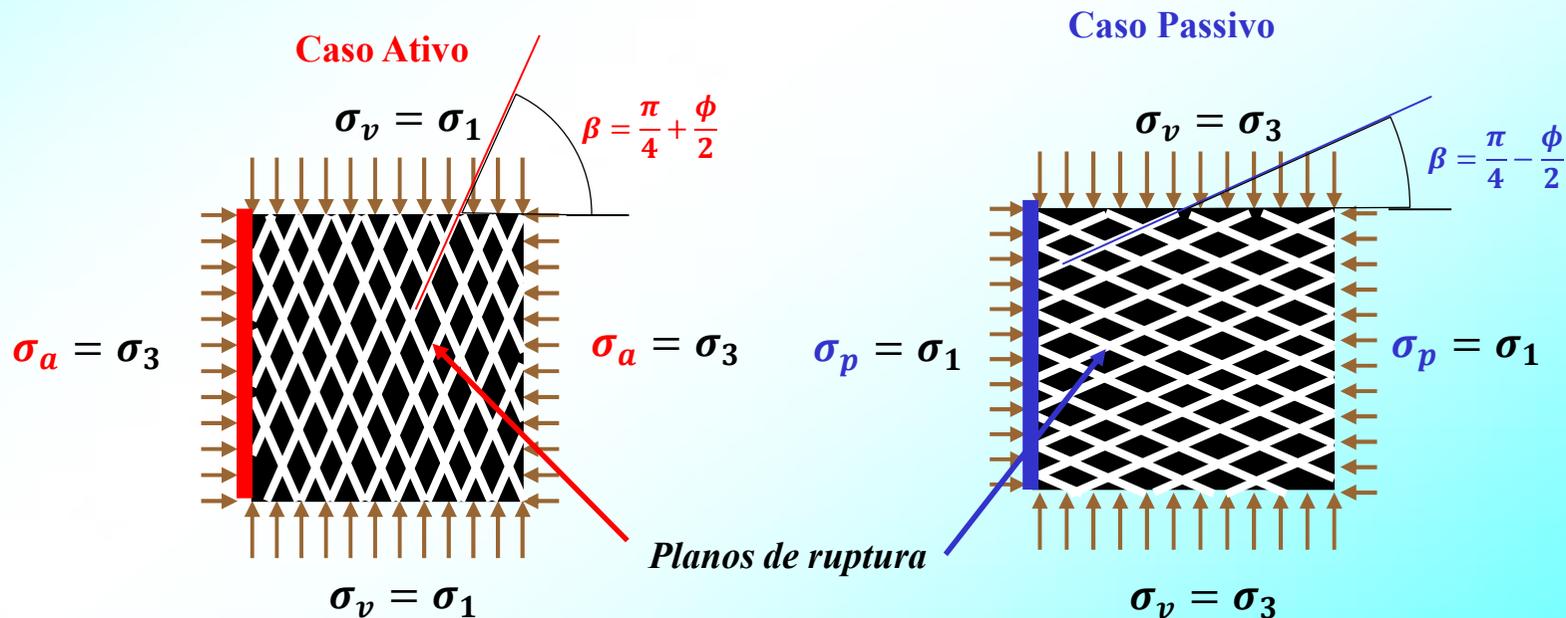
- Teoria de Empuxo de Coulomb (1776):
  - admite atrito entre o muro e o solo
  - admite superfície de escorregamento plana
  - não faz hipótese sobre forma do diagrama (só calcula força de empuxo resultante)



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

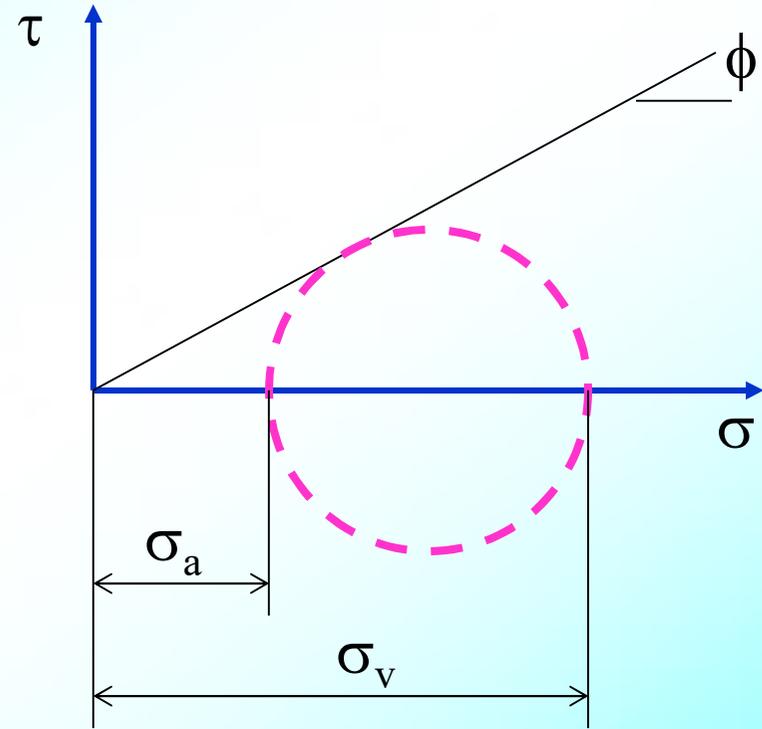
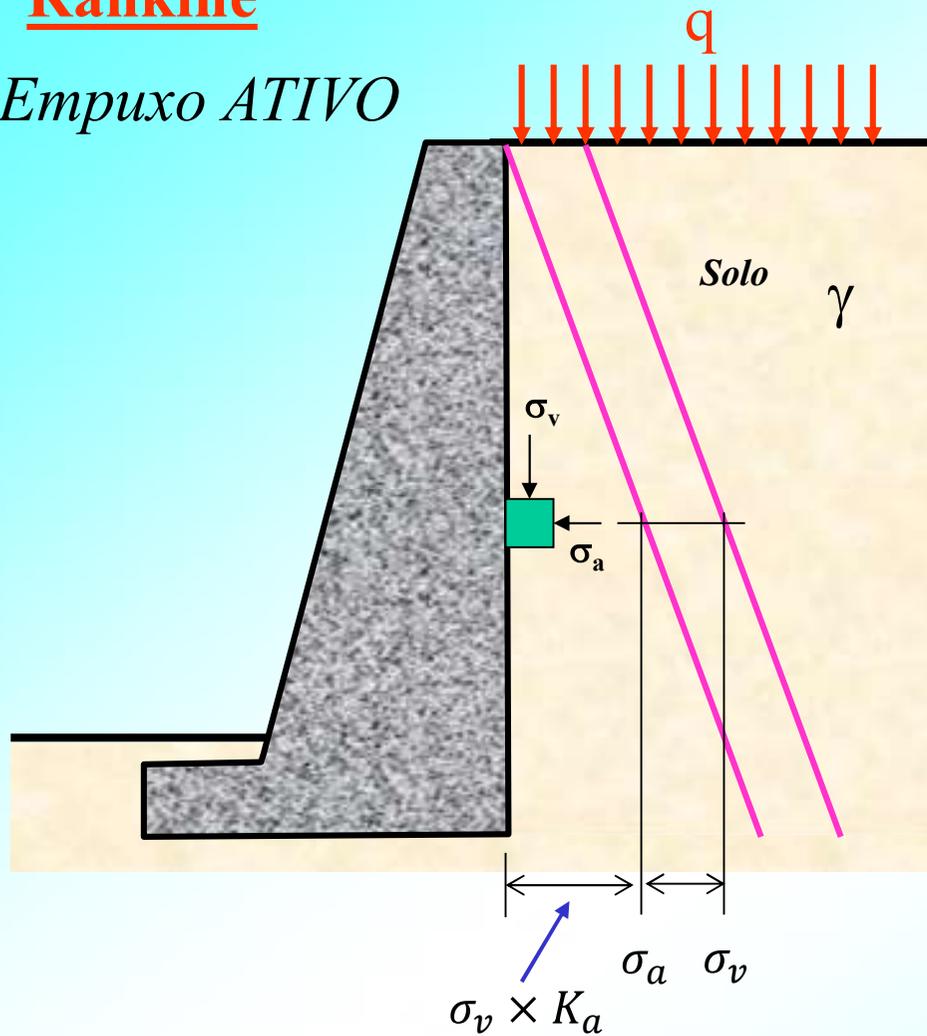
- interface muro-solo sem atrito
- paramento do muro é vertical
- o terrapleno é horizontal
- o muro é flexível e em semi-espaco infinito
- solo não coesivo

