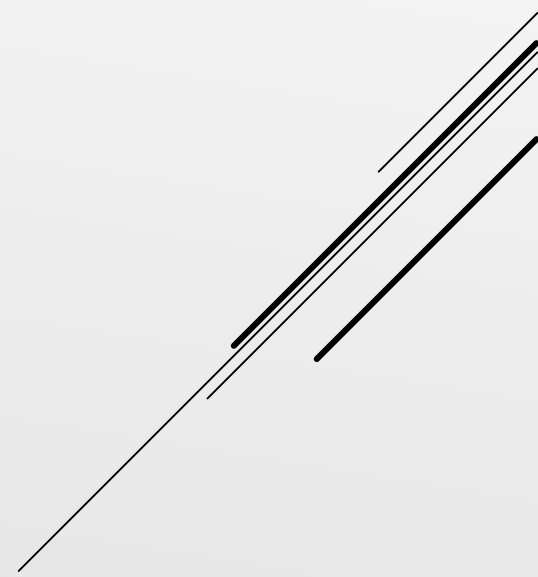


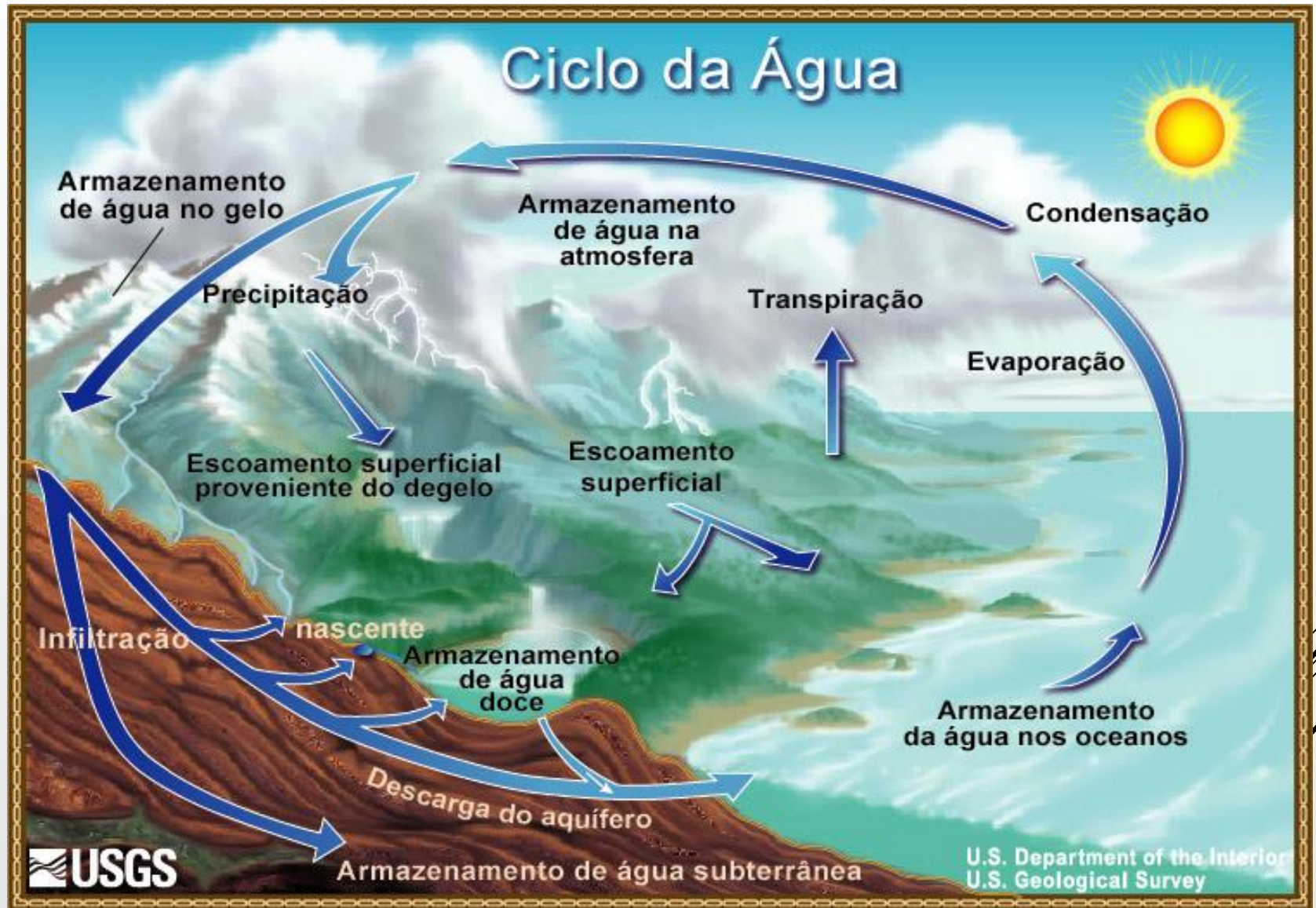
Água nos Solos

Princípio das Tensões Efetivas

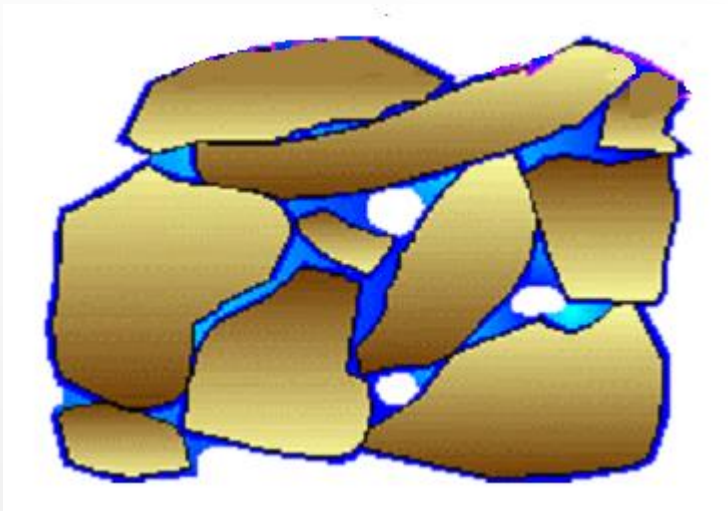
Fernando A. M. Marinho
2019



Água nos Solos

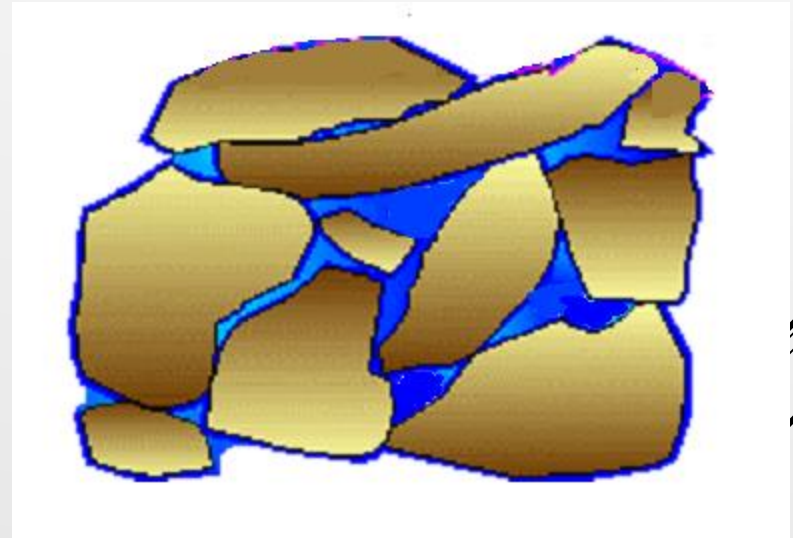


- A evaporação não acontece somente nos oceanos. Ela ocorre no próprio solo também
- O solo armazena água e a pressão da água afeta a resistência dos solos.

