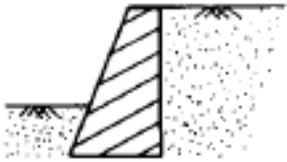


Empuxos

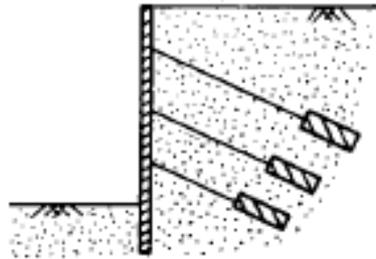
Fernando A. M. Marinho
2015

Waldmar Hachich
2019

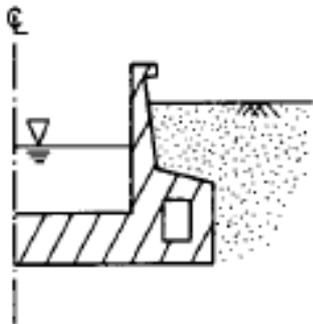
Estruturas de Contenção



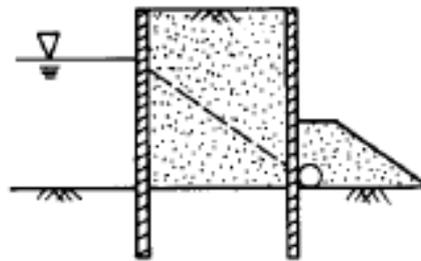
Rigid Gravity Retaining Wall



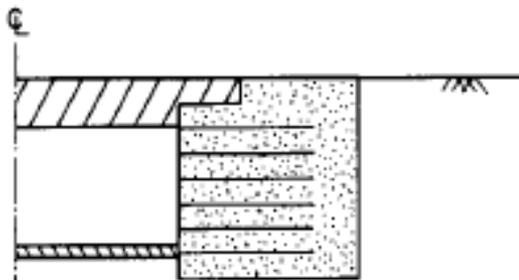
Flexible Tied Back Excavation Support Wall



U-Frame Navigation Lock



Cellular Cofferdam



Reinforced Earth Fill



Problemas... e arte



Coeficiente de empuxo lateral

Na Água

$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = 1$$

No Gelo

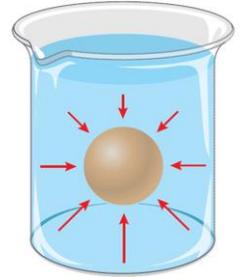
$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} < 1$$

No Solo ou Rocha

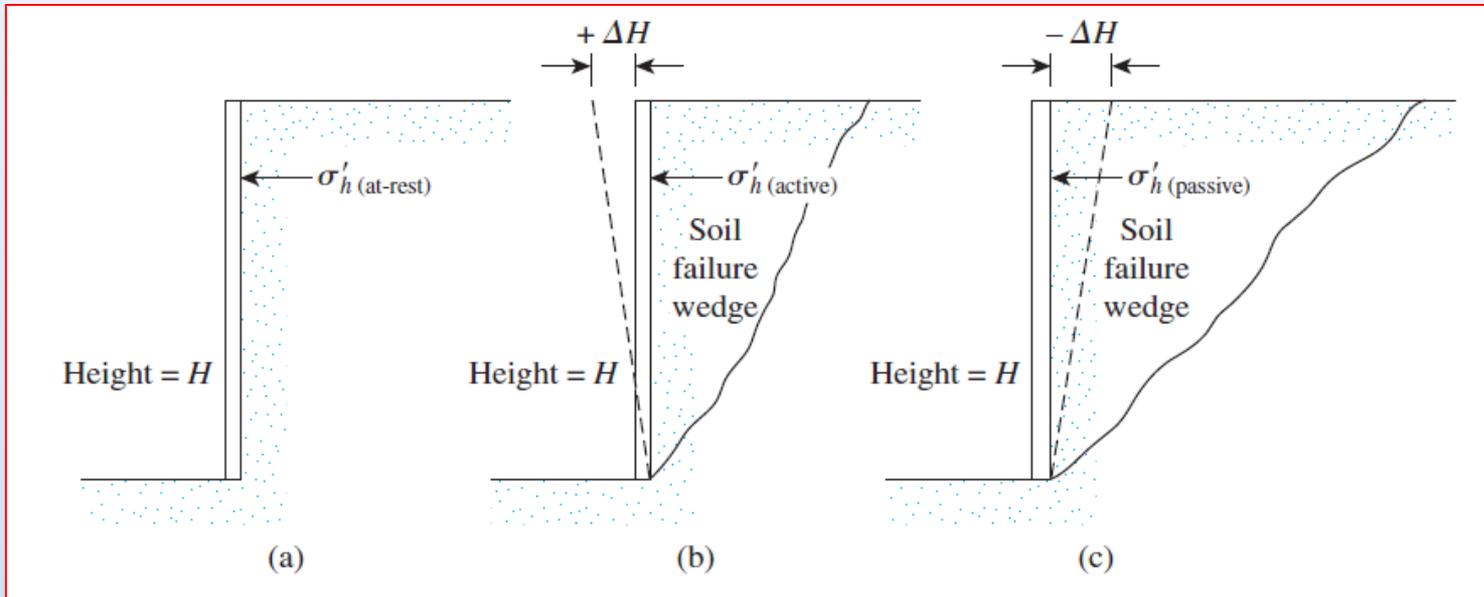
$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \text{ de } < 1 \text{ a } > 1$$



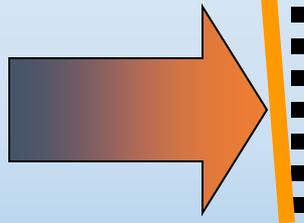
Pressão em um corpo imerso



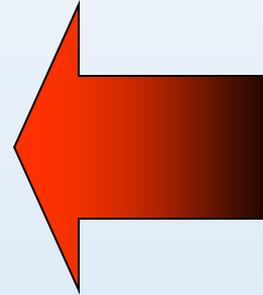
Natureza do Empuxo de Terra em Contenções



Empuxo Passivo: É a 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 a 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.



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

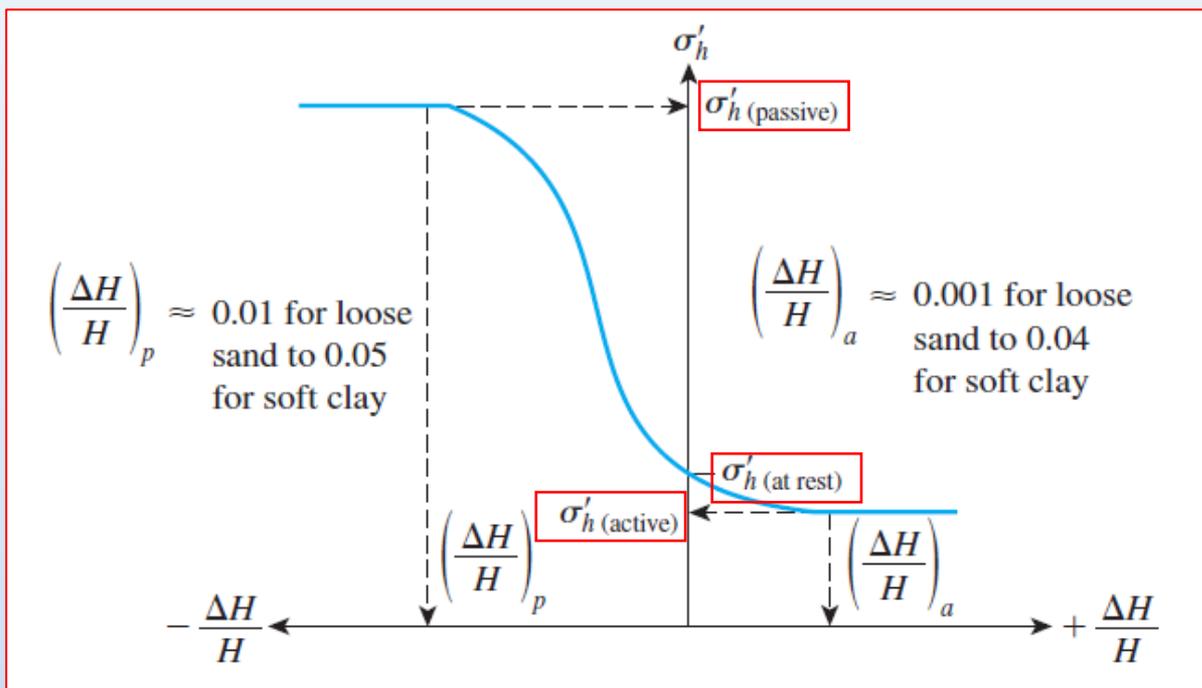
- $K_w = \frac{u_h}{u_v} = 1$

- $K_{w_a} = \frac{u_a}{u_v} = 1$ ATIVO

- $K_{w_0} = \frac{u_{h_0}}{u_{v_0}} = 1$ REPOUSO
(SUBSCRITO 0 INDICA "SEM DESLOCAMENTO")

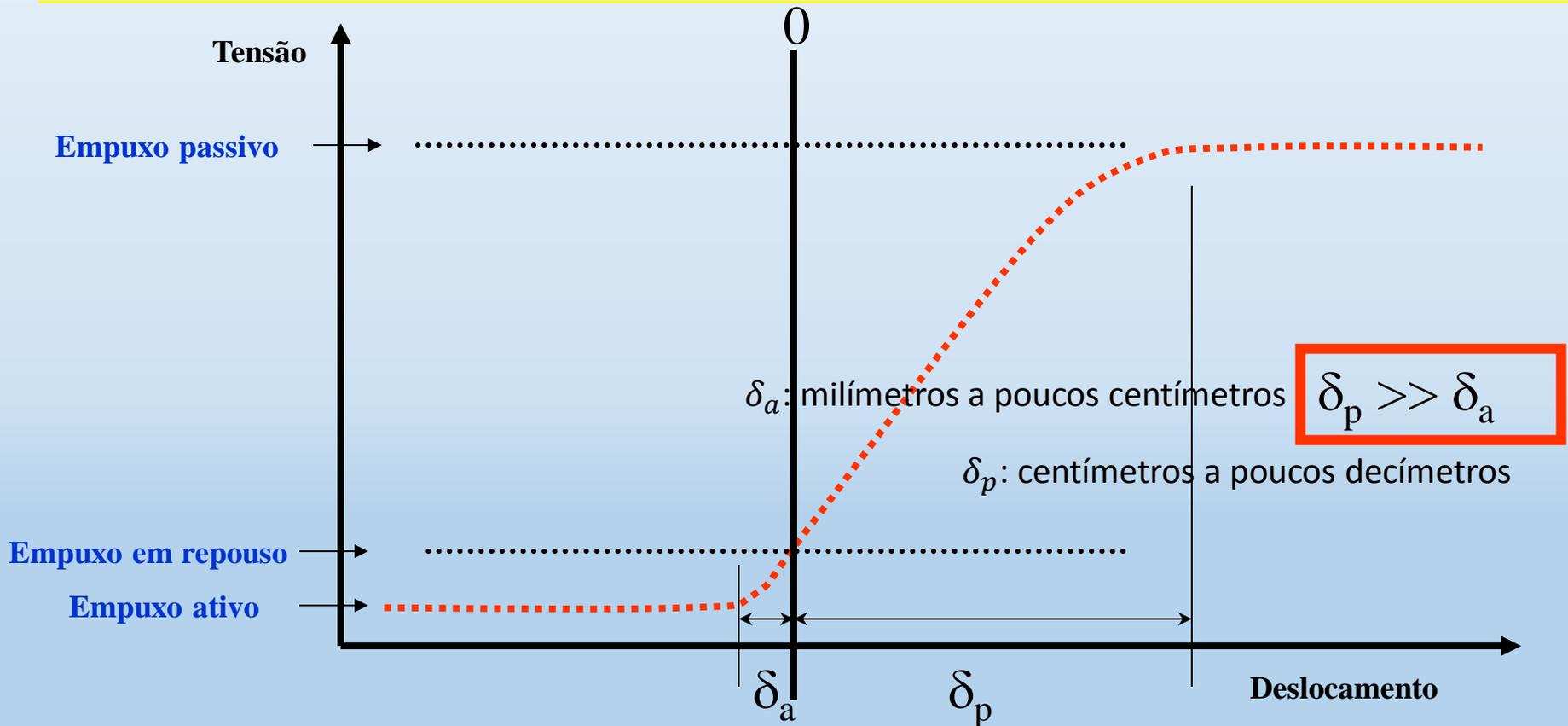
- $K_{w_p} = \frac{u_p}{u_h} = 1$ PASSIVO