Diagrama triangular de tensões de empuxo decorre



# Rankine

*Empuxo ATIVO*

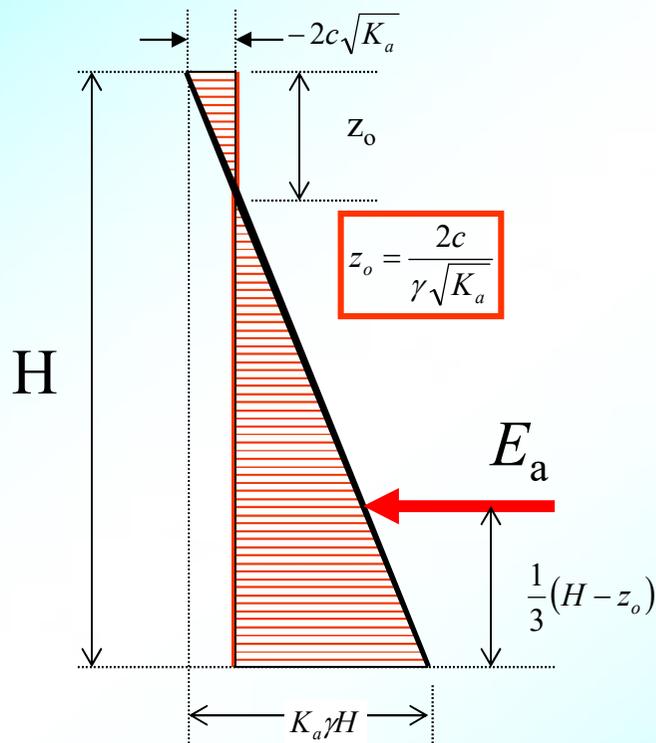


$$K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right)$$

**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

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

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

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

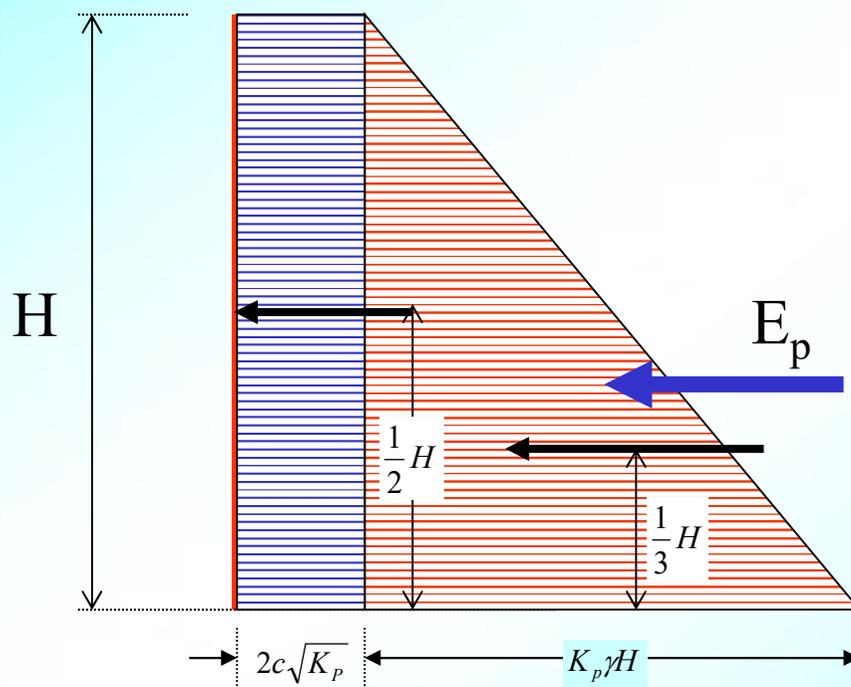