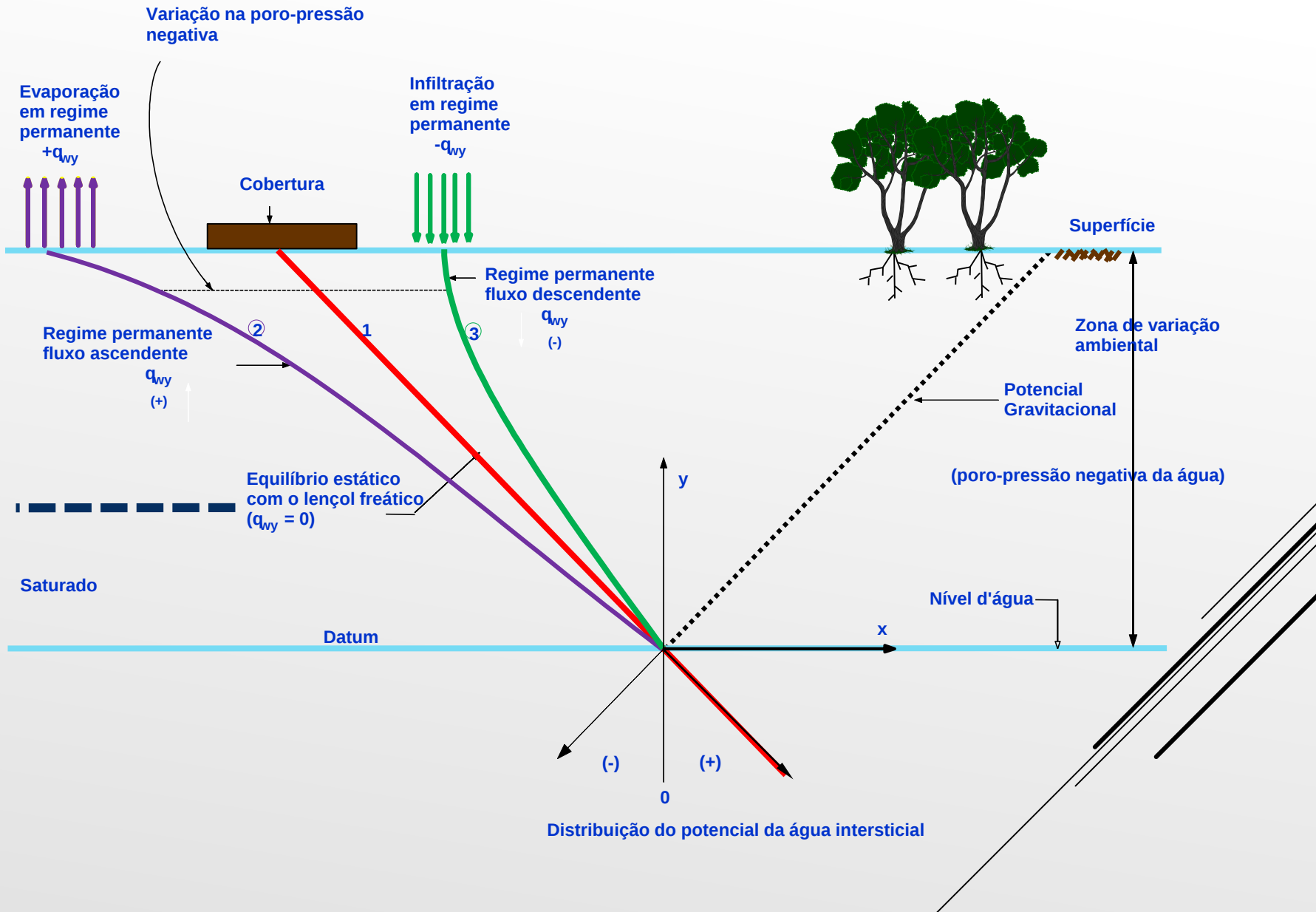


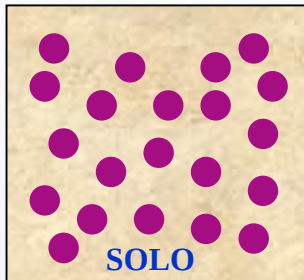
$S < 100\%$

$S = 100\%$

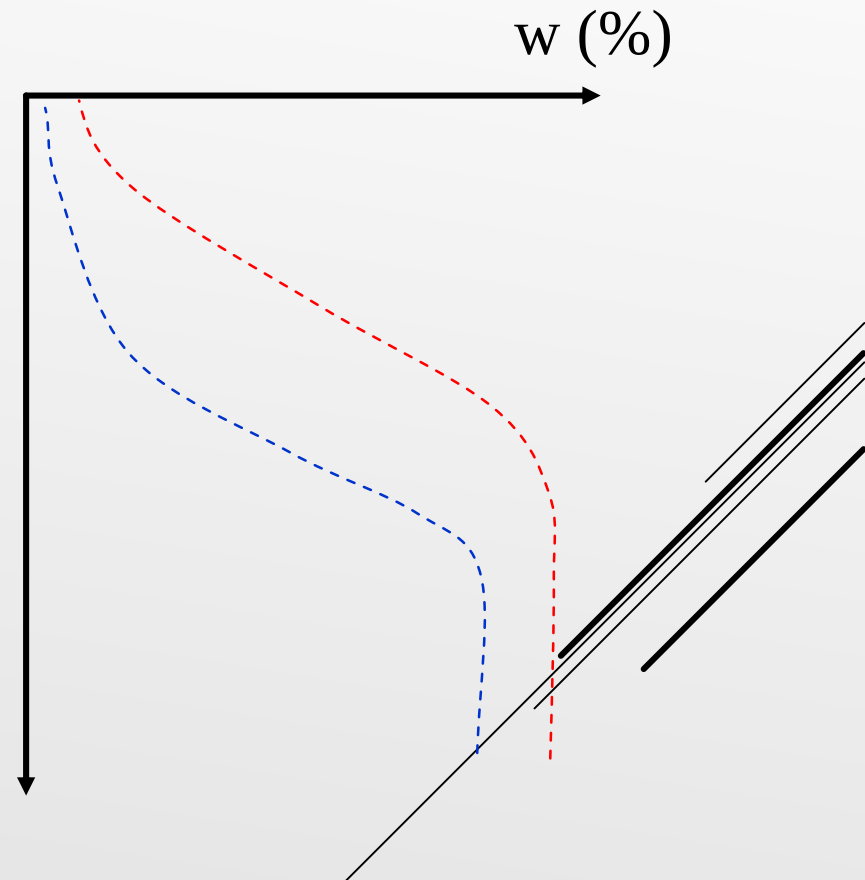
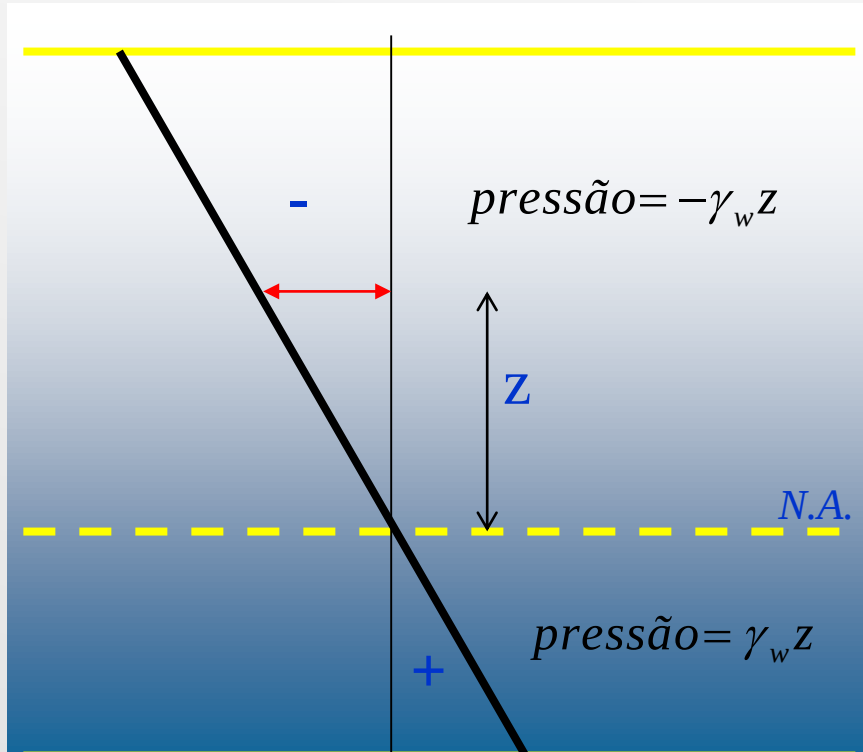


Perfis de sucção





Água armazenada em equilíbrio Sem fluxo

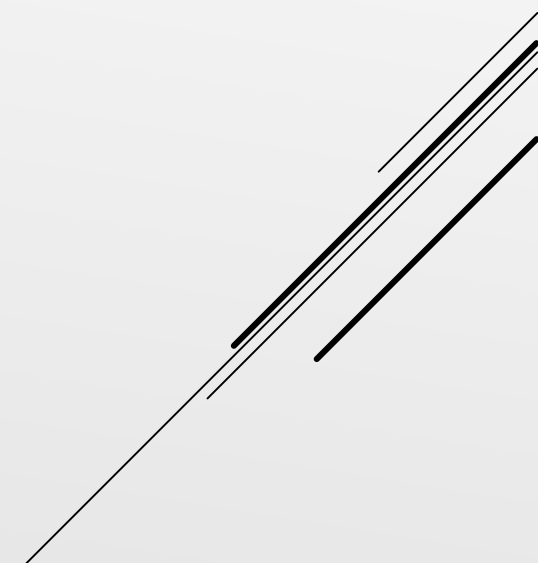


Capilaridade

- A adesão e a tensão superficial juntas causam o fenômeno da capilaridade
- Capilaridade é um movimento que ocorre em qualquer direção
- A altura de ascensão capilar é diretamente proporcional a tensão superficial do líquido e a adesão com a superfície sólida, mas inversamente proporcional ao raio do tubo e densidade do líquido