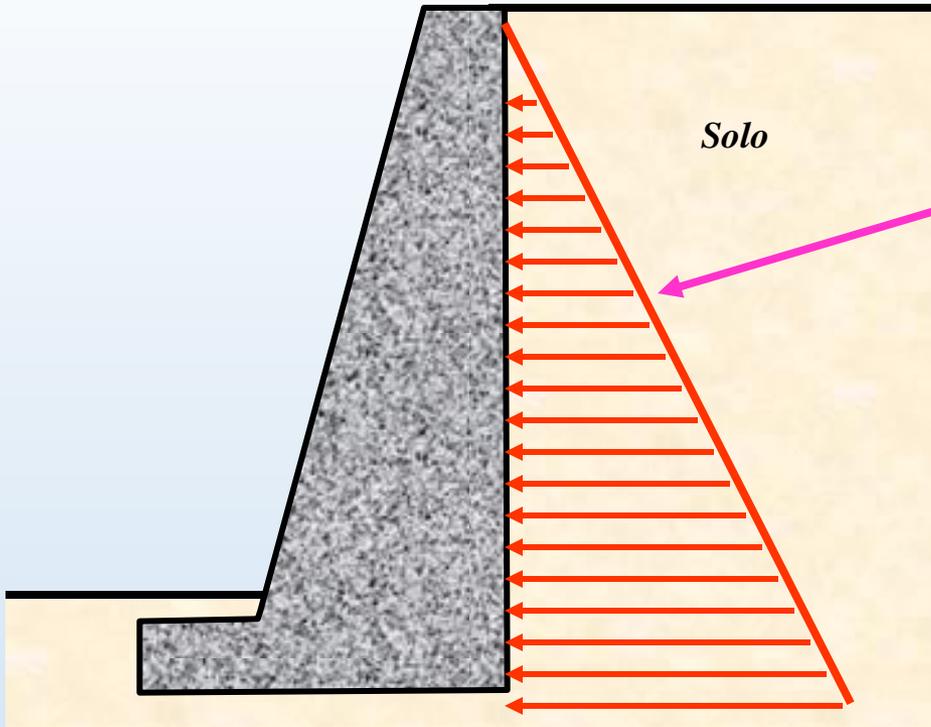
Natureza da variação do empuxo lateral a uma certa profundidade



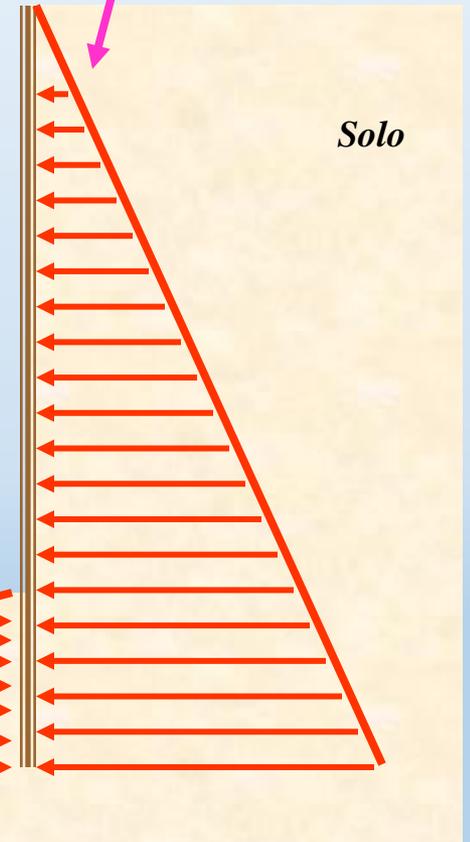
Empuxo de Terra

- ❖ 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).



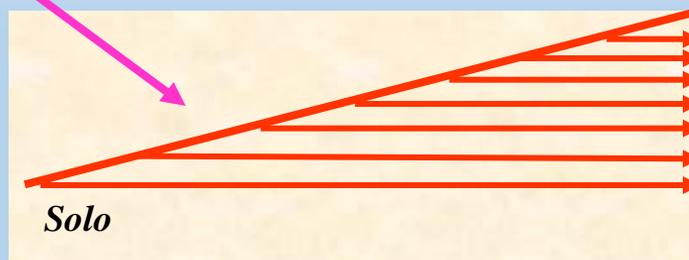


Distribuição teórica do empuxo ativo



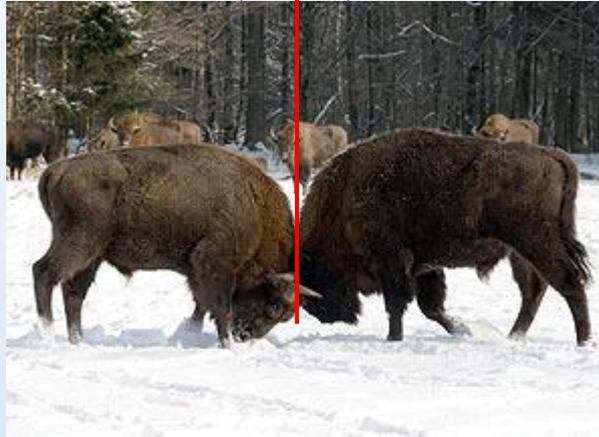
Solo

Distribuição teórica do empuxo passivo



Solo

Repouso $\Rightarrow |F_E| = |F_D|$

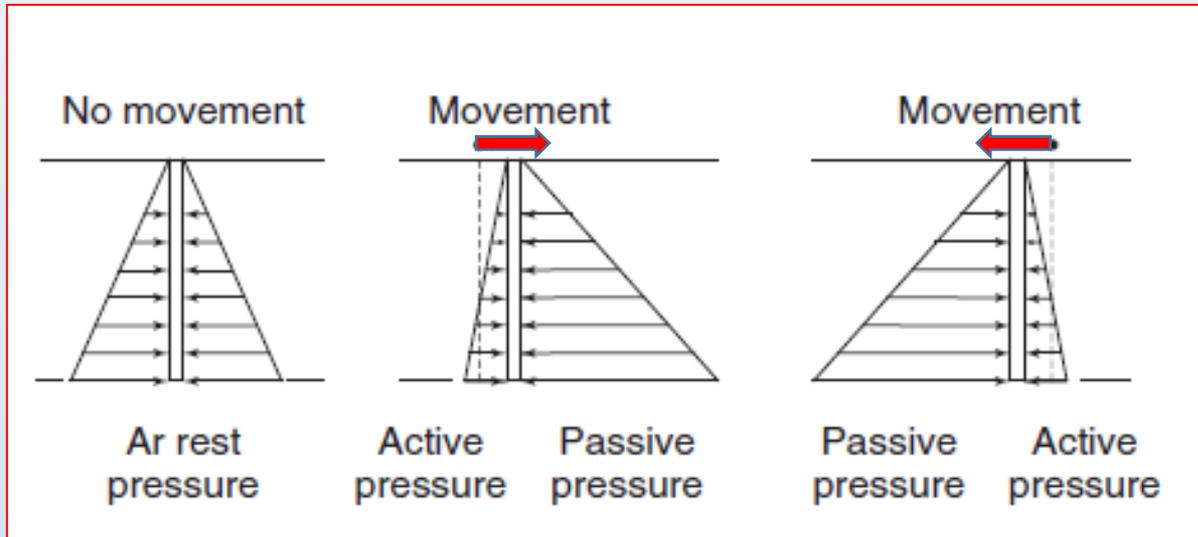


No sistema,
 $\vec{F}_E + \vec{F}_D = 0.$

Lei de movimento de Newton: objeto em repouso
Quando um objeto está sujeito a forças iguais e opostas ele está em repouso.



Natureza do Empuxo de Terra



Briaud (2013)

Repouso

$$s = c' + \sigma' \tan \phi'$$

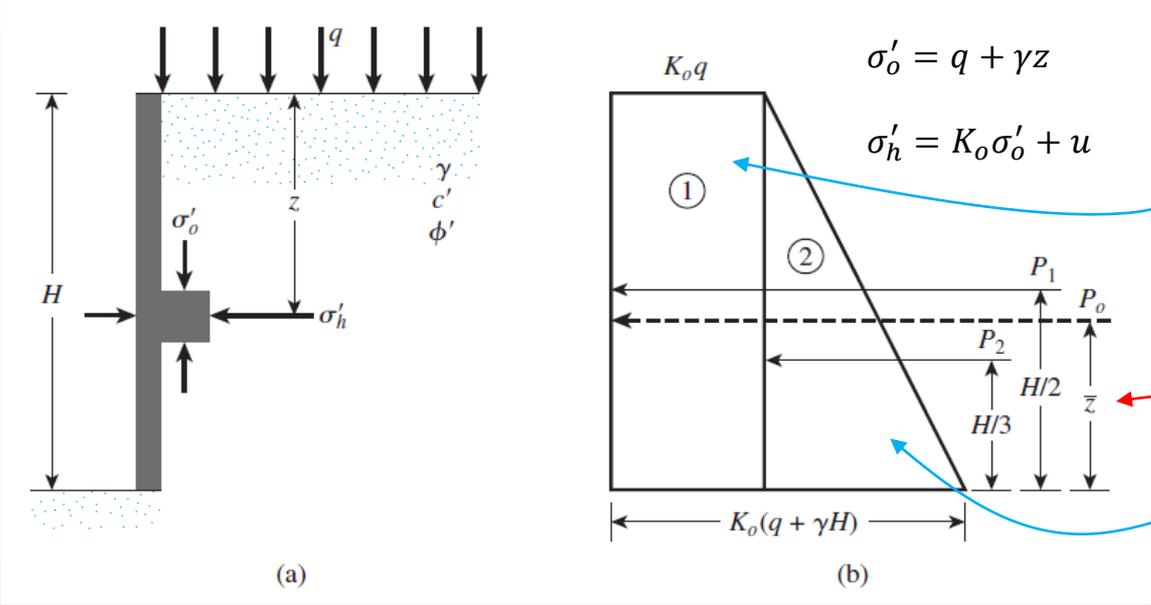
where
 c' = cohesion
 ϕ' = effective angle of friction
 σ' = effective normal stress

Jaky (1944) – Normalmente adensado

$$K_o \approx 1 - \text{sen}\phi'$$

Mayne & Kihawy (1982) – Sobre-adensado

$$K_o = (1 - \text{sen}\phi')OCR^{\text{sen}\phi'}$$



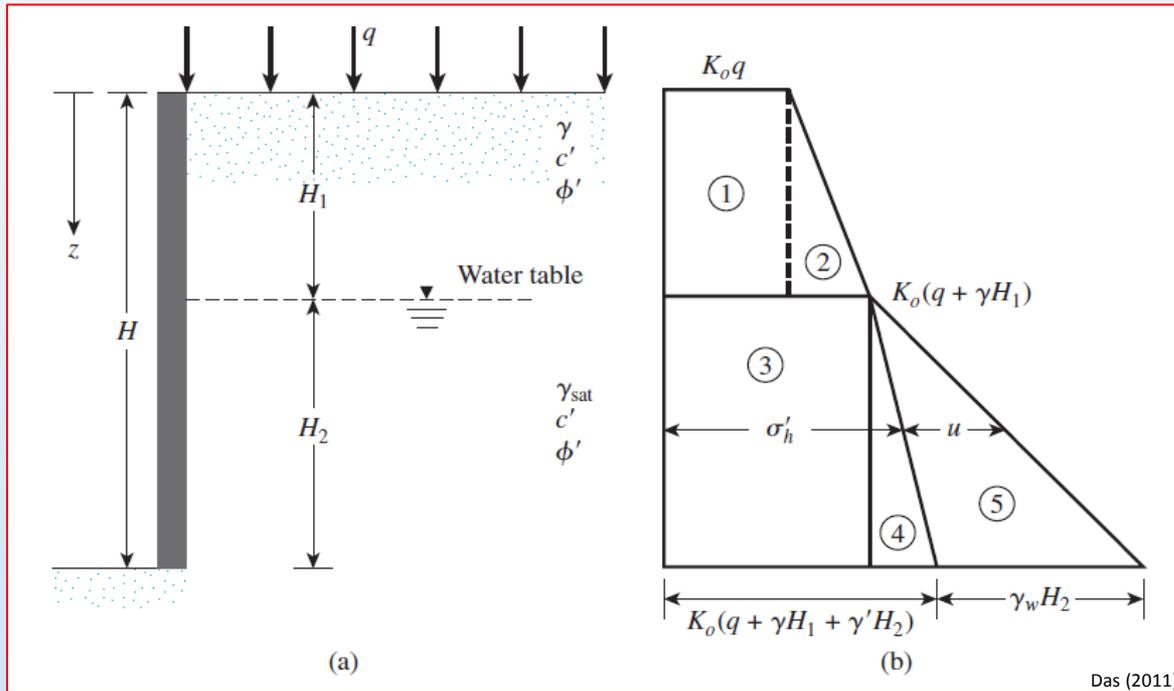
Das (2011)

$$P_o = P_1 + P_2 = qK_oH + \frac{1}{2}\gamma H^2 K_o$$

Se a sobrecarga é zero e não há pressão de água o diagrama é triangular

$$\bar{z} = \frac{P_1 \left(\frac{H}{2}\right) + P_2 \left(\frac{H}{3}\right)}{P_o}$$

Presença do nível de água



$$P_o = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5$$

where A = area of the pressure diagram.