## Rankine

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

$K_p$  - coeficiente de empuxo passivo

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

**Distribuição do empuxo PASSIVO**

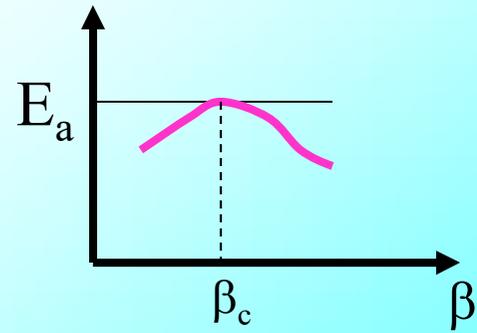
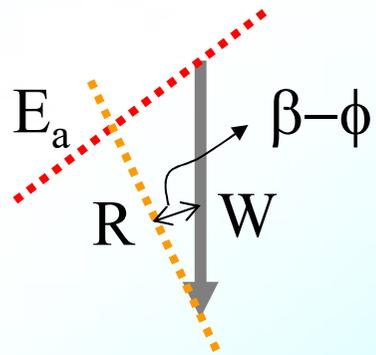
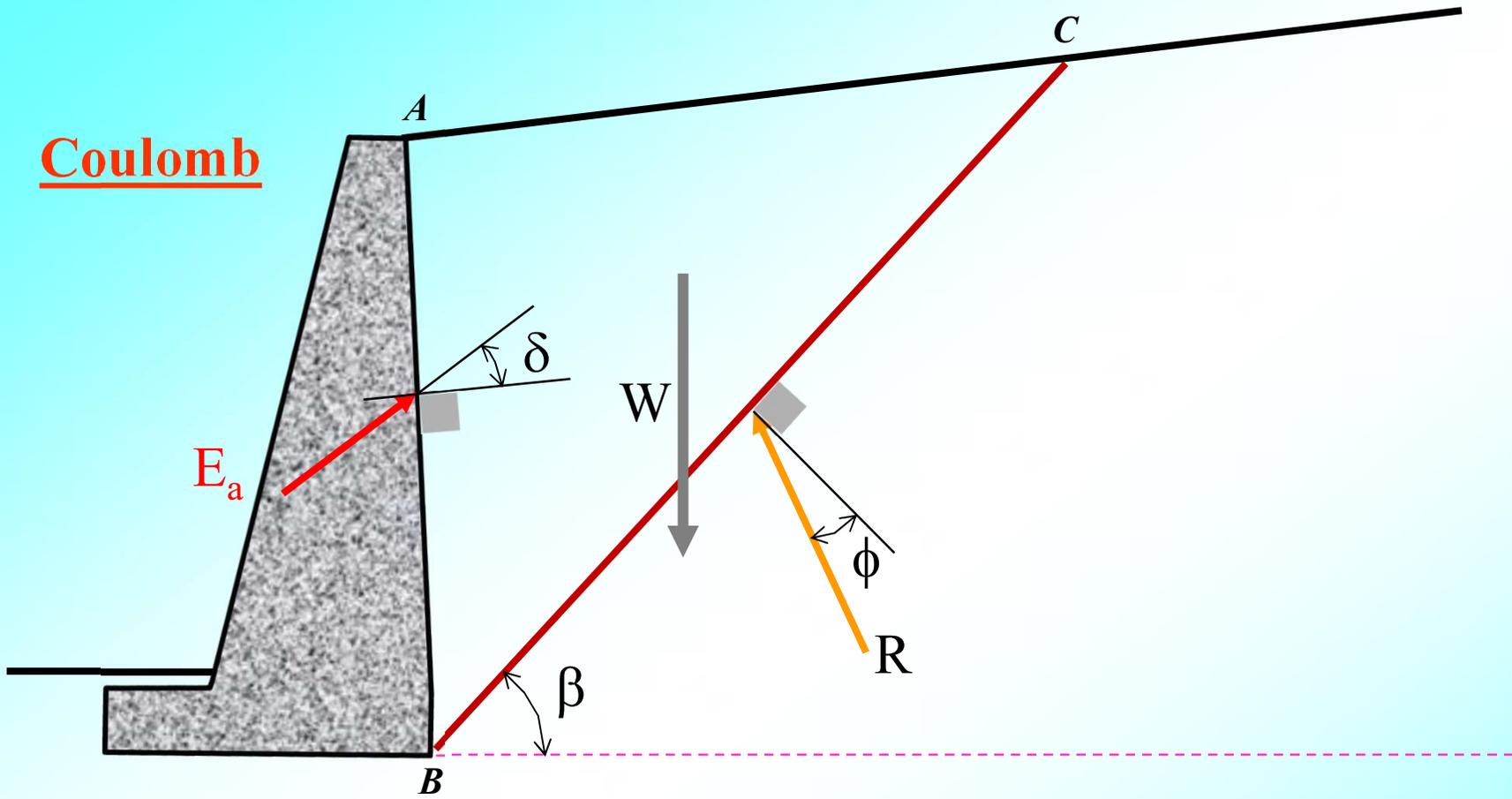


$$E_p = \int_{z_0}^H \sigma_p dz$$

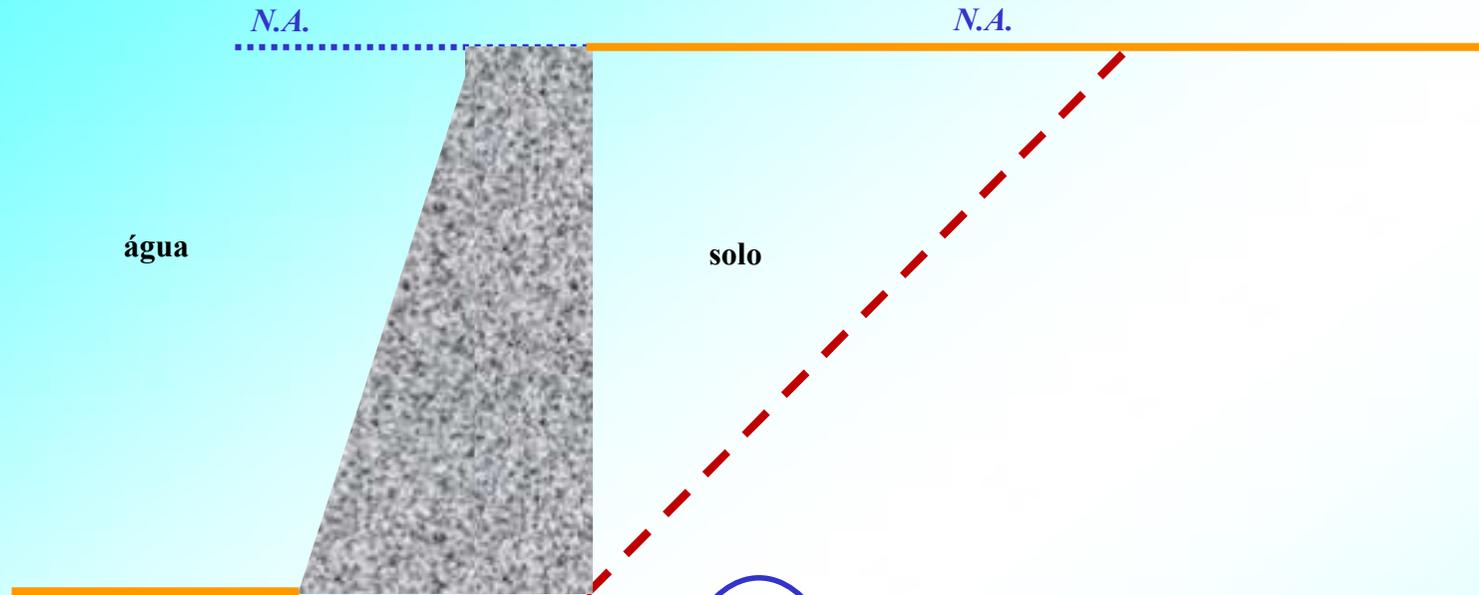
$$E_p = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2 + 2cH\sqrt{K_p}$$