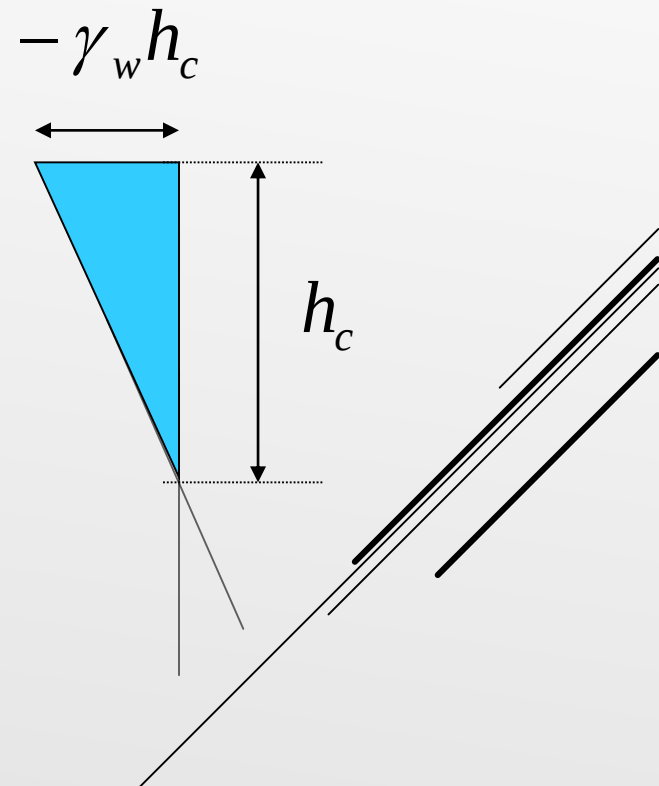
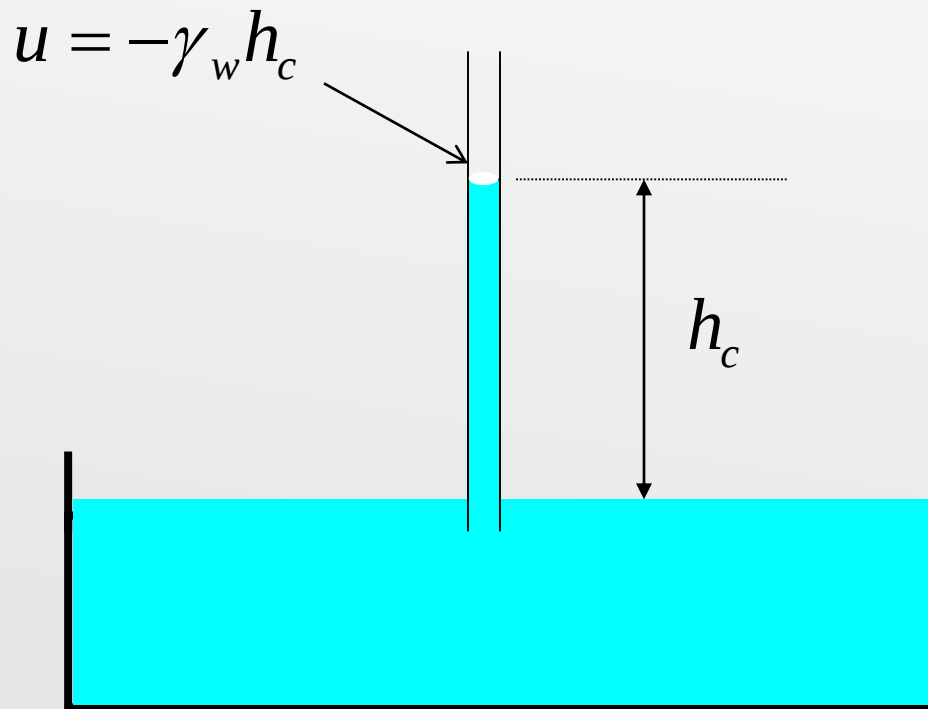


Capilaridade, Retenção de água e Resistência



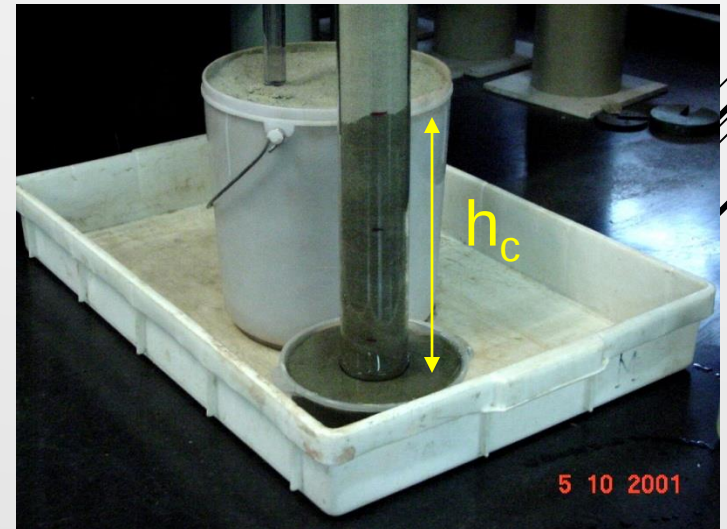
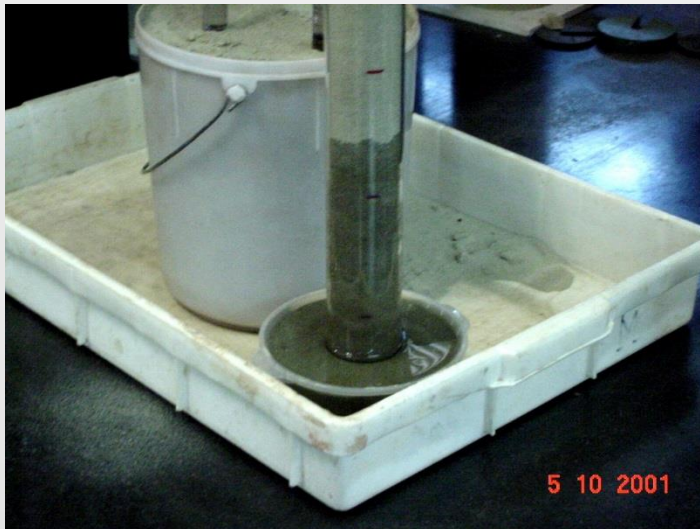
O Que é Sucção?

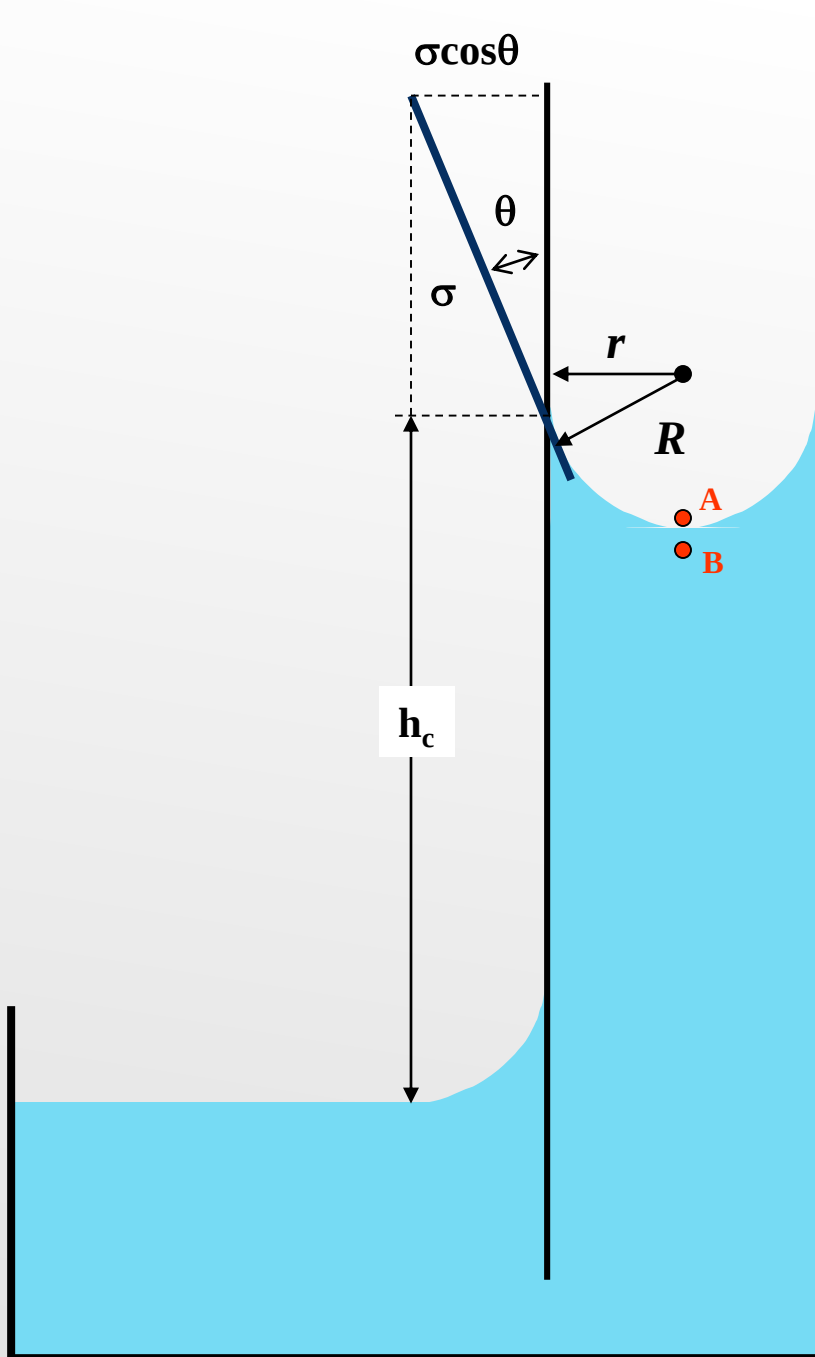
Ascensão Capilar



O que é Sucção?