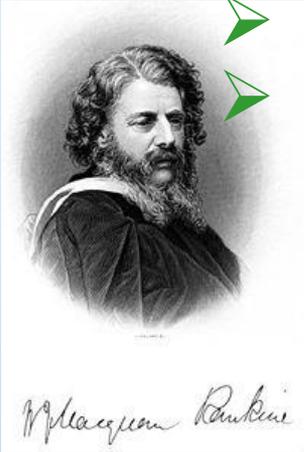
So,

$$P_o = K_o q H_1 + \frac{1}{2} K_o \gamma H_1^2 + K_o (q + \gamma H_1) H_2 + \frac{1}{2} K_o \gamma' H_2^2 + \frac{1}{2} \gamma_w H_2^2 \quad (7.7)$$

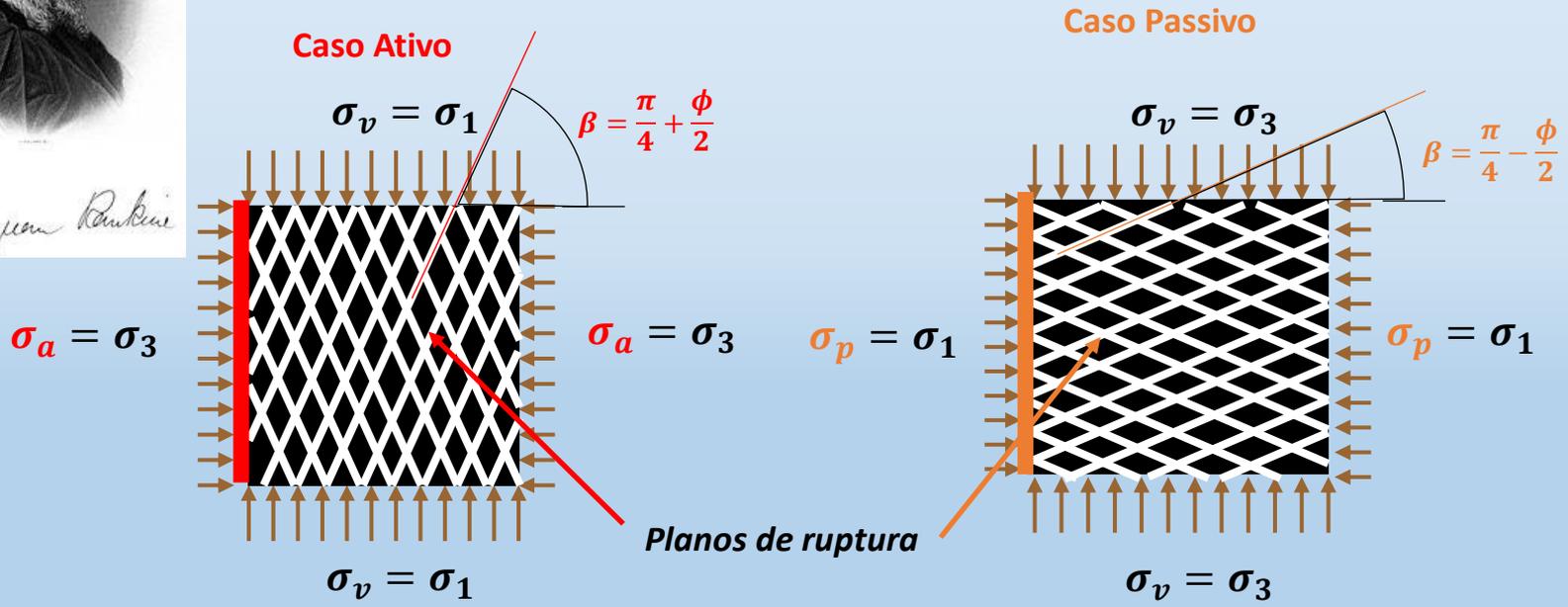
➤ Teoria de Empuxo de **Rankine (1857)** admite (em sua forma original):

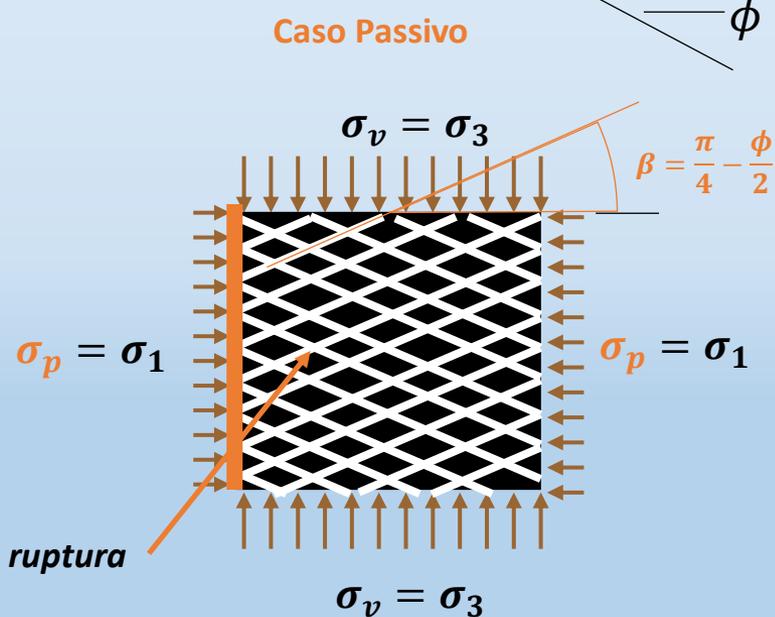
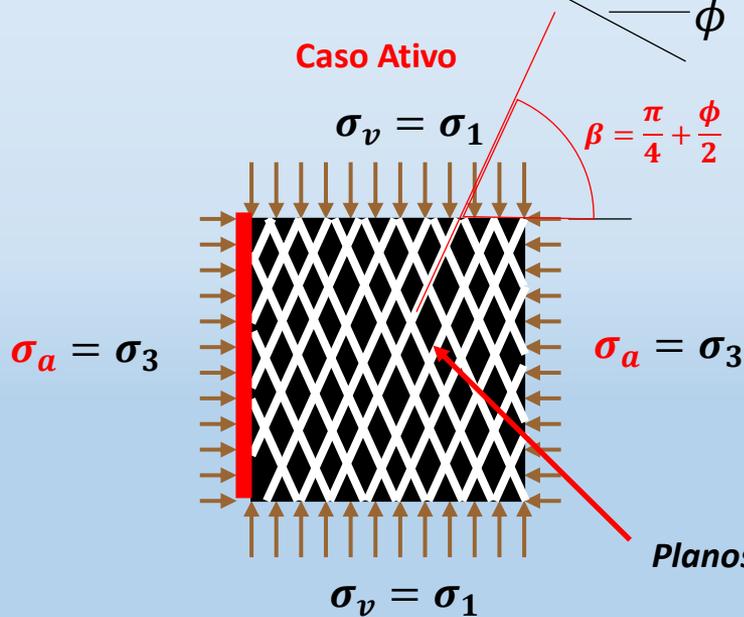
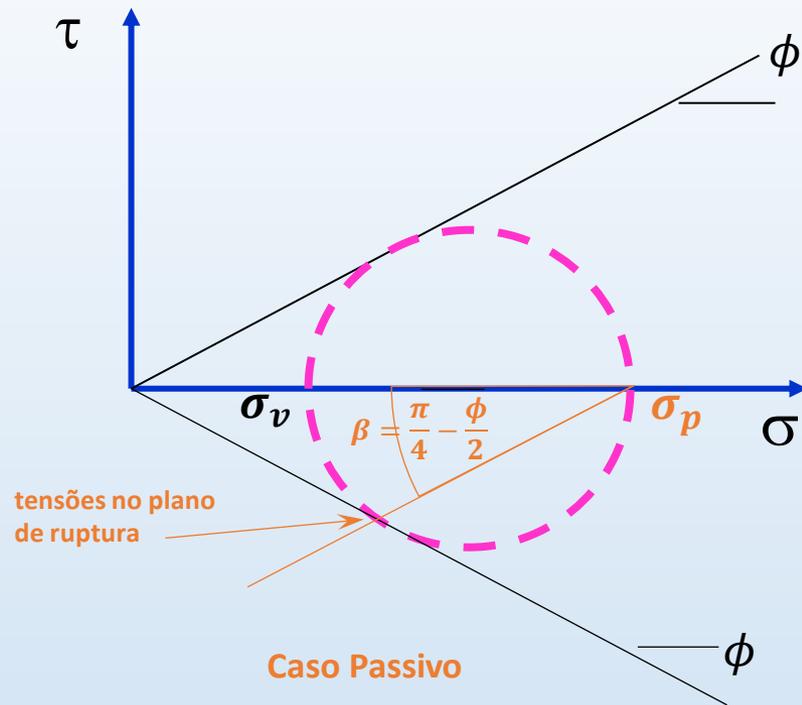
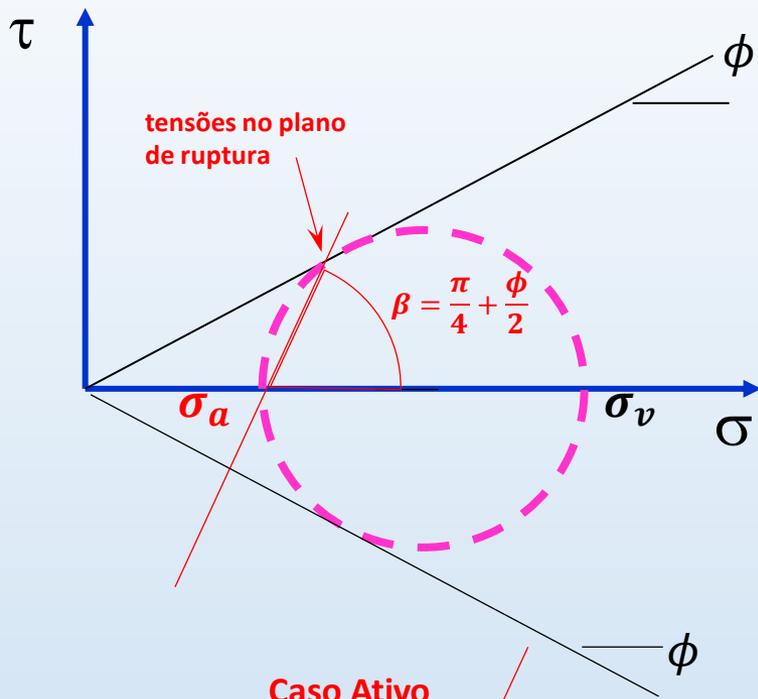
- interface muro-solo sem atrito
- paramento do muro é vertical
- o terrapleno é horizontal
- o muro é flexível e em semi-espaco infinito
- solo não coesivo

→ Decorre diagrama triangular de tensões de empuxo (só normais)