**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**

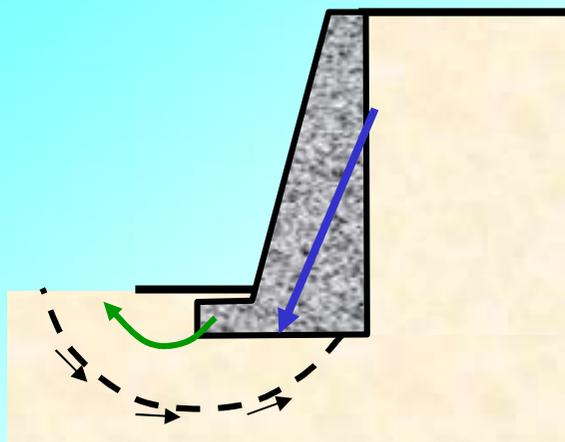
## **Projeto de Muros de Arrimo – verificações de segurança**

### **❖ Segurança geotécnica**

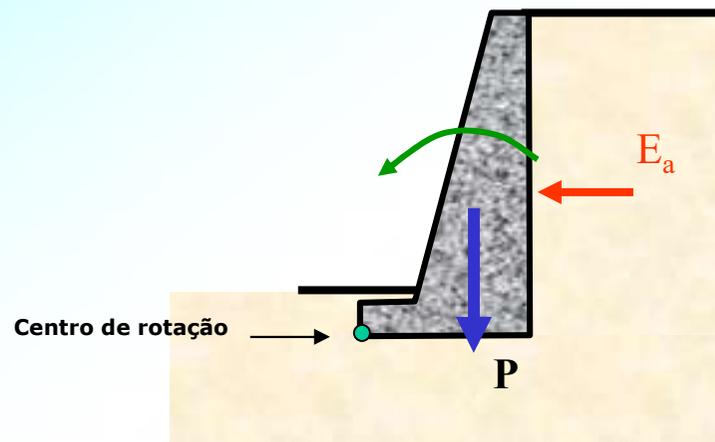
- Deslizamento (ou escorregamento)**
- Tombamento (ou rotação pelo pé)**
- Carga última de fundação**
- Estabilidade global (ou ruptura geral)**