Ascensão Capilar





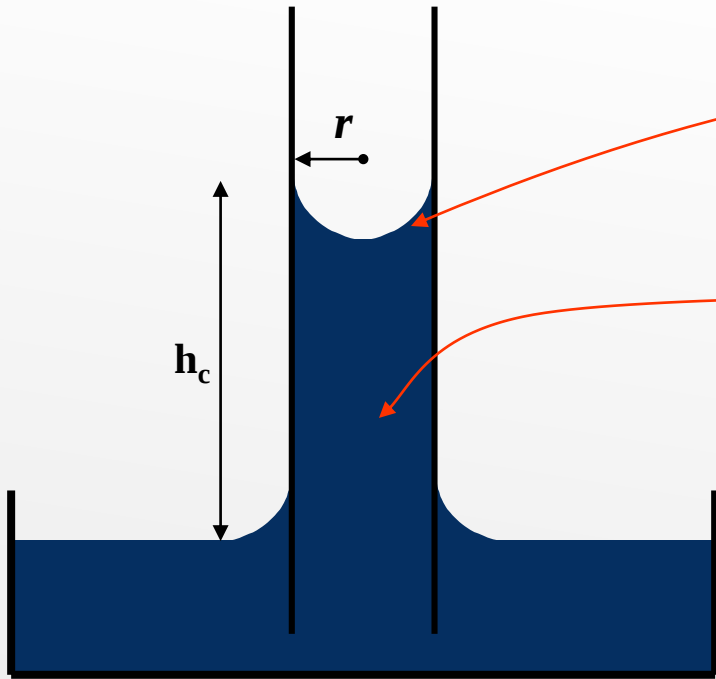
O excesso de pressão acima do menisco comparada com a pressão imediatamente abaixo vale:

$$\frac{2\gamma}{r}$$

$$P_A - P_B = \frac{2\gamma}{r}$$

- A água sobe pelo tubo até a pressão hidrostática da coluna dentro do tubo igualar o excesso de pressão: $(2g/r)$.
- Como a circunferência do tubo vale, $2\pi r$, a força total no fluido para cima, vale: $(2\pi r \gamma \cos \theta)$
- Esta força suporta a massa da coluna de água até a altura h_c .

$$R = \frac{r}{\cos \theta}$$



Massa total de água no tubo

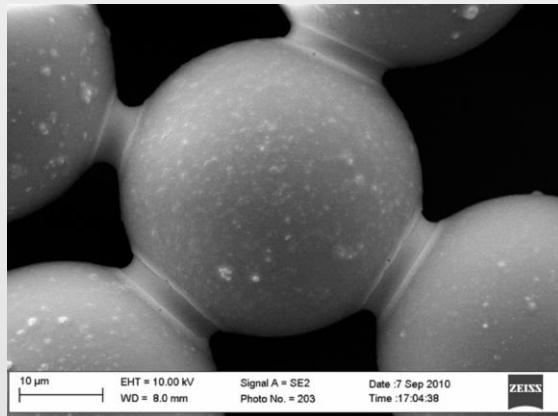
$$\rho_w g (\pi r^2 h_c + V)$$

Quando em equilíbrio as forças na água e a massa da água devem se balancear

$$2\pi r \gamma \cos\theta = \rho_w g (\pi r^2 h_c + V)$$

V é o volume correspondente ao anel capilar e é desprezível

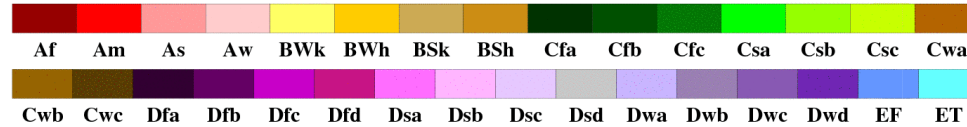
$$h_c = \frac{2\gamma \cos\theta}{\rho_w g r}$$



Climas da Terra

World Map of Köppen–Geiger Climate Classification

observed using CRU TS 2.1 temperature and GPCC Full v4 precipitation data, period 1926 to 1950



Main climates

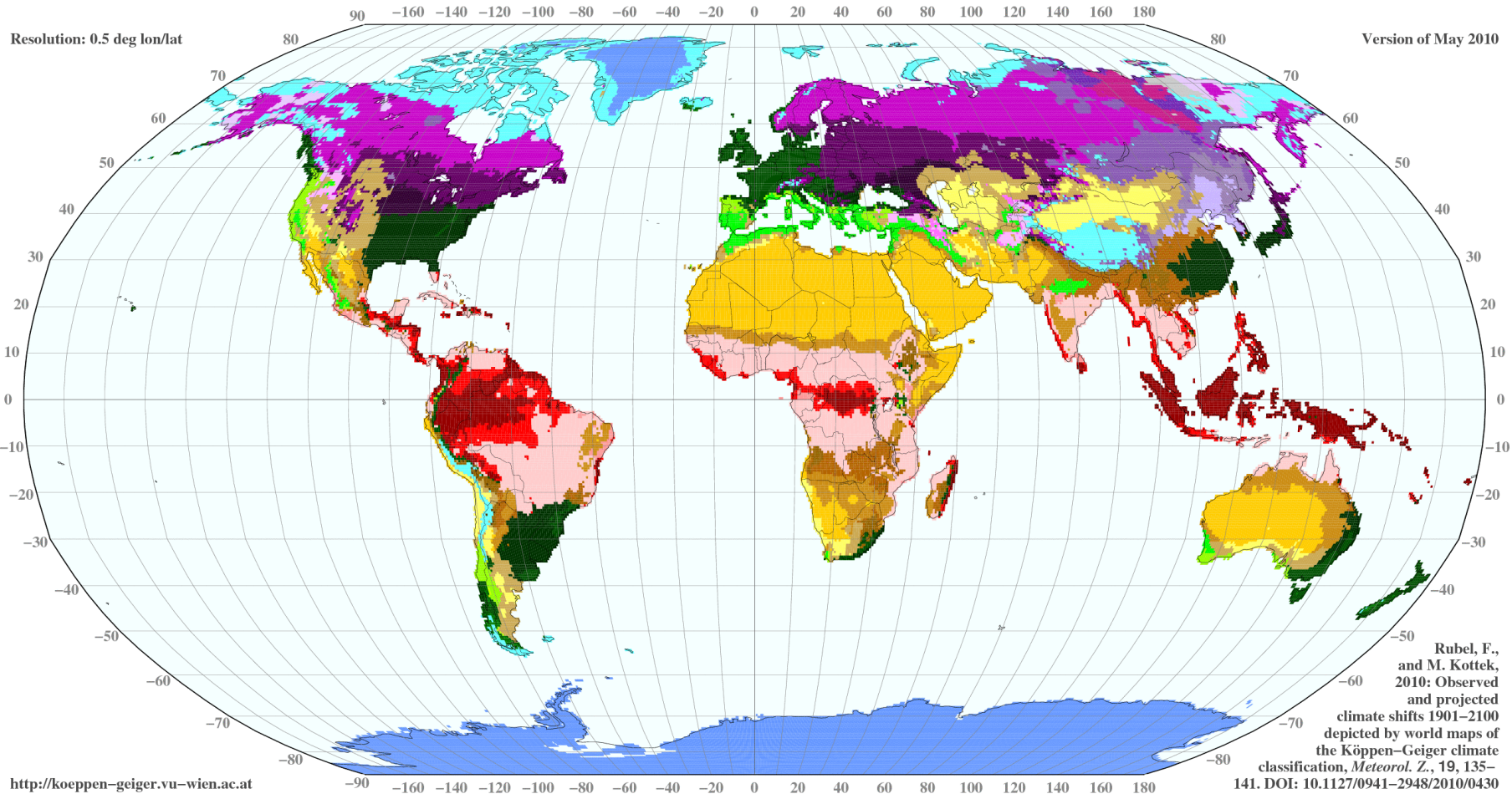
A: equatorial
B: arid
C: warm temperate
D: snow
E: polar