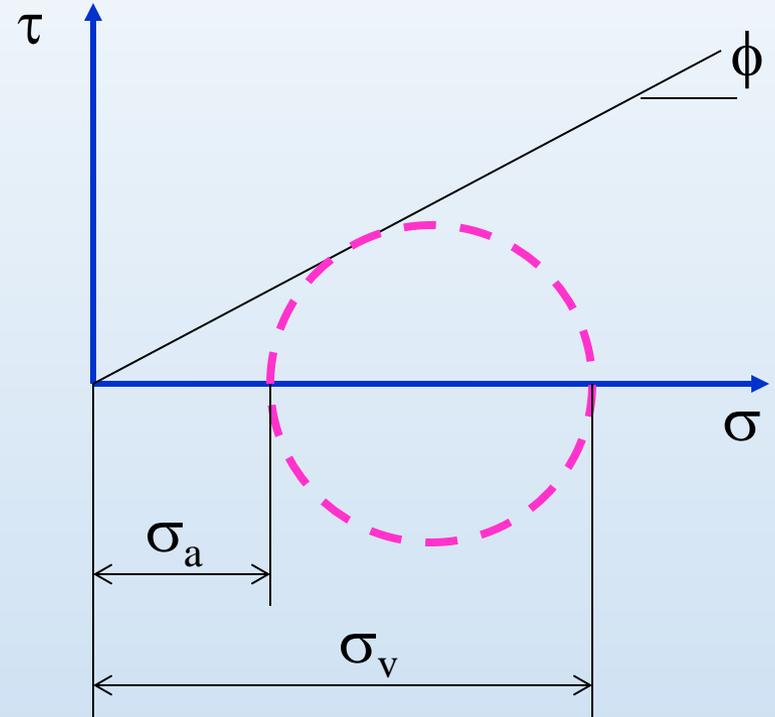
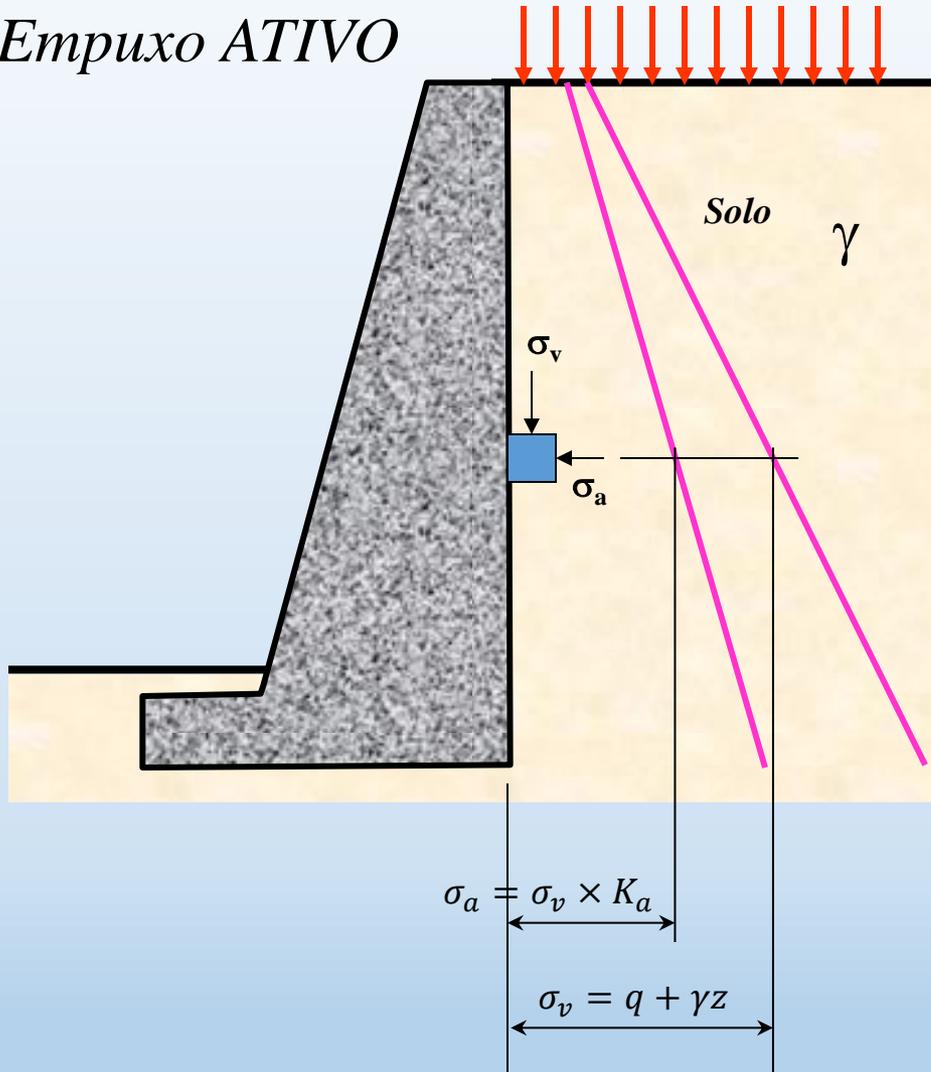
William Rankine





Rankine (com sobrecarga)

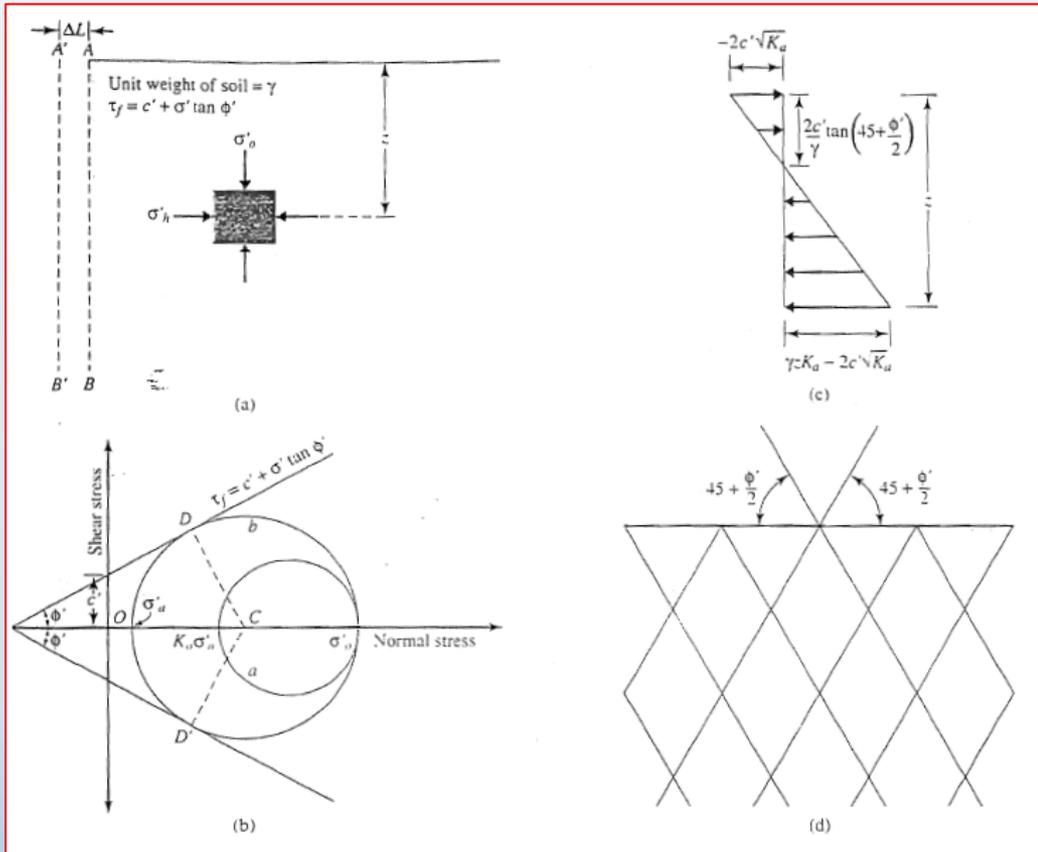
Empuxo ATIVO



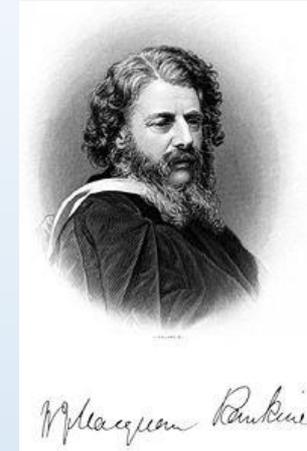
$$K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right)$$

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

Empuxo ativo, agora em solo cuja resistência apresenta intercepto de coesão



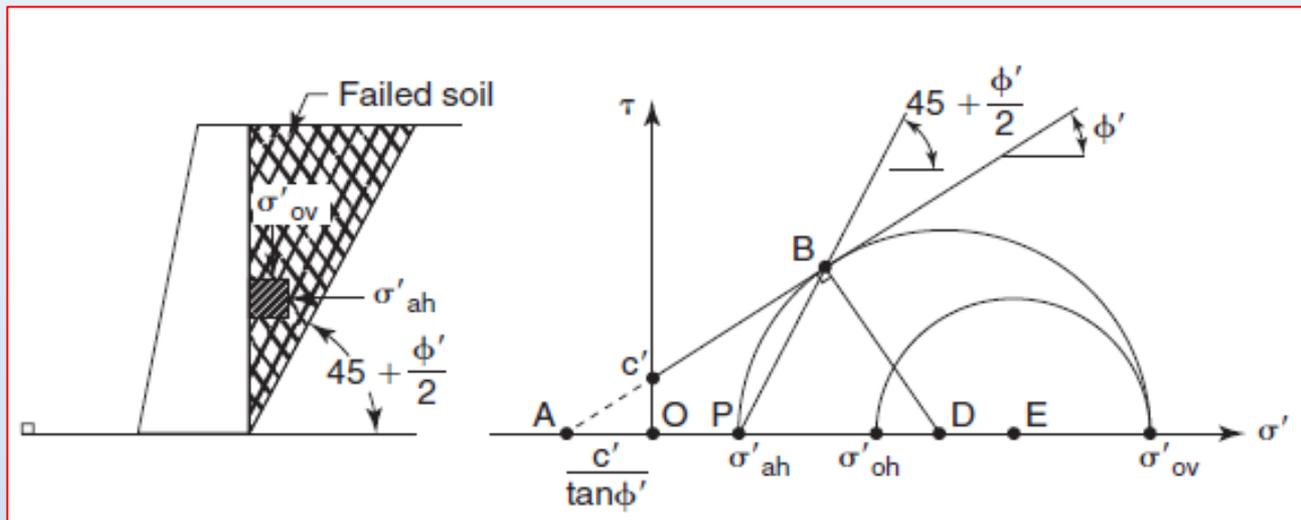
Das (2006)



Rankine (1857)

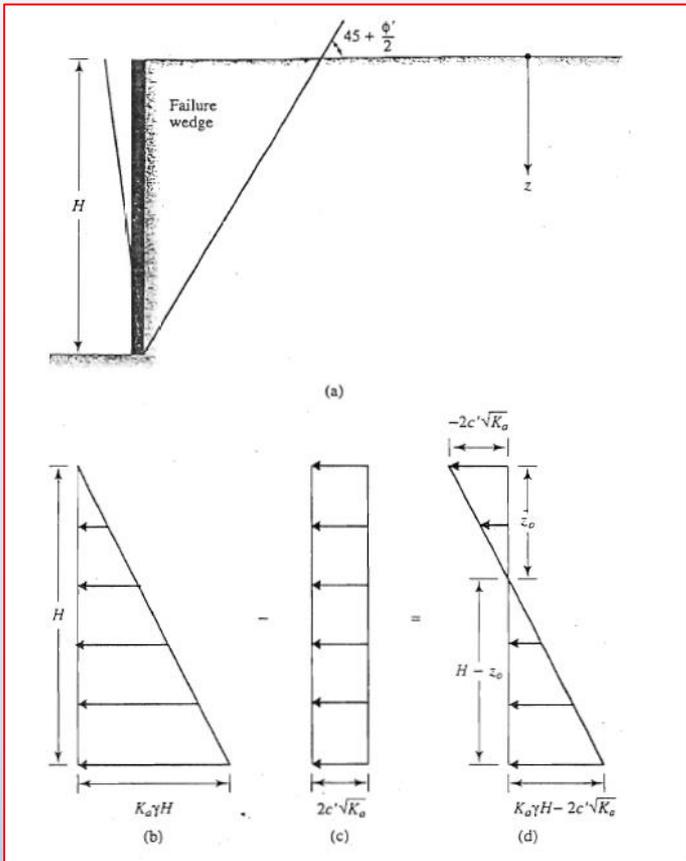
Paramento do muro é vertical
 Não há atrito entre o muro e o solo
 Solo homogêneo e isotrópico
 Solo inicialmente no repouso
 Superfície crítica é plana a $45 + \phi/2$
 Força resultante horizontal

Empuxo ativo e o estado de tensão no círculo de Mohr



Briaud (2013)