### **❖ Segurança estrutural das sessões do próprio muro como elemento estrutural**

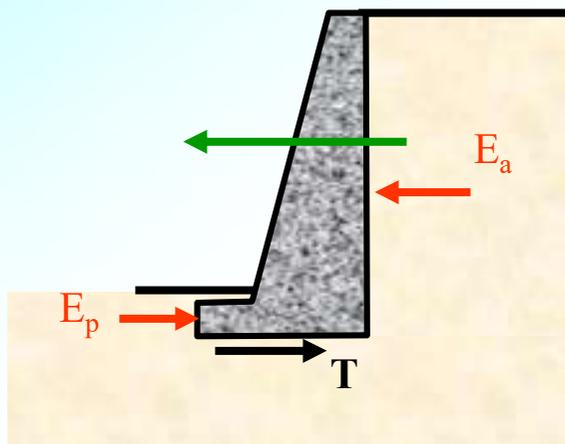
# Mecanismos de Ruptura



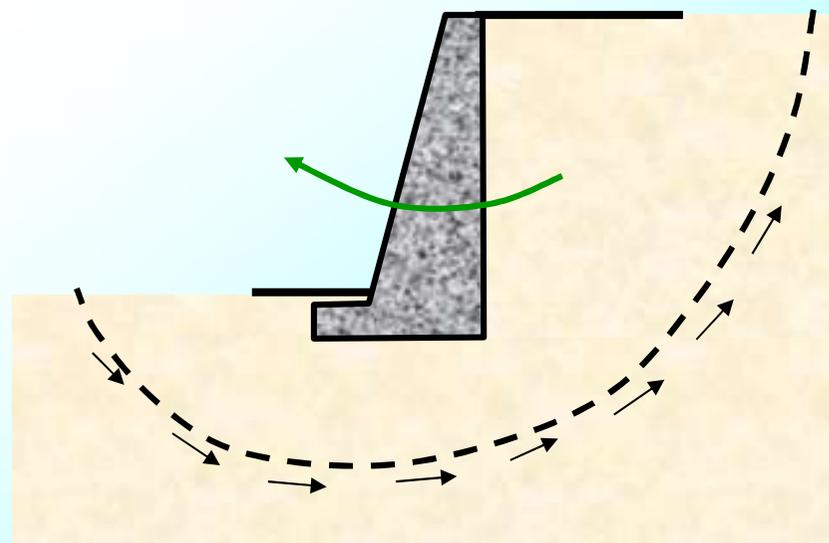
Carga última de fundação



Tombamento