Precipitation

W: desert
S: steppe
f: fully humid
s: summer dry
w: winter dry
m: monsoonal

Temperature

h: hot arid
k: cold arid
a: hot summer
b: warm summer
c: cool summer
d: extremely continental
F: polar frost
T: polar tundra



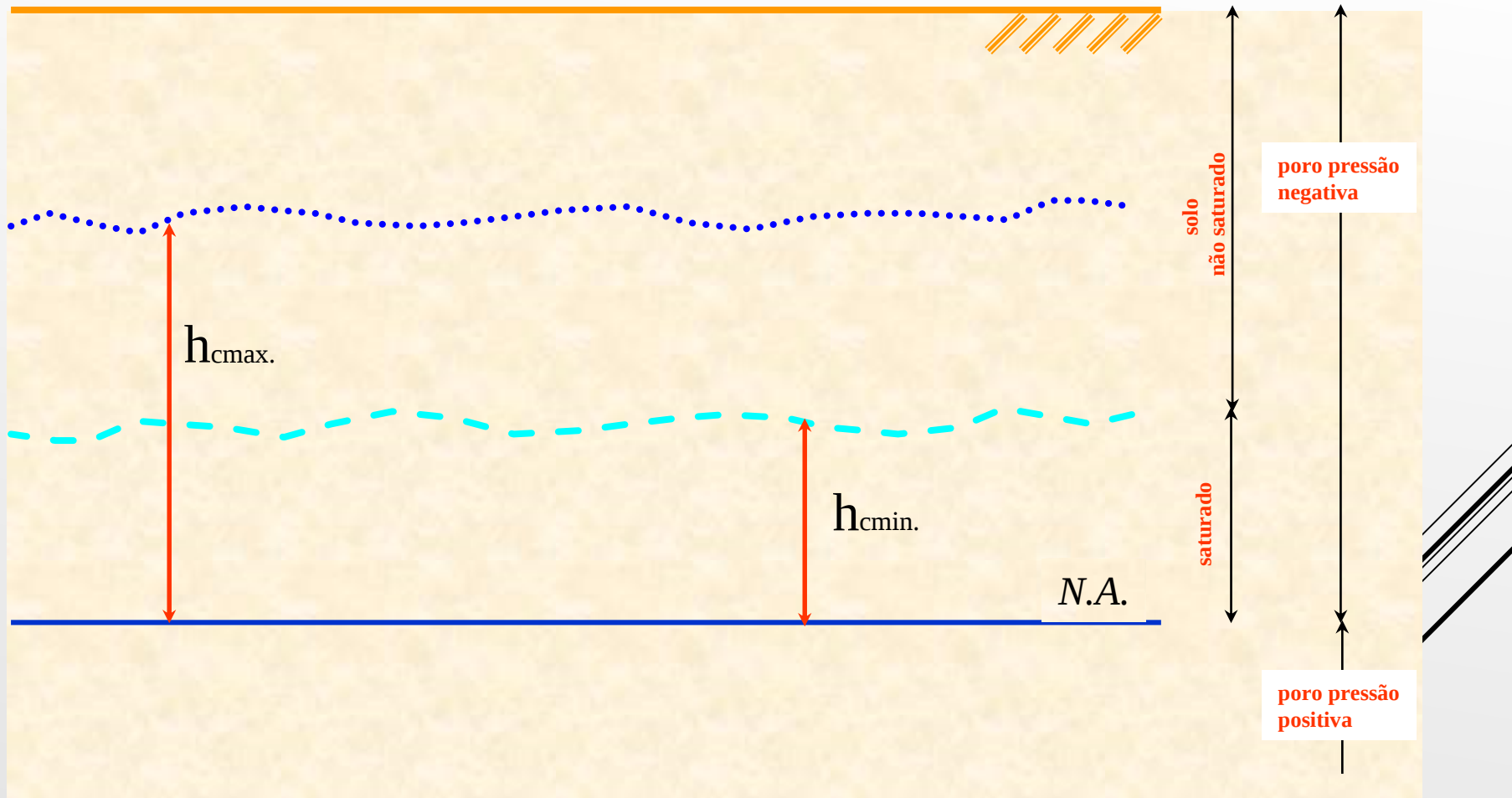
A água e a falta de água



A água e o excesso de água

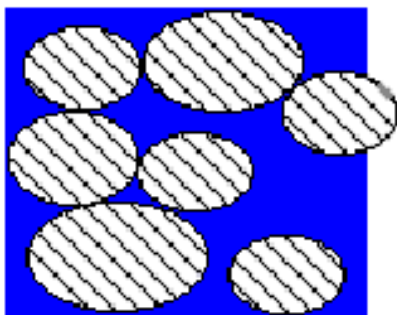


A Zona Vadosa

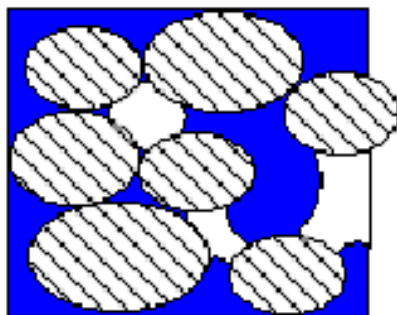


Efeito da capilaridade

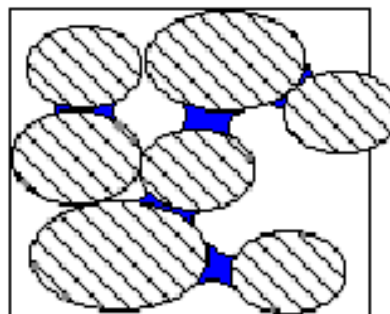




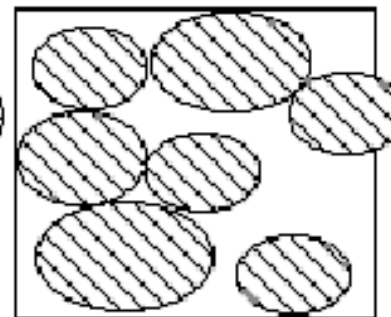
Saturado



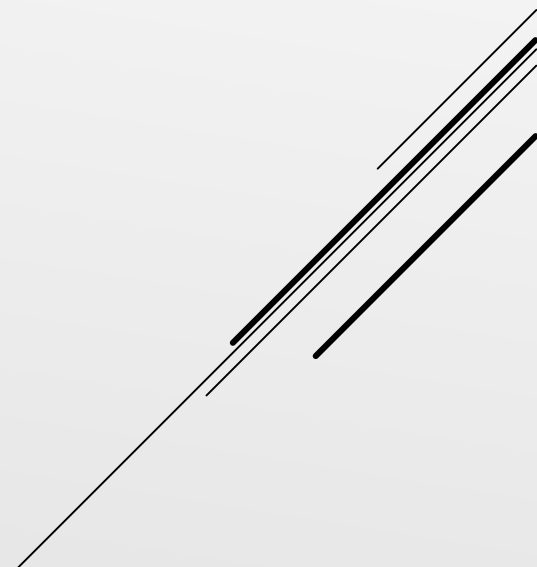
Capacidade de campo



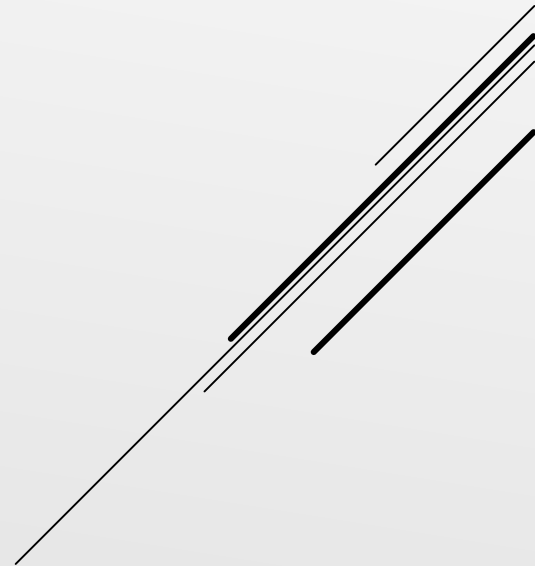
**Ponto de murchamento
das plantas**



Solo seco



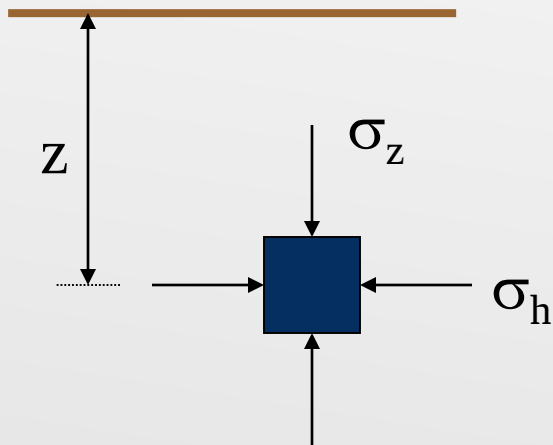
Solo Saturado



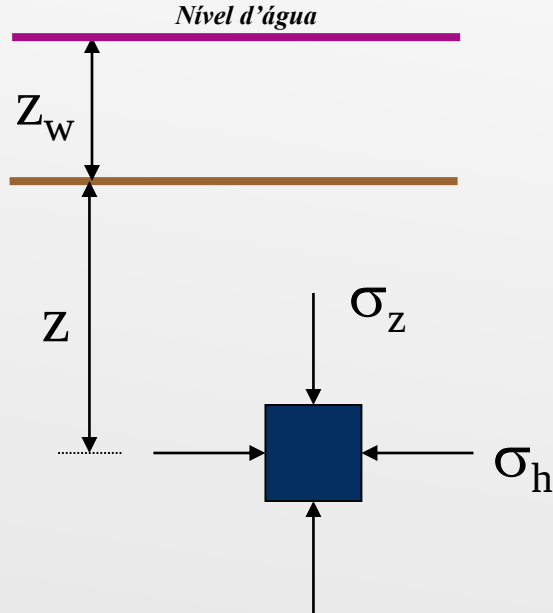
Tensões no Solo

- No solo a tensão vertical em uma determinada profundidade é devida ao peso de tudo que se encontra acima.
- Ou seja, grãos de solo, água, fundações.
- Desta forma, a tensão normalmente aumenta com a profundidade.