Empuxo ativo



Das (2006)

Para a condição não drenada



$$\begin{aligned}\phi_u &= 0 \\ K_a &= 1 \text{ (água!)} \\ c &= s_u\end{aligned}$$

$$\sigma_a = \gamma z - 2s_u$$

$$\sigma'_a = \gamma z \tan^2\left(45 - \frac{\phi'}{2}\right) - 2c' \tan\left(45 - \frac{\phi'}{2}\right)$$

$$\sigma'_a = K_a \gamma z - 2c' \sqrt{K_a}$$

A profundidade na qual a pressão ativa se torna zero é obtida por:

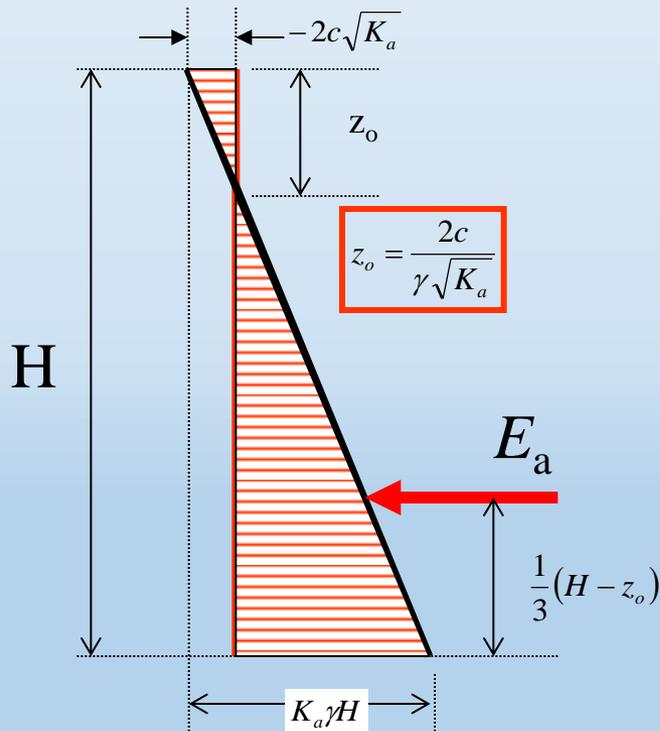
$$K_a \gamma z_o - 2c' \sqrt{K_a} = 0$$

Com o tempo a trinca de tração irá se desenvolver

$$z_o = \frac{2c'}{\gamma \sqrt{K_a}}$$

Rankine

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



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

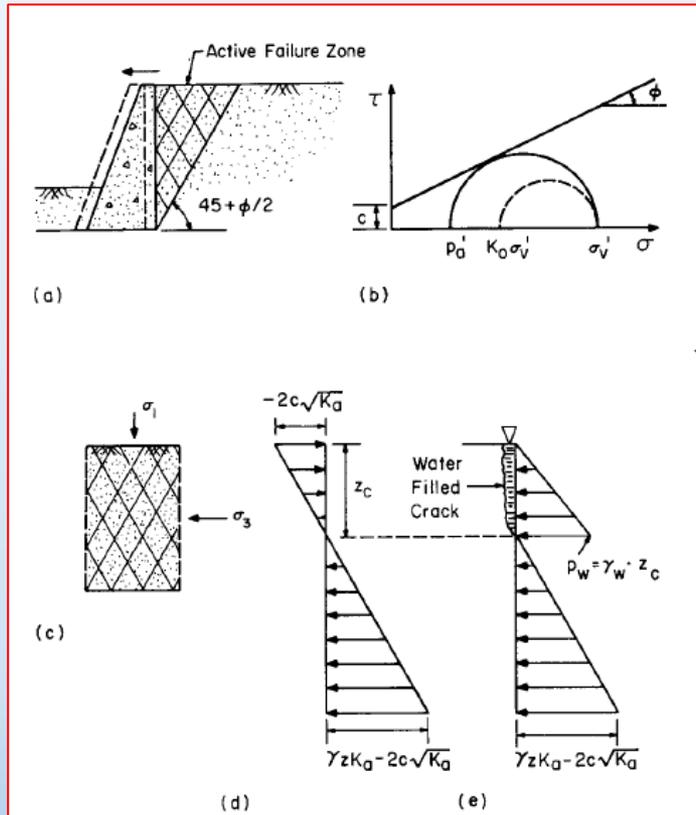
K_a - coeficiente de empuxo ativo

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

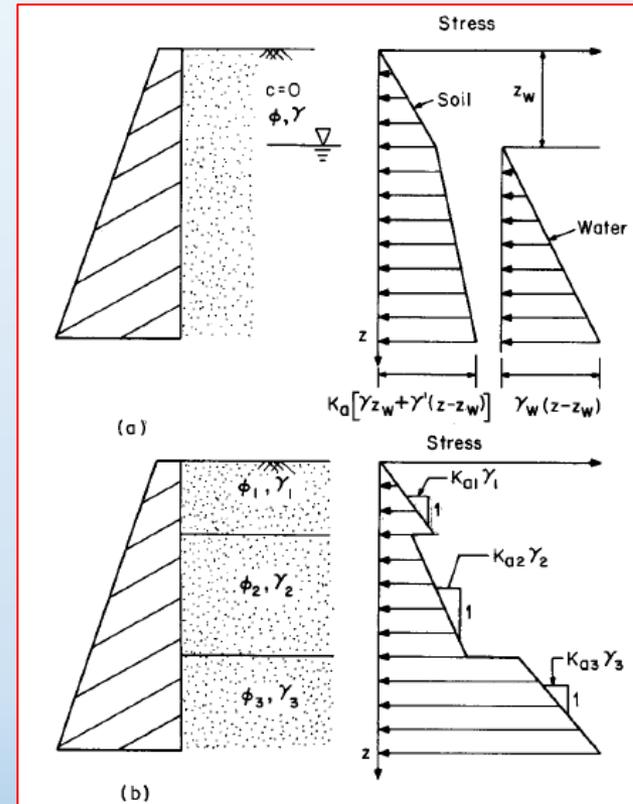
$$E_a = \frac{1}{2} K_a\gamma(H^2 - z_0^2) - 2c\sqrt{K_a}(H - z_0)$$

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

Empuxo ativo



Fang (1991)

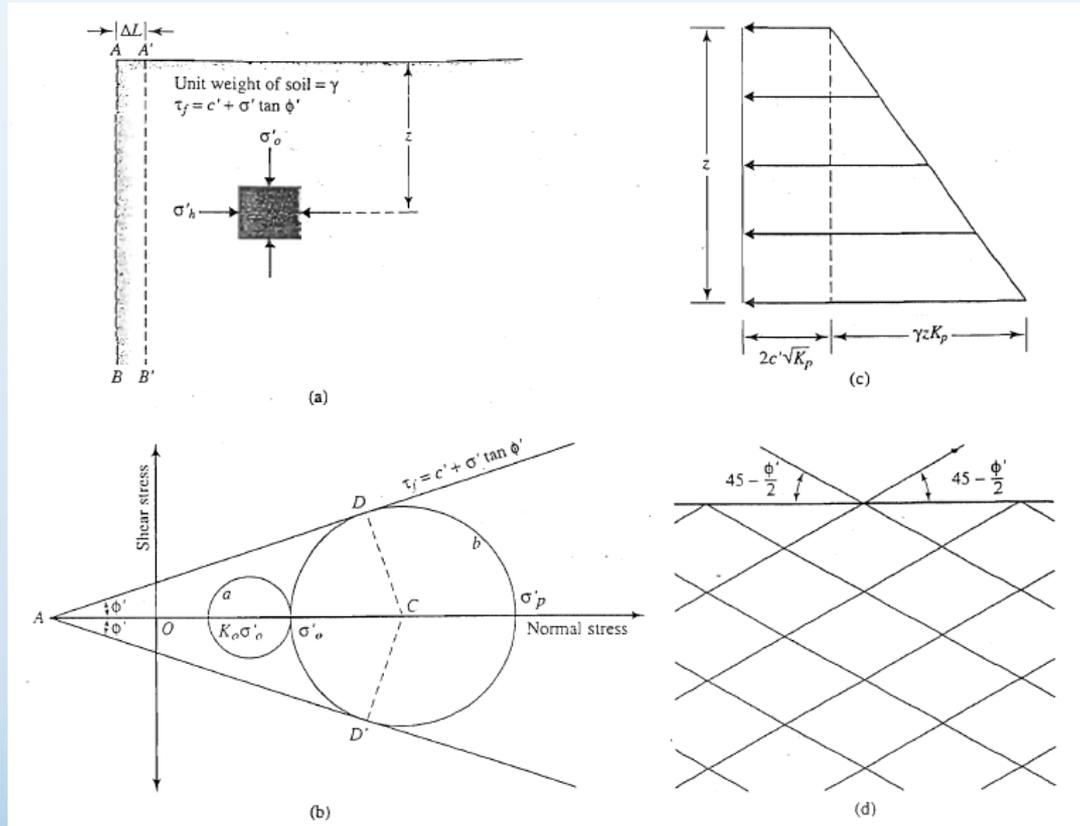


Fang (1991)

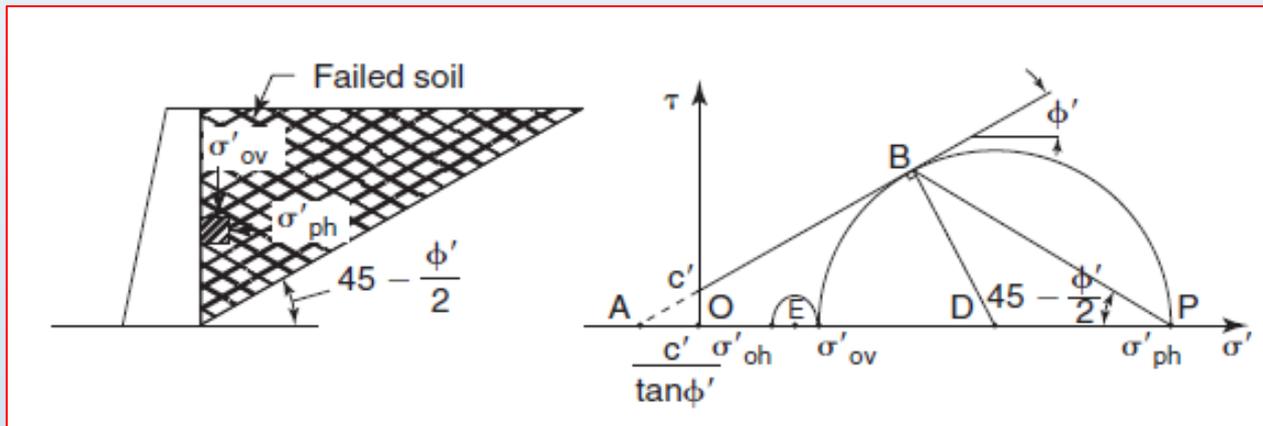
Fig. 6.3 Active pressure—frictionless wall. (a) Frictionless wall moves away from backfill. (b) Stress state in active failure. (c) Active failure zone. (d) Theoretical active pressure distribution. (e) Water-filled crack in tension zone.

Fig. 6.5 Active pressures for frictionless wall in presence of groundwater table and nonhomogeneous soil conditions. (a) Groundwater table. (b) Nonhomogeneous cohesionless soil.