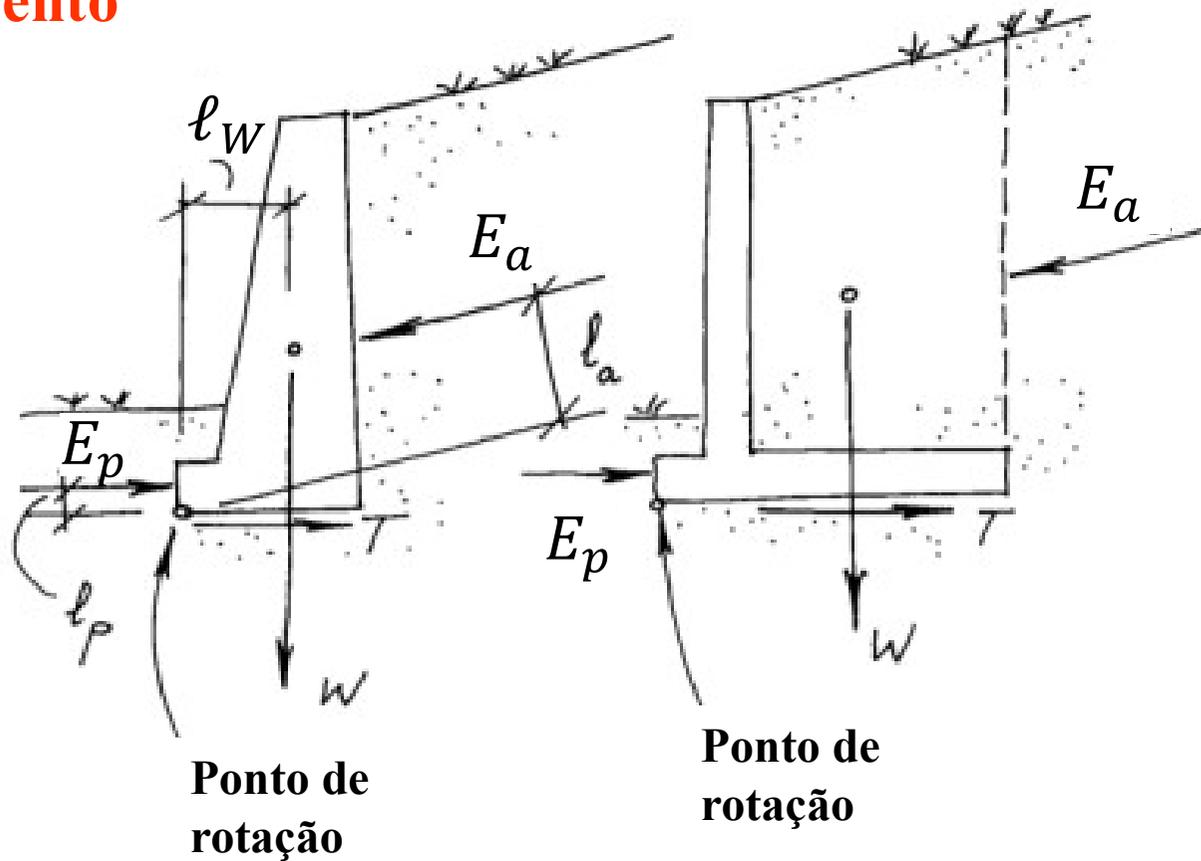


Deslizamento



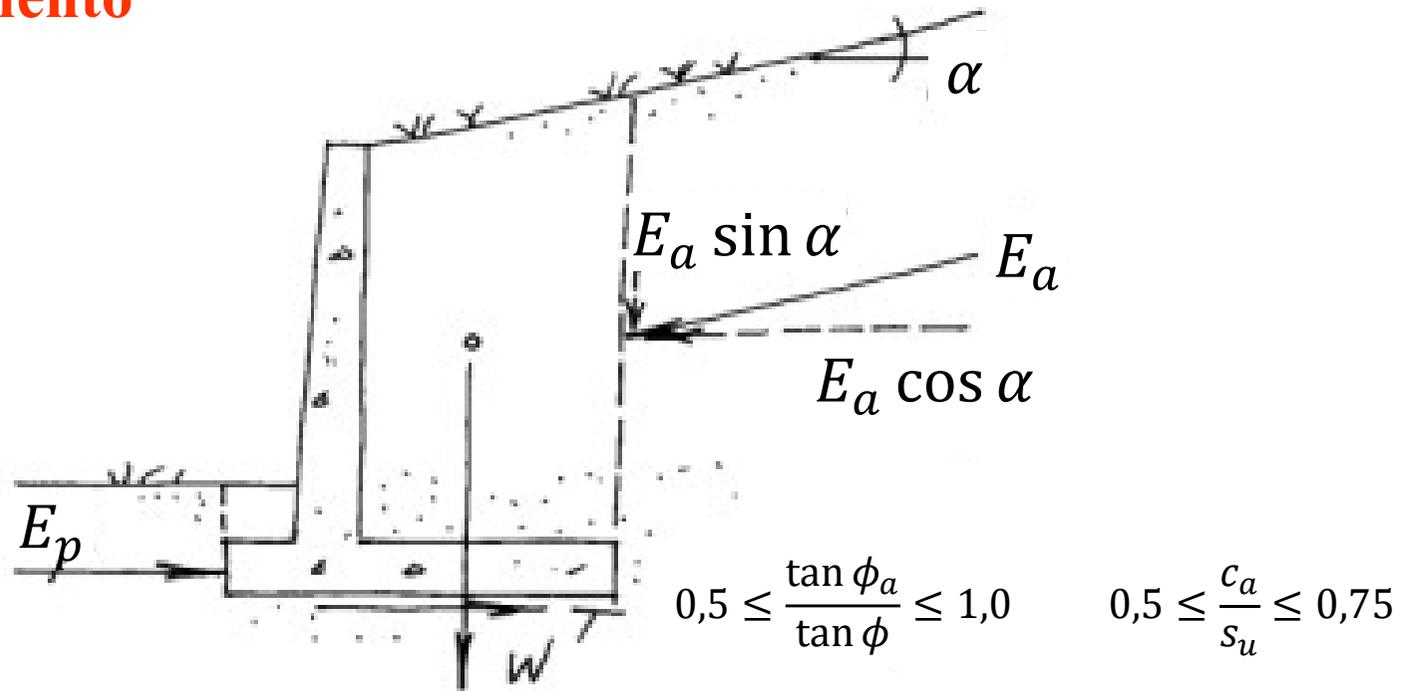
Estabilidade global

# Tombamento



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

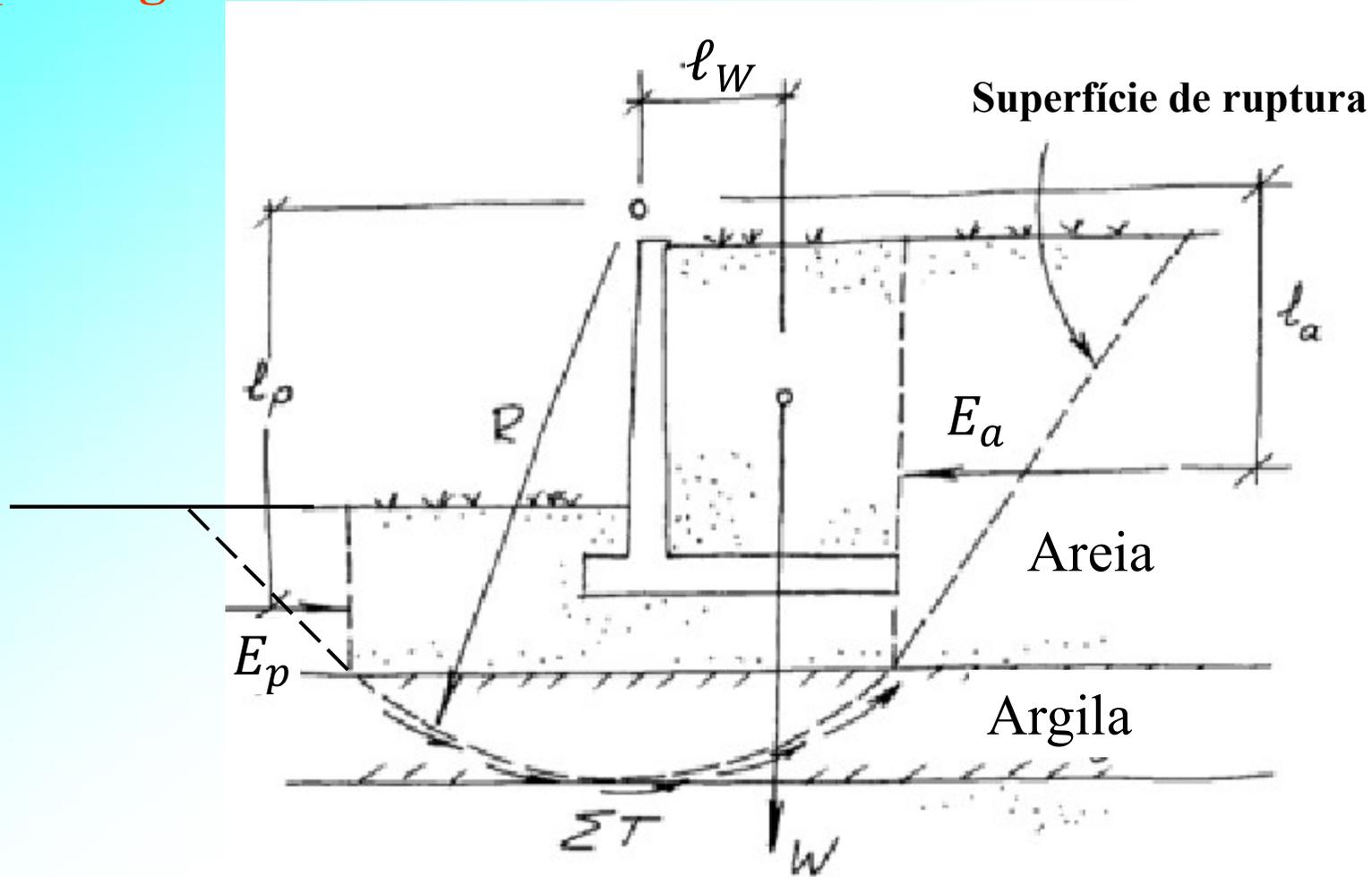