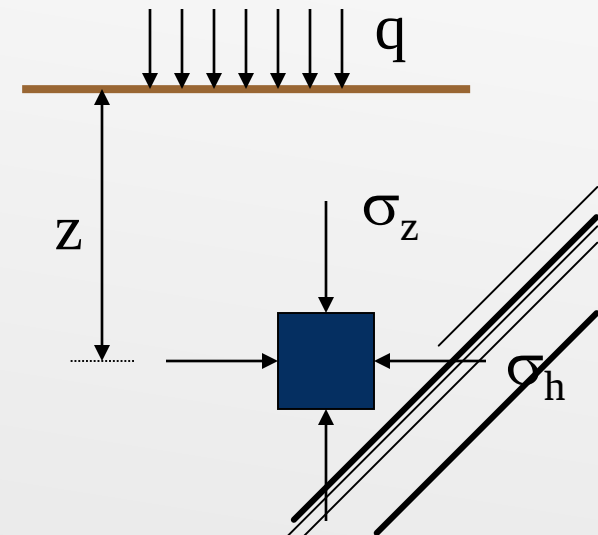
γ = peso específico do solo



$$\sigma_z = \gamma Z$$



$$\sigma_z = \gamma Z + \gamma_w Z_w$$



$$\sigma_z = \gamma Z + q$$

Tensões no Solo

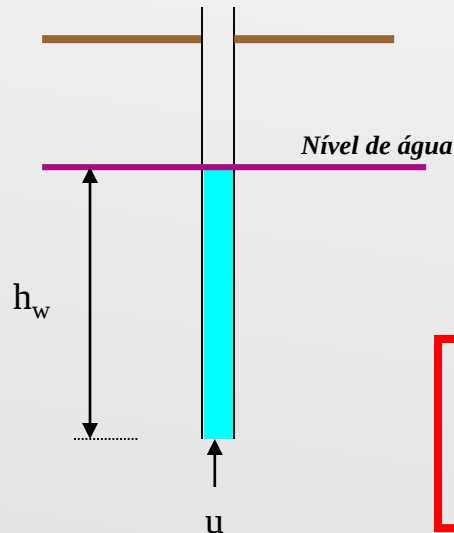
- ✓ Lembre-se que γ é o peso de tudo (solo e água) por unidade de volume.
- ✓ Como σ_z advém do peso total do solo ele é conhecido como tensão total.
- ✓ Note que a água no “lago” mostrado anteriormente aplica uma tensão total na superfície do solo da mesma forma que a água aplica um tensão na base de um copo de água.
- ✓ O peso específico de solos varia aproximadamente entre 20kN/m^3 para um solo saturado e 16kN/m^3 para um solo seco. E o peso específico da água vale 10kN/m^3 .
- ✓ Existem também as tensões horizontais σ_h , mas não existe uma relação simples entre σ_z e σ_h



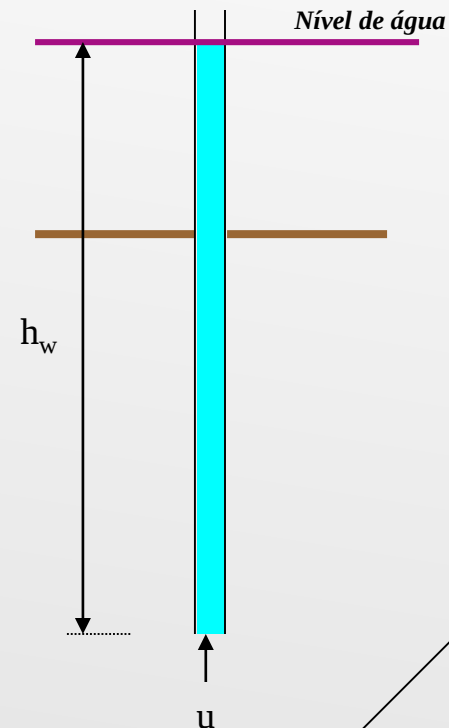
Tensões no Solo

Água no solo e pressão da água

- A água nos poros de um solo saturado possui uma pressão conhecida como pressão de poro ou pressão neutra - u .

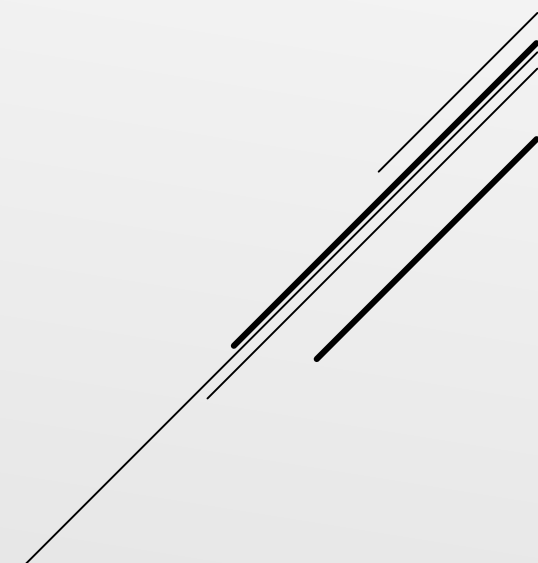


$$u = \gamma_w h_w$$



Tensão Efetiva

- Com o objetivo de simplificar a análise do comportamento do solo é comum se considerar o solo como um meio contínuo.
- A natureza das partículas são ignoradas e todo o solo é modelado como uma pequena área finita ou muito pequena (infinitesimal).
- A estas áreas são definidas propriedades de massas do solo e servem como elementos onde são aplicadas as tensões e deformações.
- Na realidade tanto as tensões como os deslocamentos agem nos pontos de contatos entre as partículas



Tensão Efetiva

Por que é tão importante?

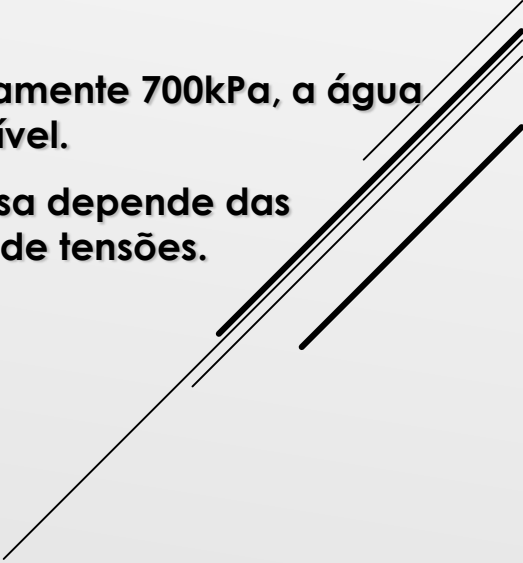
Porque todos os efeitos mensuráveis devido a mudança de tensão são exclusivamente devidos a mudanças na tensão efetiva

Os efeitos são:

- Compressão (variação de volume devido a tensão normal)
- Distorção (mudança de forma devido a tensão cisalhante)
- Mudança na resistência

Assume-se que para o nível de tensão usual da engenharia, aproximadamente 700kPa, a água e as partículas sólidas são incompressíveis e o ar altamente compressível.

A compressibilidade e resistência do “esqueleto” sólido como uma massa depende das propriedades das partículas, da estrutura do “esqueleto” e da história de tensões.



Conseqüências

O solo saturado só pode variar de volume se a água sair dos poros ou entrar nos mesmos.

Se não se permite que um solo saturado mude seu volume de água intersticial o mesmo não poderá mudar de volume. **Isto chama-se condição não drenada.**

Sob estas condições de carregamento (não drenado) a reação do solo é: mudar a pressão da água (positiva ou negativa).

Isto acontece para compensar a mudança de tensão.