Empuxo Passivo

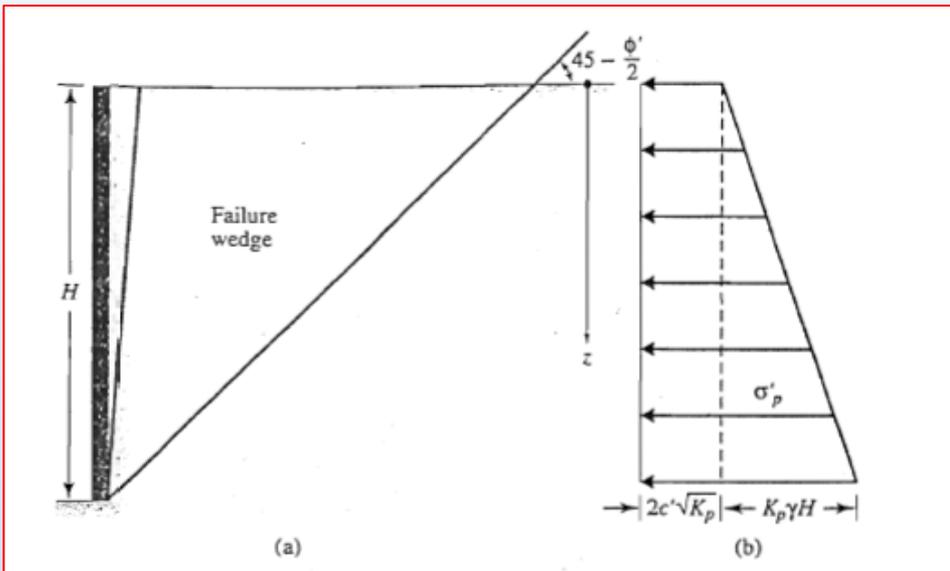


Empuxo passivo e o estado de tensão no círculo de Mohr



Briaud (2013)

Empuxo passivo



Das (2006)

Para $z = 0$

$$\sigma'_p = 2c' \sqrt{K_p}$$

Para $z = H$

$$\sigma'_p = K_p \gamma z + 2c' \sqrt{K_p}$$

Para a condição não drenada



$$\begin{aligned} \phi_u &= 0 \\ K_p &= 1 \text{ (água!)} \\ c &= s_u \end{aligned}$$

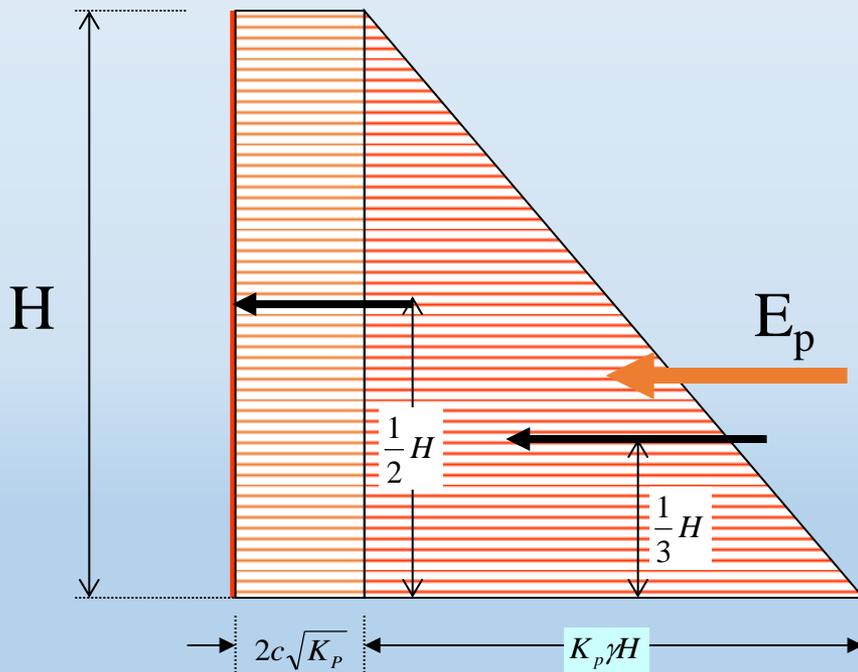
$$\sigma_p = \gamma z + 2s_u$$

Rankine

Distribuição do empuxo PASSIVO

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

K_p - coeficiente de empuxo passivo

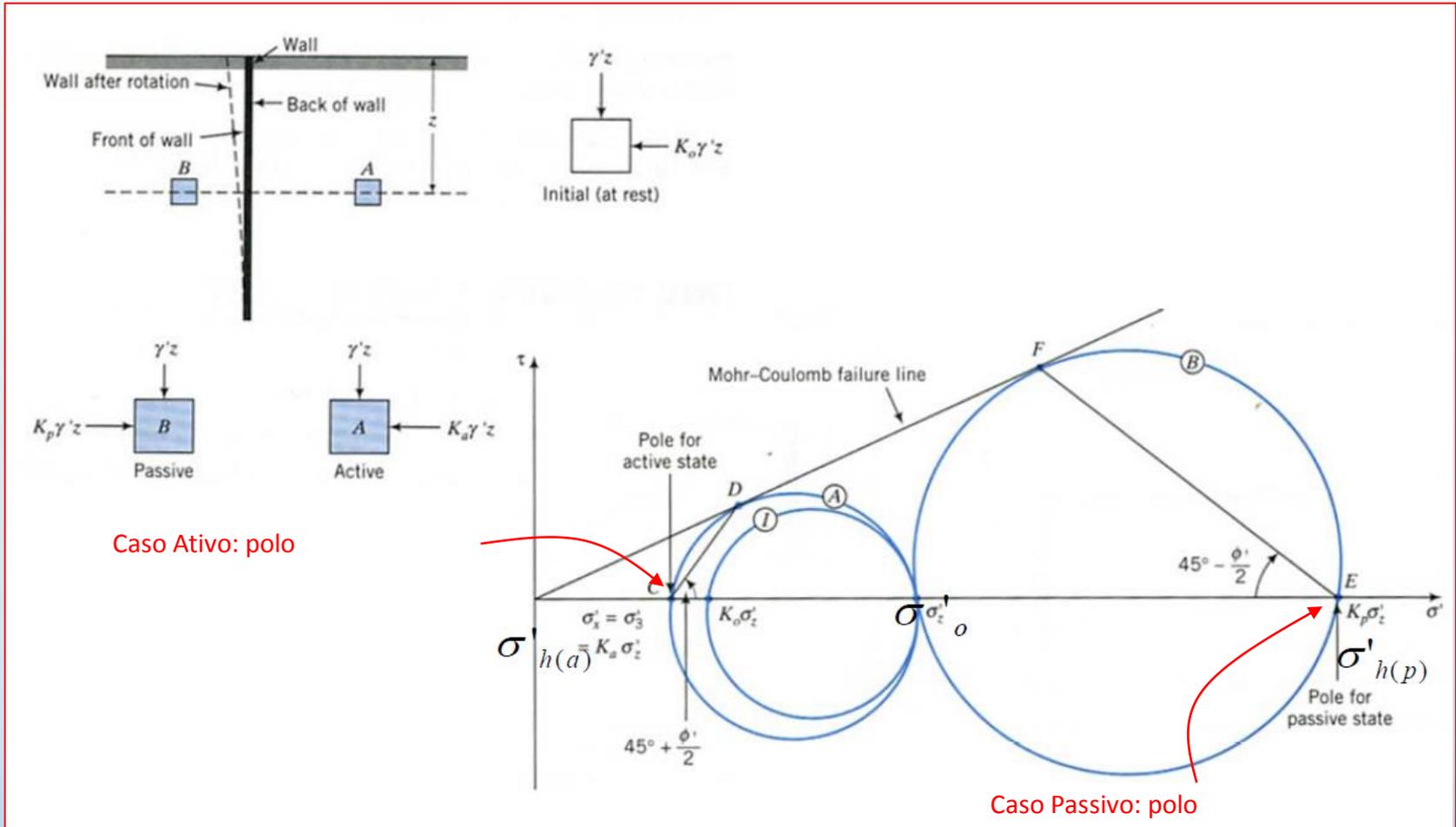


$$E_p = \int_{z_0}^H \sigma_p dz$$

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

Força de empuxo PASSIVO

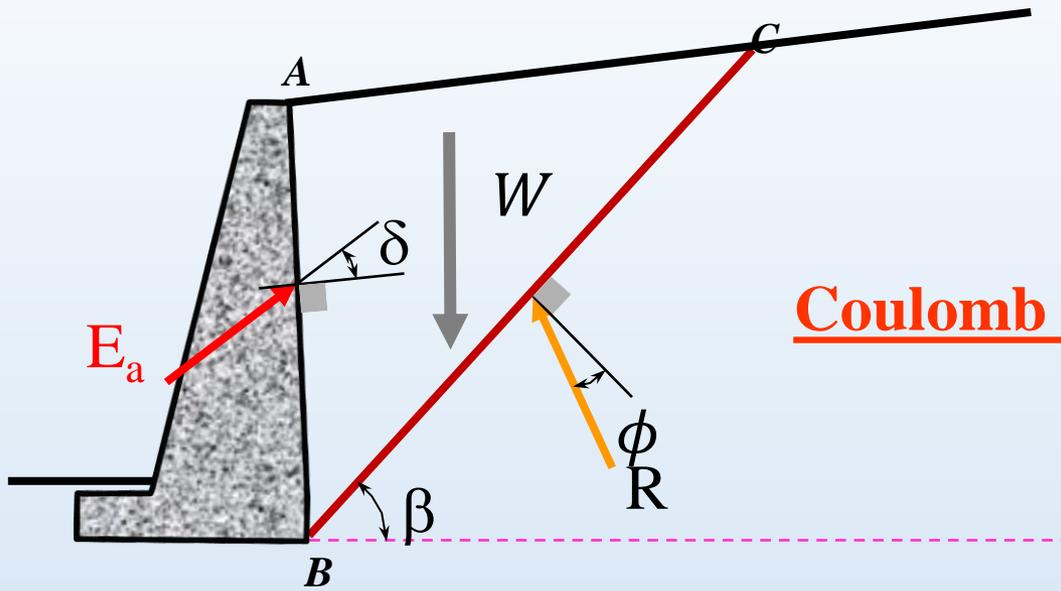
Rankine em Resumo



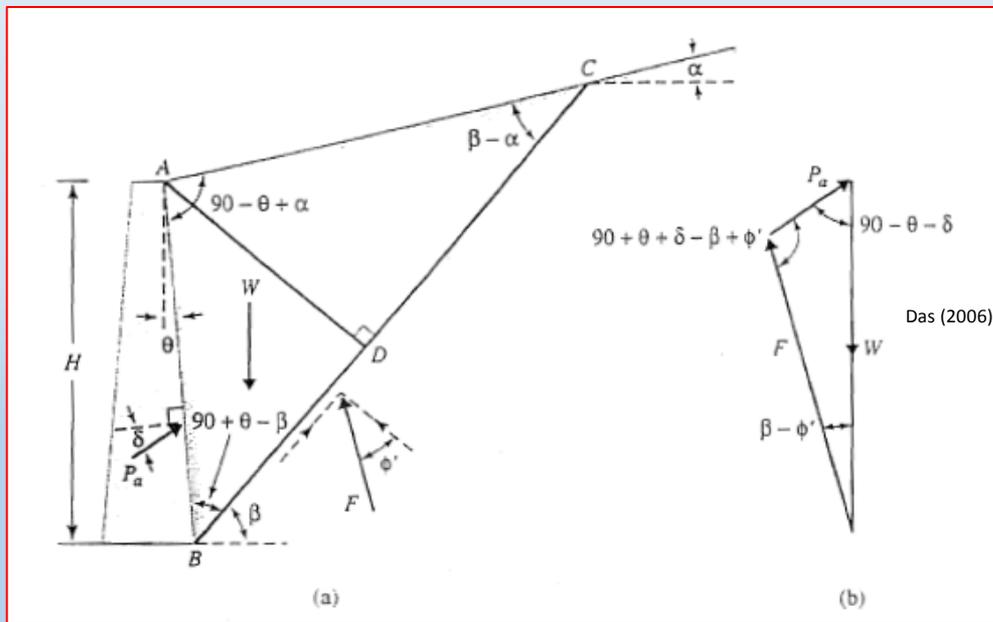
ou, melhor, canaleta para **drenagem superficial** na direção longitudinal



se não houver **drenagem superficial** na direção longitudinal

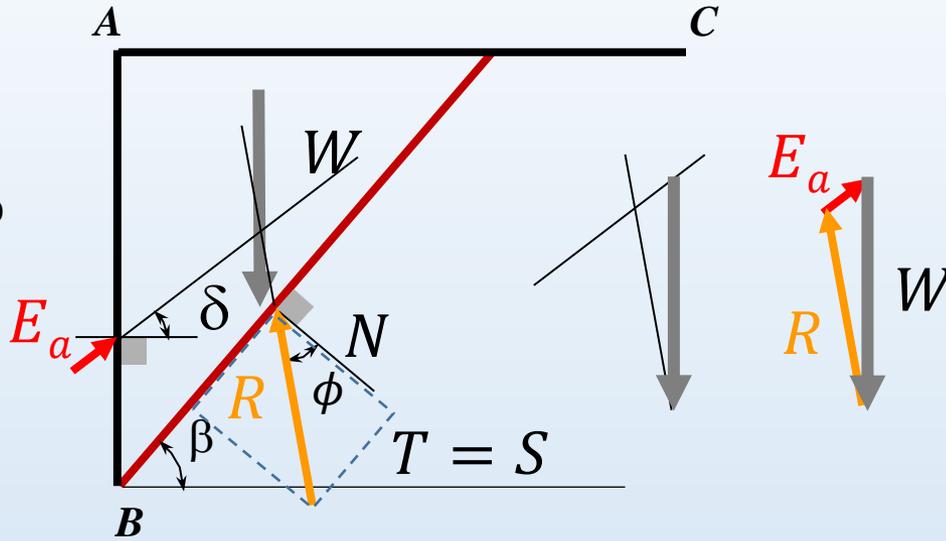


Coulomb (1776)