## Deslizamento



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

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

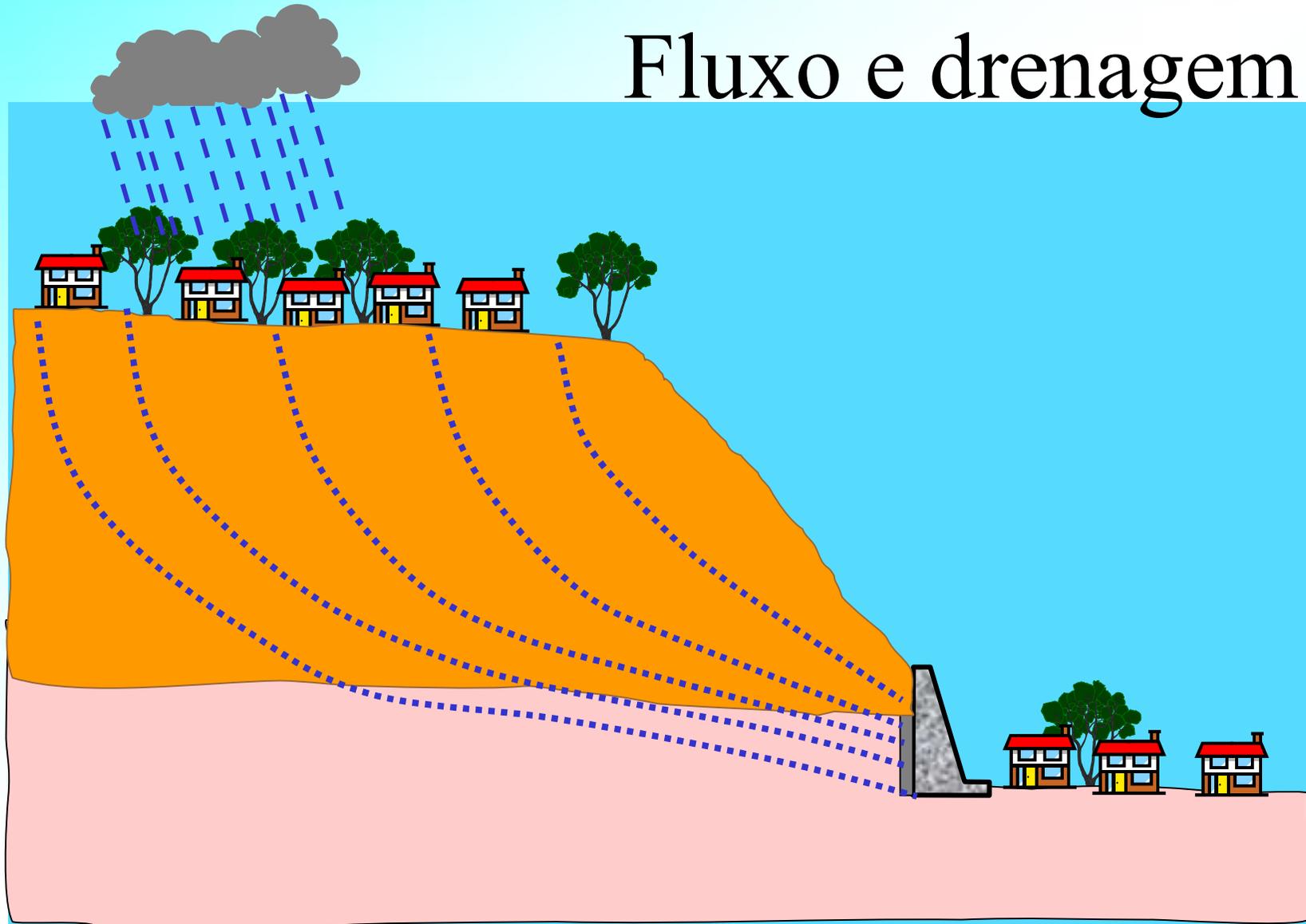
## Ruptura geral

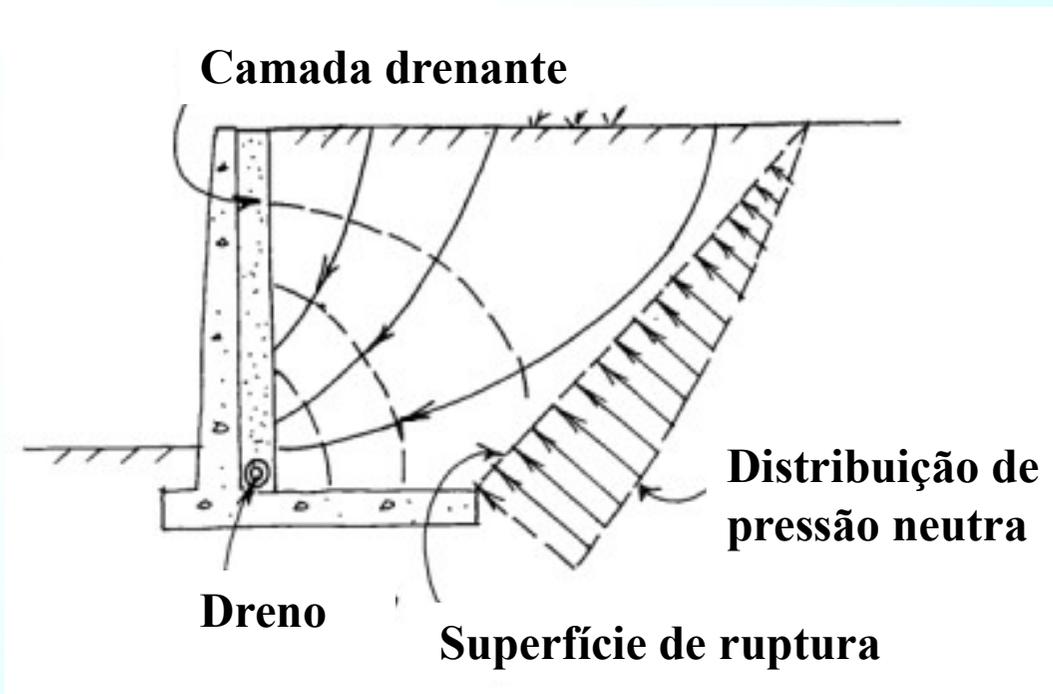
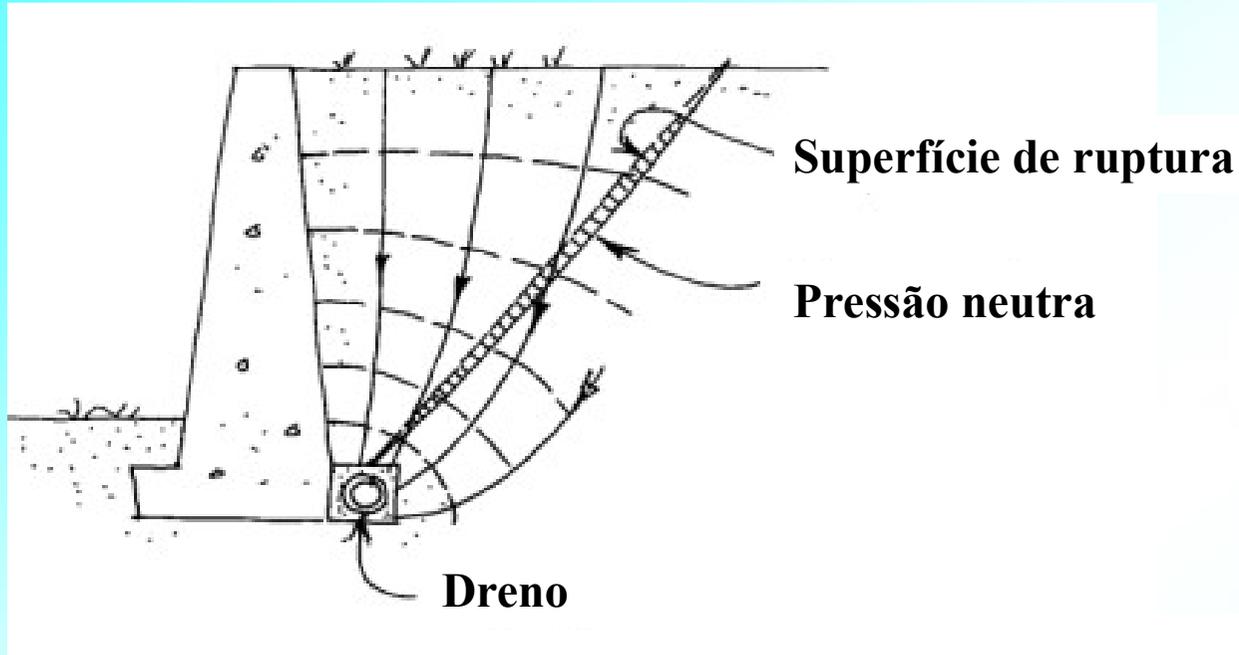