Se por outro lado é permitida a drenagem ou absorção da água nos poros o **carregamento é chamado drenado.**

Nos solos não saturados e secos o pode haver mudanças de volume sem ganho ou perda de água.

Tensões no Solo

Tensão Efetiva

- É claro que a movimentação do solo e a instabilidade dele pode ser causada por mudanças na tensão total, devida as cargas de fundações ou escavações em geral.
- No entanto, não é tão obvio que os movimentos do solo possam ser devido às variações de poro pressão (pressão neutra).
- Desta forma, se existe indução de deformação por mudança na tensão total ou da poro pressão, existe a possibilidade do comportamento do solo ser governado por uma combinação entre σ e u .
- Esta combinação é conhecida como tensão efetiva (σ'), por que ela é efetiva em determinar o comportamento do solo.
- O princípio das tensões efetivas foi estabelecido por Terzaghi em 1923.

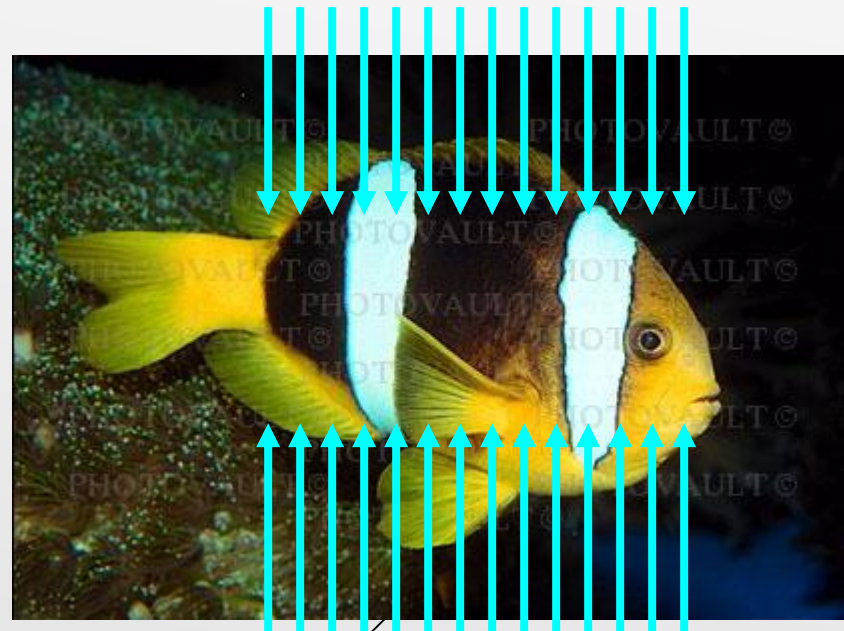
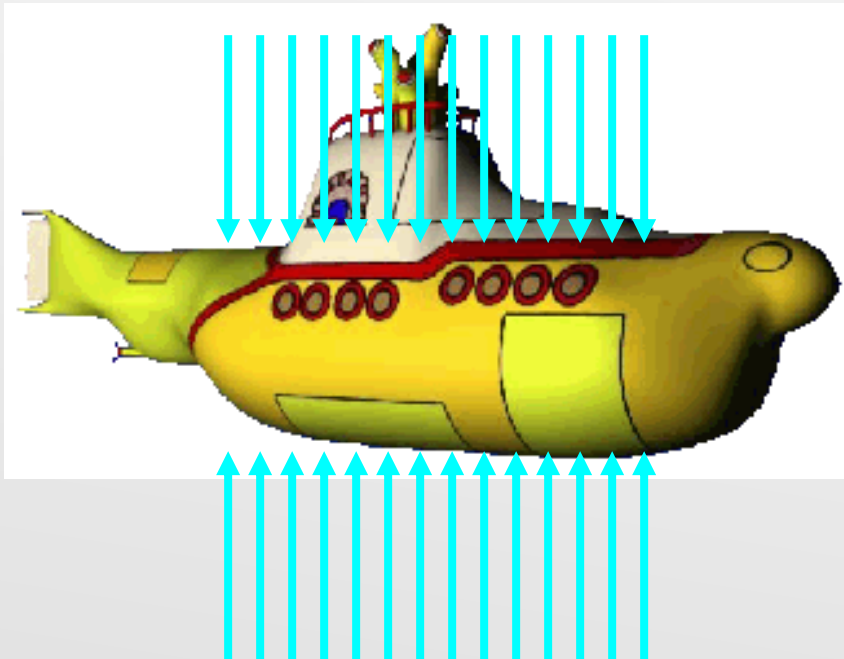
$$\sigma' = \sigma - u$$

σ

$u = \text{pressão atmosférica}$

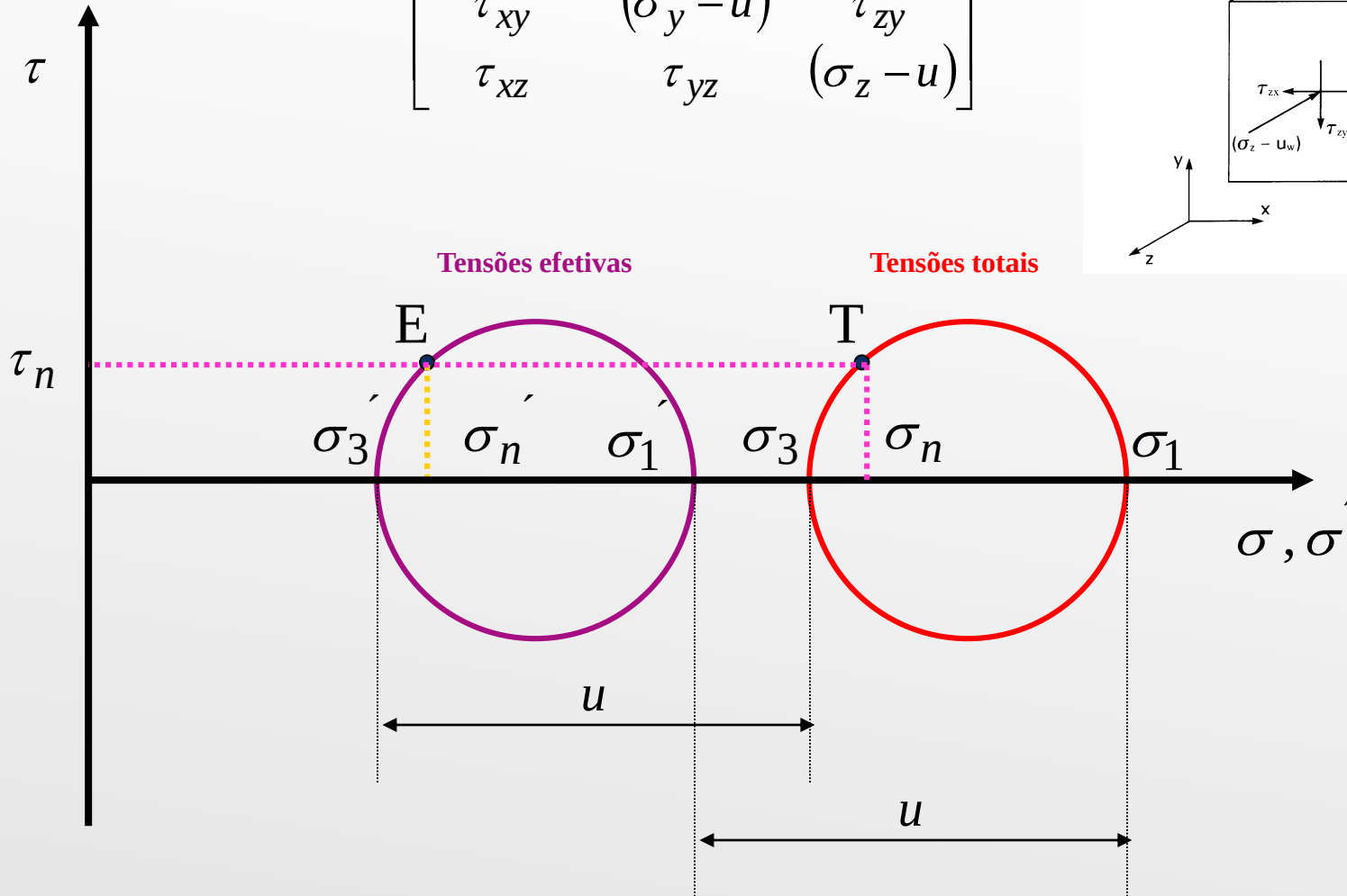
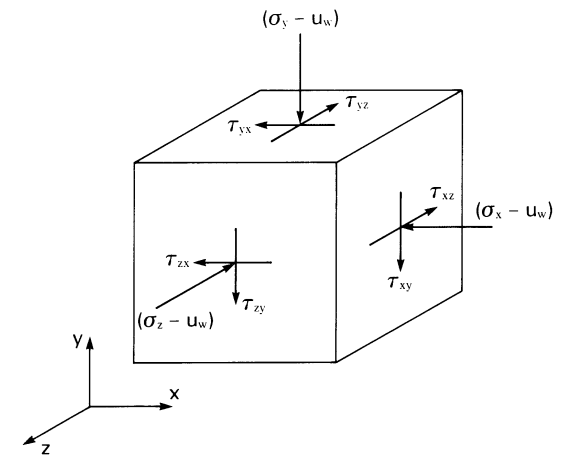
 σ' $>$ σ