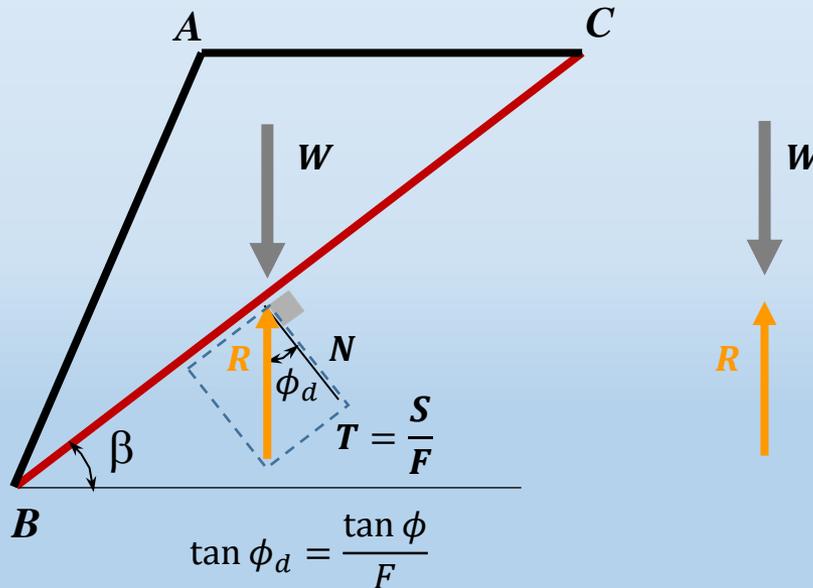


- Admite atrito entre o muro e o solo (a resultante do empuxo atua com um ângulo δ que é o ângulo de atrito solo/muro)
- Admite que a superfície de escorregamento é um plano que passa pelo pé do muro
- A cunha de ruptura age como um bloco rígido e o valor da força de empuxo é obtido considerando o **equilíbrio limite** da cunha como um todo
- Não faz hipótese sobre forma do diagrama (só calcula força de empuxo resultante)

Equilíbrio limite
Empuxo ativo de Coulomb



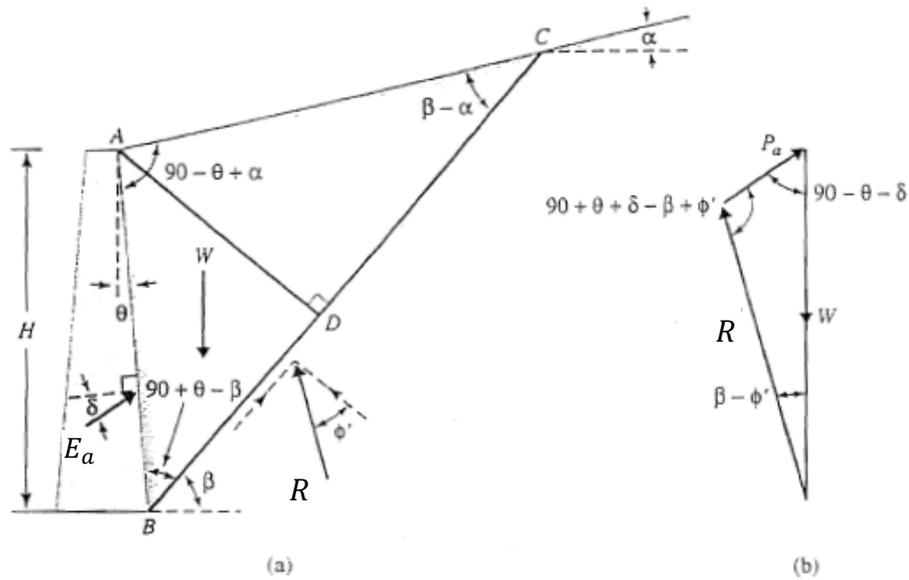
Equilíbrio limite
Talude íngreme



Karl Culmann (1821-1881)

Processo gráfico de Culmann





W - Peso da cunha de ruptura.

R - Resultante das forças de cisalhamento e normal na superfície de ruptura BC.

E_a - Força de empuxo ativo (inclinada do ângulo δ em relação à normal à face do muro).

$$\frac{W}{\text{sen}(90 + \theta + \delta - \beta + \varphi')} = \frac{P_a}{\text{sen}(\beta - \varphi')}$$

$$E_a = \frac{\text{sen}(\beta - \varphi')}{\text{sen}(90 + \theta + \delta - \beta + \varphi')} W$$

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\frac{\cos(\theta - \beta) \cos(\theta - \alpha) \text{sen}(\beta - \varphi')}{\cos^2 \theta \text{sen}(\beta - \alpha) \text{sen}(90 + \theta + \delta - \beta + \varphi')} \right]$$

Determinação do ângulo crítico β para o máximo E_a

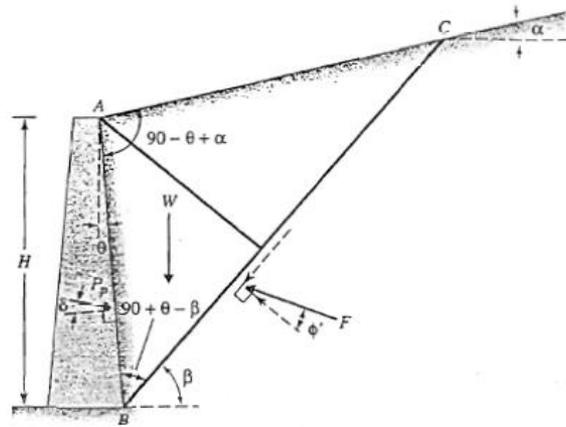
$$\frac{dE_a}{d\beta} = 0 \quad \longrightarrow \quad E_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2$$

$$K_a = \frac{\cos^2(\varphi' - \theta)}{\cos^2 \theta \cos(\delta + \theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\text{sen}(\delta + \varphi') \text{sen}(\varphi' - \alpha)}{\cos(\delta + \theta) \cos(\theta - \alpha)}} \right]^2}$$

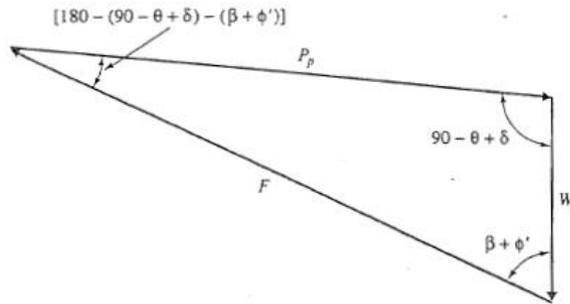
Se $\alpha = 0$, $\theta = 0$ e $\delta = 0$
Coulomb = Rankine

$$K_a = \frac{1 - \sin \varphi'}{1 + \sin \varphi'}$$

Empuxo passivo



(a)



(b)

$$K_P = \frac{\cos^2(\varphi' + \theta)}{\cos^2\theta \cos(\delta - \theta) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi' - \delta) \sin(\varphi' + \alpha)}{\cos(\delta - \theta) \cos(\alpha - \theta)}} \right]^2}$$

Empuxo passivo

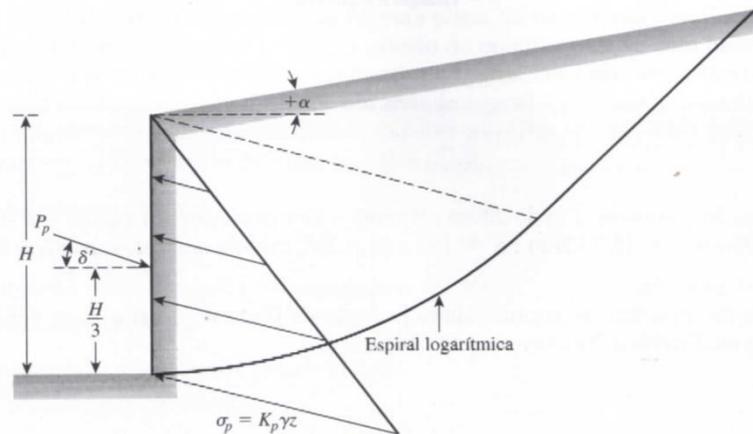
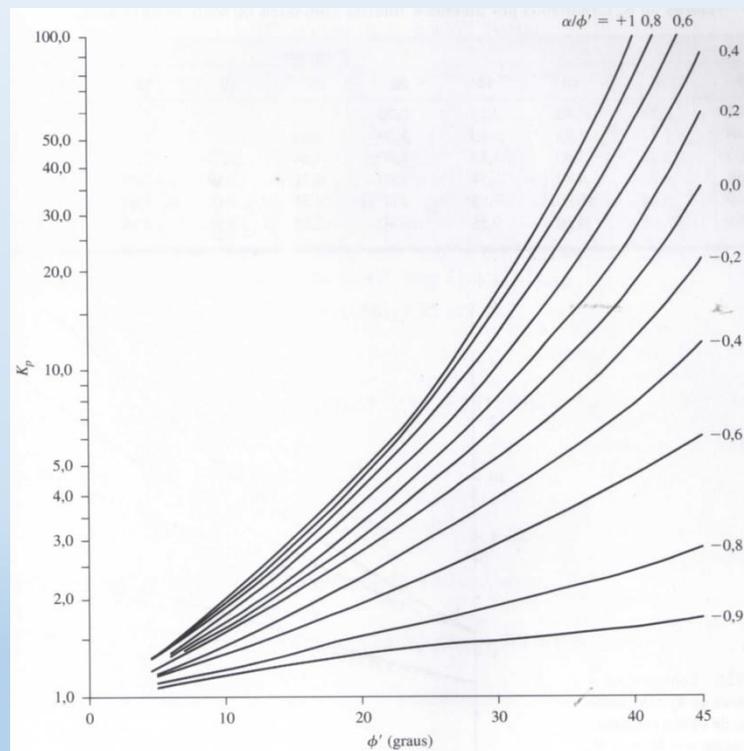
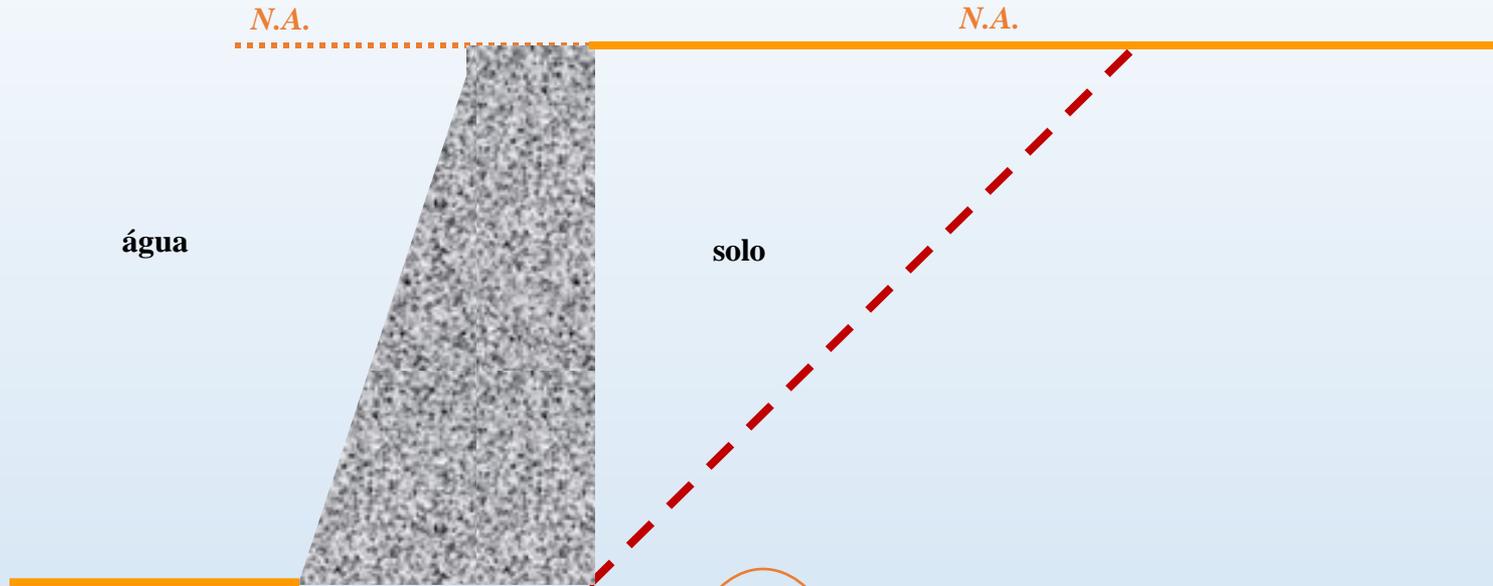


Figura 13.5 Solução de Caquot e Kerisel para K_p [eq. (13.12)].