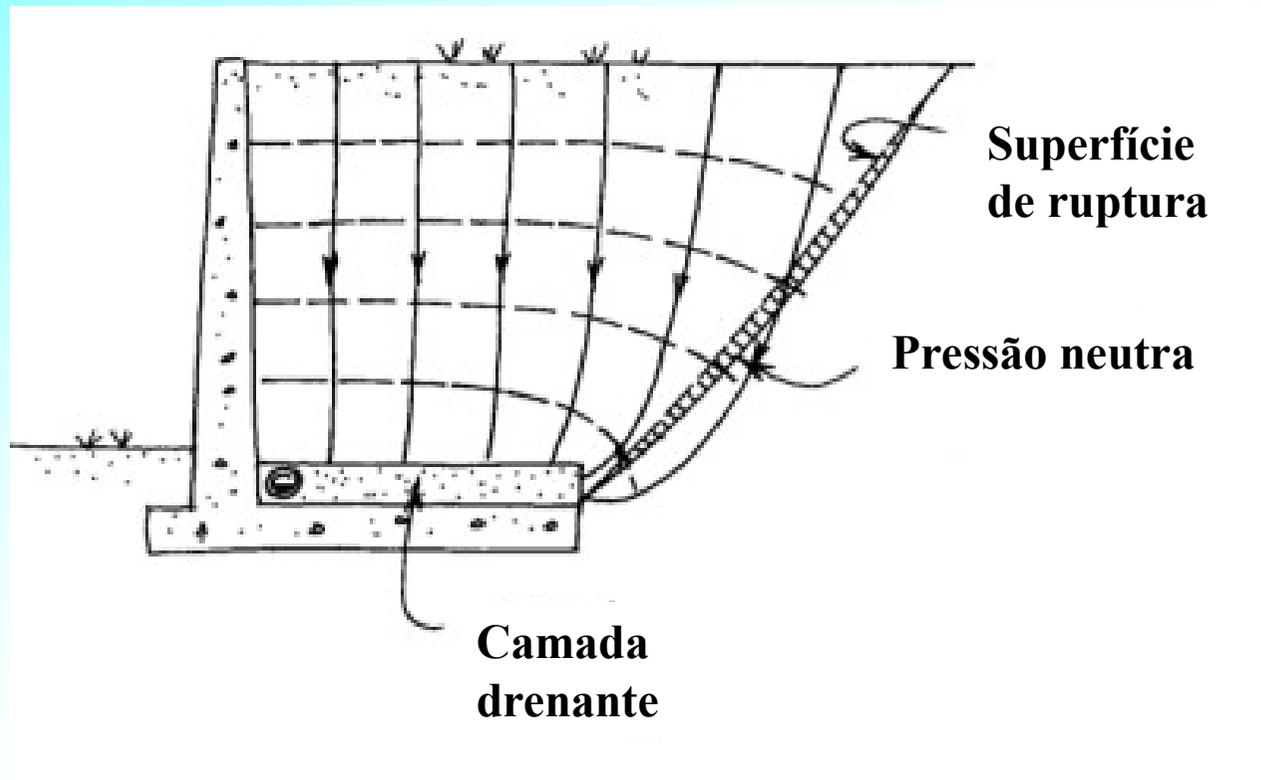
$$F = \frac{\sum \text{momentos resistentes}}{\sum \text{momentos atuantes}} \geq 1,5$$

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

# Fluxo e drenagem





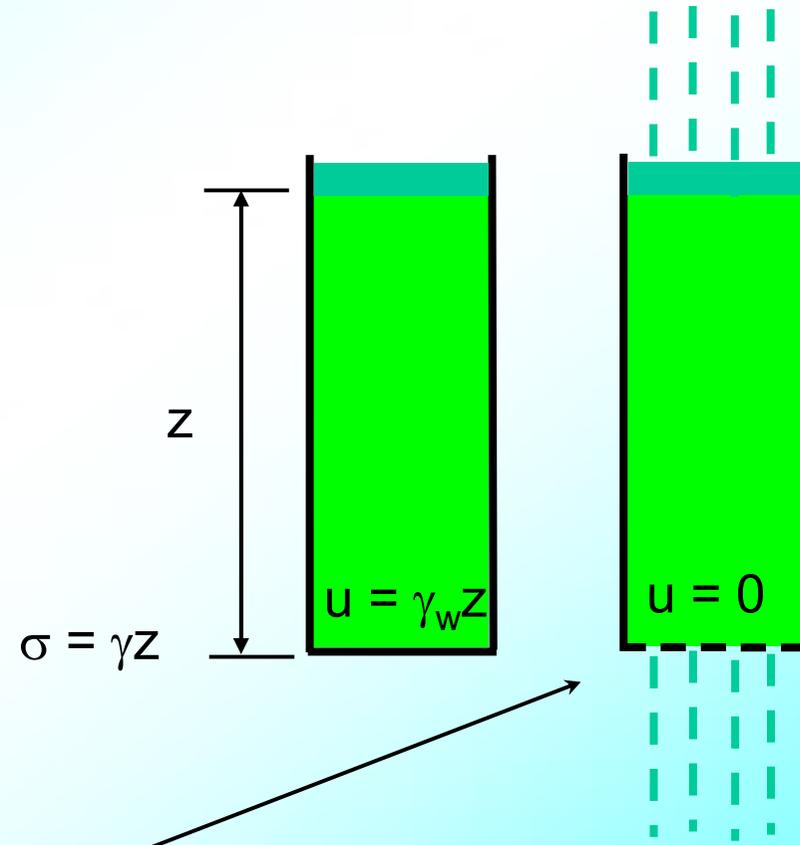


**Importante: fluxo vertical  $\Rightarrow$  pressões neutras nulas!**

## Effective stress

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

$\sigma'$  governs all soil behaviour  
 $\sigma$  is  $(q + \gamma z)$   
 $u$  is pore pressure



**Importante: fluxo vertical  $\Rightarrow$  pressões neutras nulas!**