$u \cong \text{pressão na água}$

 σ' 

Tensor de tensões para solo saturado

$$\begin{bmatrix} (\sigma_x - u) & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & (\sigma_y - u) & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & (\sigma_z - u) \end{bmatrix}$$



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

Tensões no Solo

NA

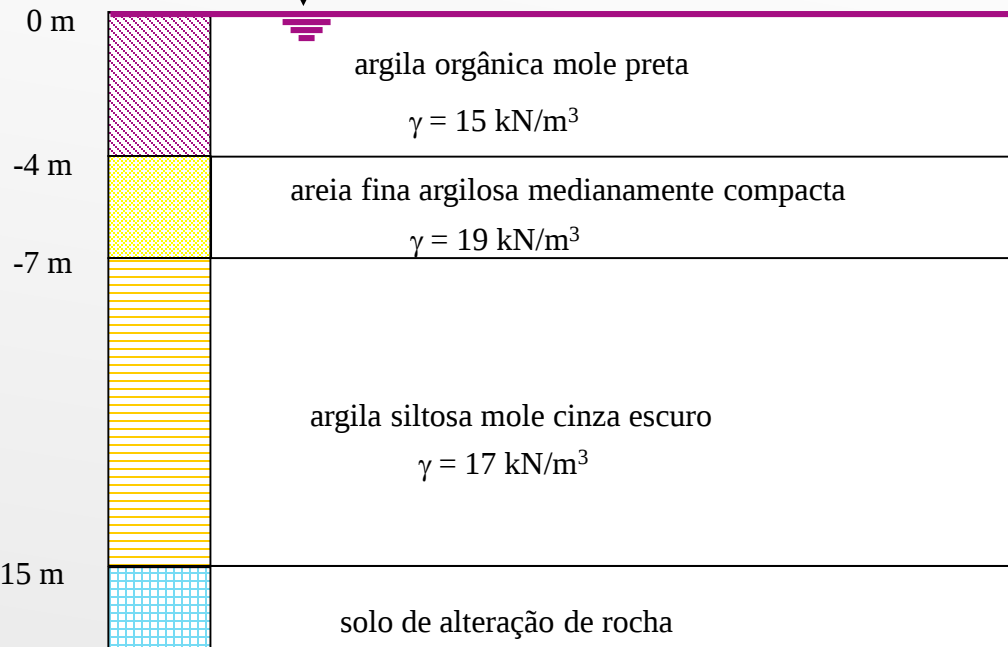
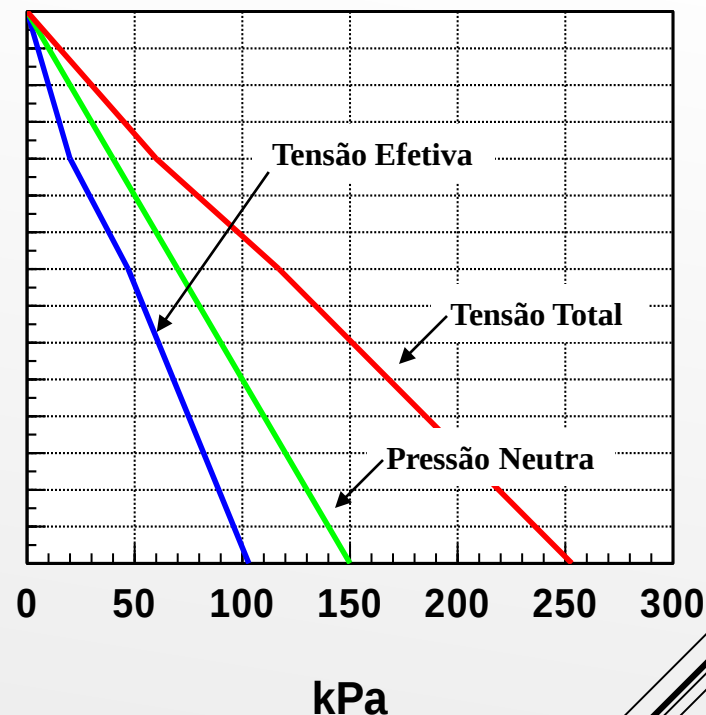


Diagrama de tensões



Exemplo para a cota -7m

$$\sigma = 15 \cdot 4 + 19 \cdot 3 = 117 \text{ kPa}$$

$$u = 10 \cdot 7 = 70 \text{ kPa}$$

$$\sigma' = \sigma - u = 47 \text{ kPa}$$

Aterro

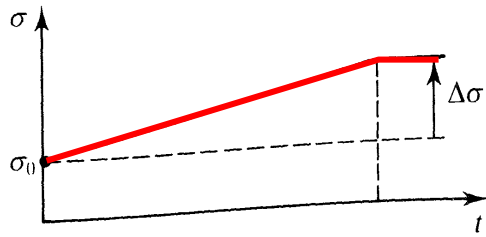
σ_v

Solo Natural



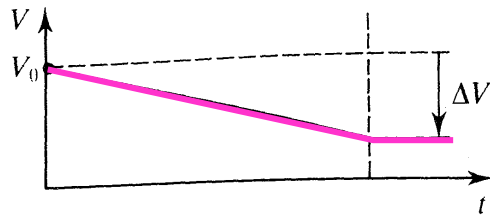
Barragem Los Vaqueros





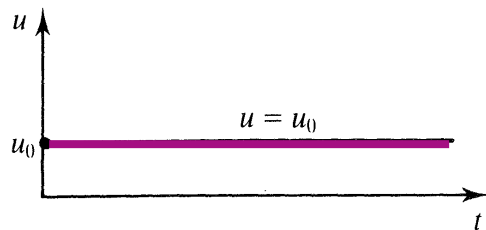
(a)

Carregamento – tensões totais



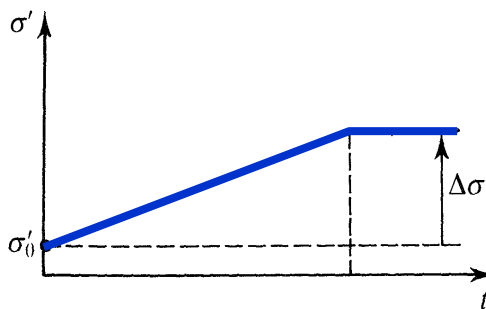
(b)

Variação de volume



(c)

Desenvolvimento de pressão neutra



(d)

Variação de tensão efetiva

Atkinson (1993)

Comportamento Drenado

Carregamento – tensões totais

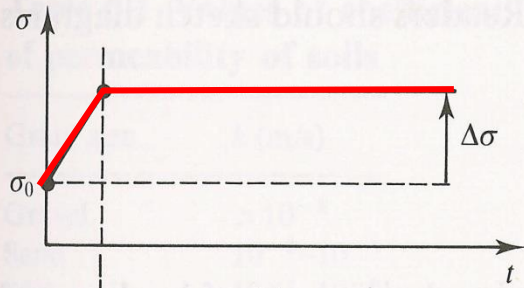
Variação de volume

Desenvolvimento de pressão neutra

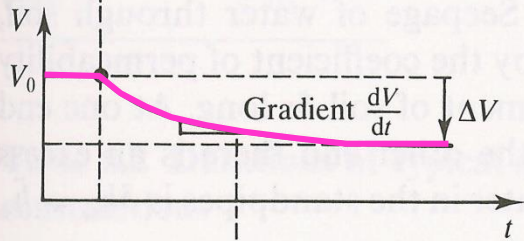
Variação de tensão efetiva

Atkinson (1993)

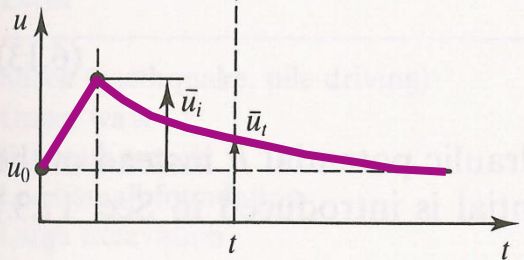
Comportamento não Drenado



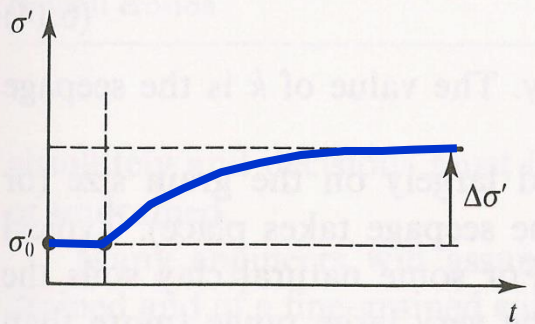
(a)



(b)



(c)



(d)