Das (2006)



Efeito de submersão



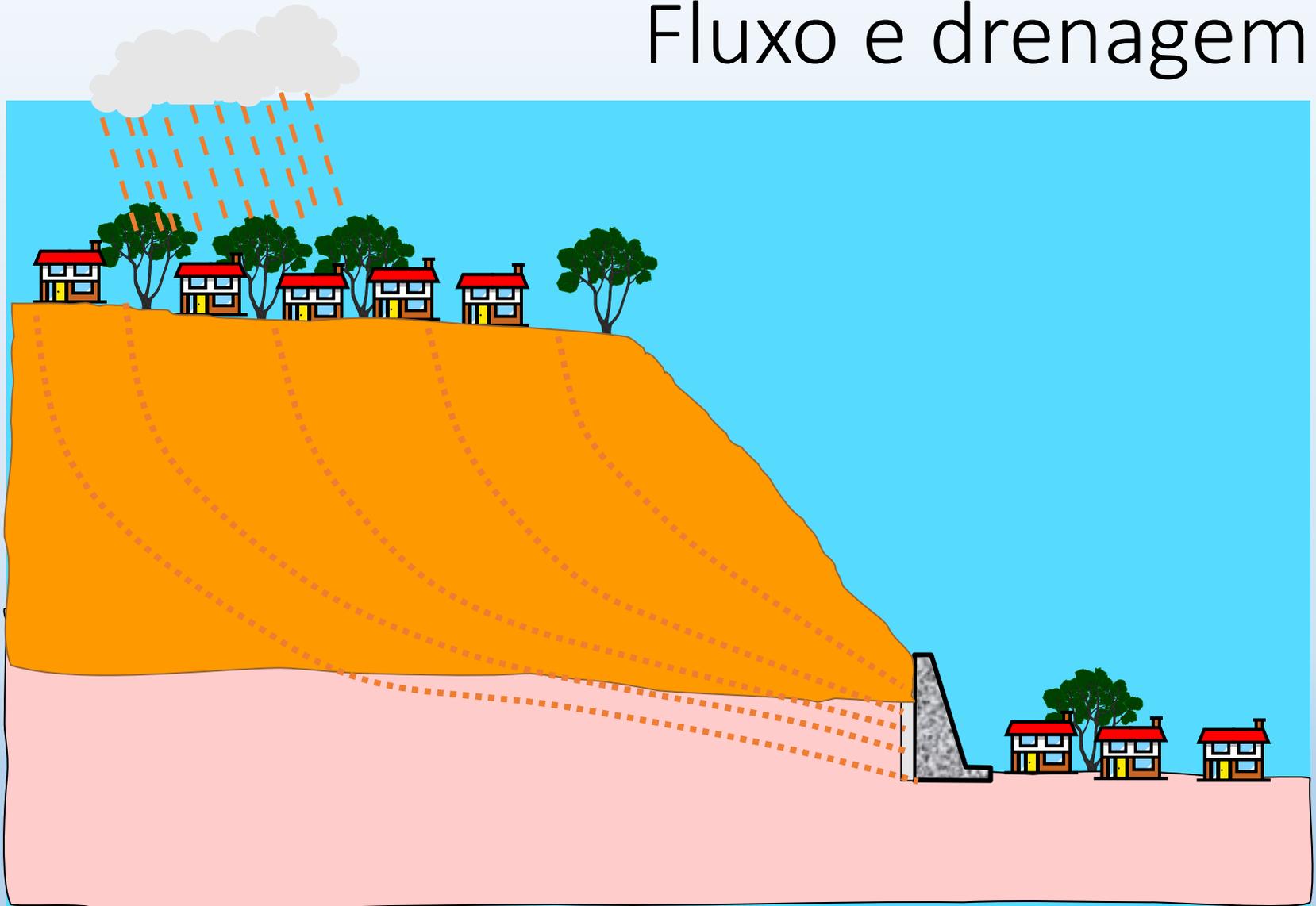
$$E_a = \frac{1}{2} \gamma_w H^2 + \frac{1}{2} \gamma_{sub} H^2 K_a$$

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.

Fluxo e drenagem

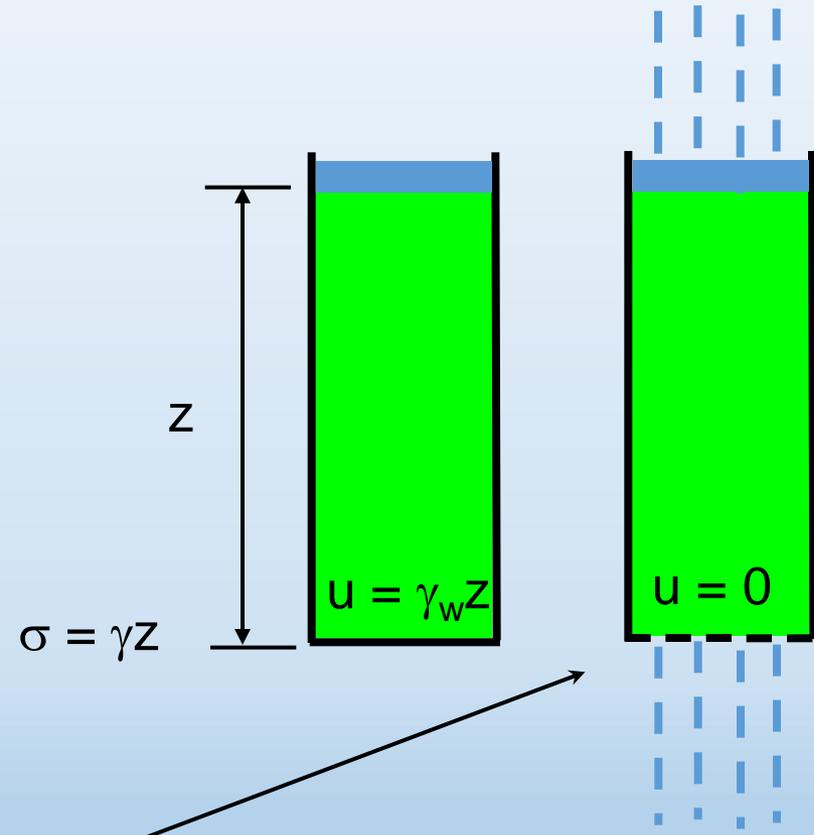


Effective stress

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

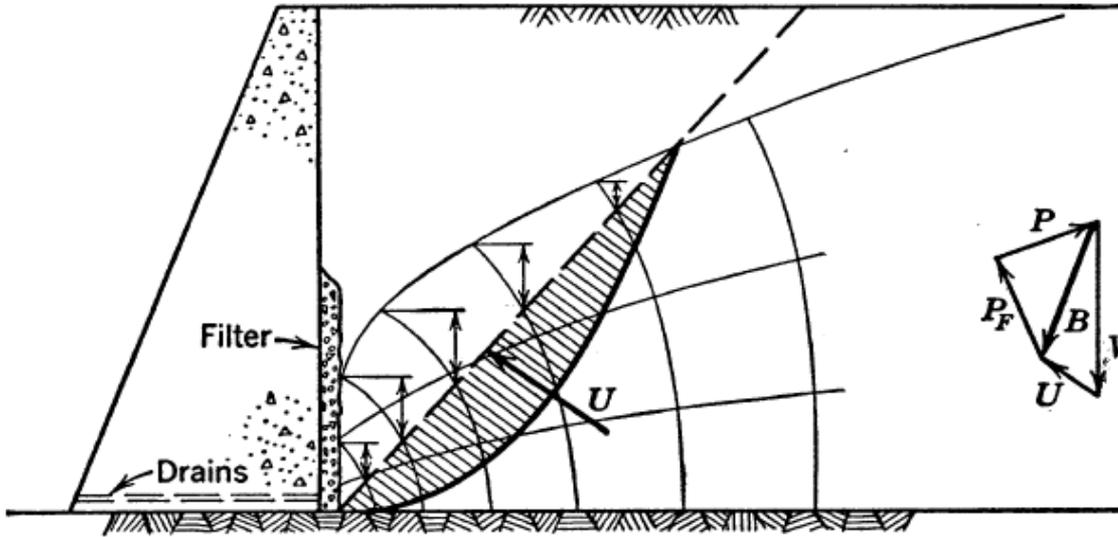
σ (green) \rightarrow $(q + \gamma z)$
 u (blue) \rightarrow pore pressure

σ' governs all soil behaviour

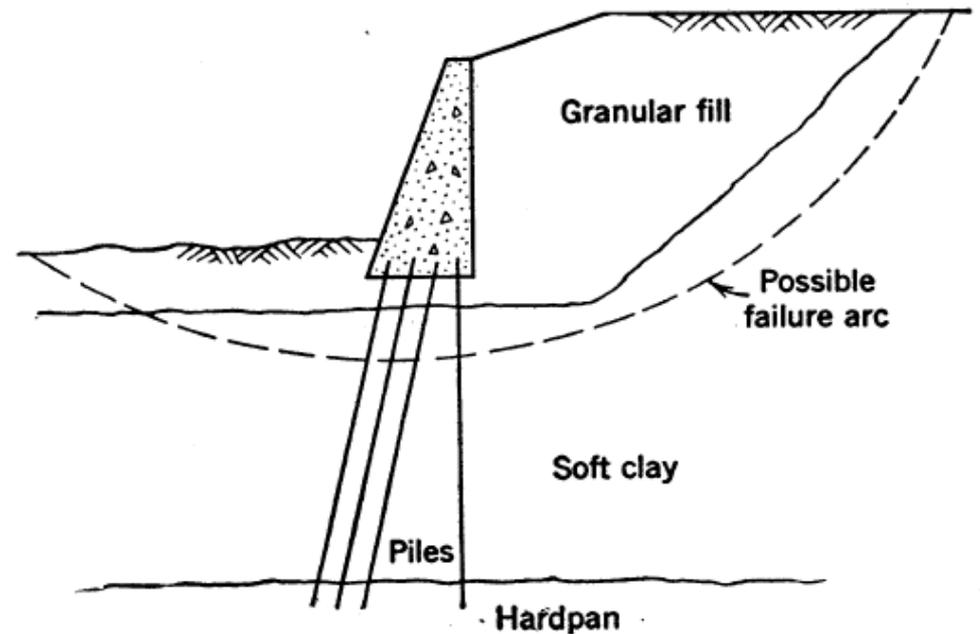


Importante: fluxo vertical \Rightarrow pressões neutras nulas!

Aspectos para serem lembrados



Taylor (1948)



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**

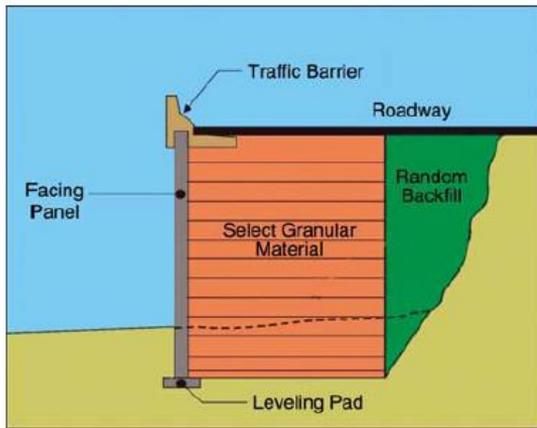


Figure 21.24 MSE wall. (Courtesy of The Reinforced Earth Company.)

Briaud (2013)





Bored piles

Plan view



Sheet piles

Plan view



Figure 21.31 Bored piles and sheet pile cantilever walls. (d: Courtesy of Associated Pacific Constructors, Inc.)

Briaud (2013)

