



Mecânica dos Solos Não Saturados Introdução

Fernando A. M. Marinho

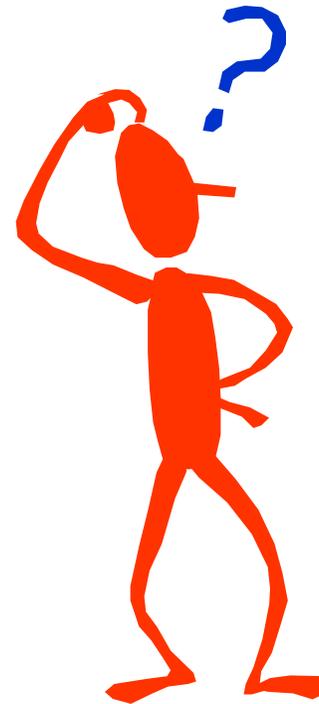
Universidade de São Paulo

2019

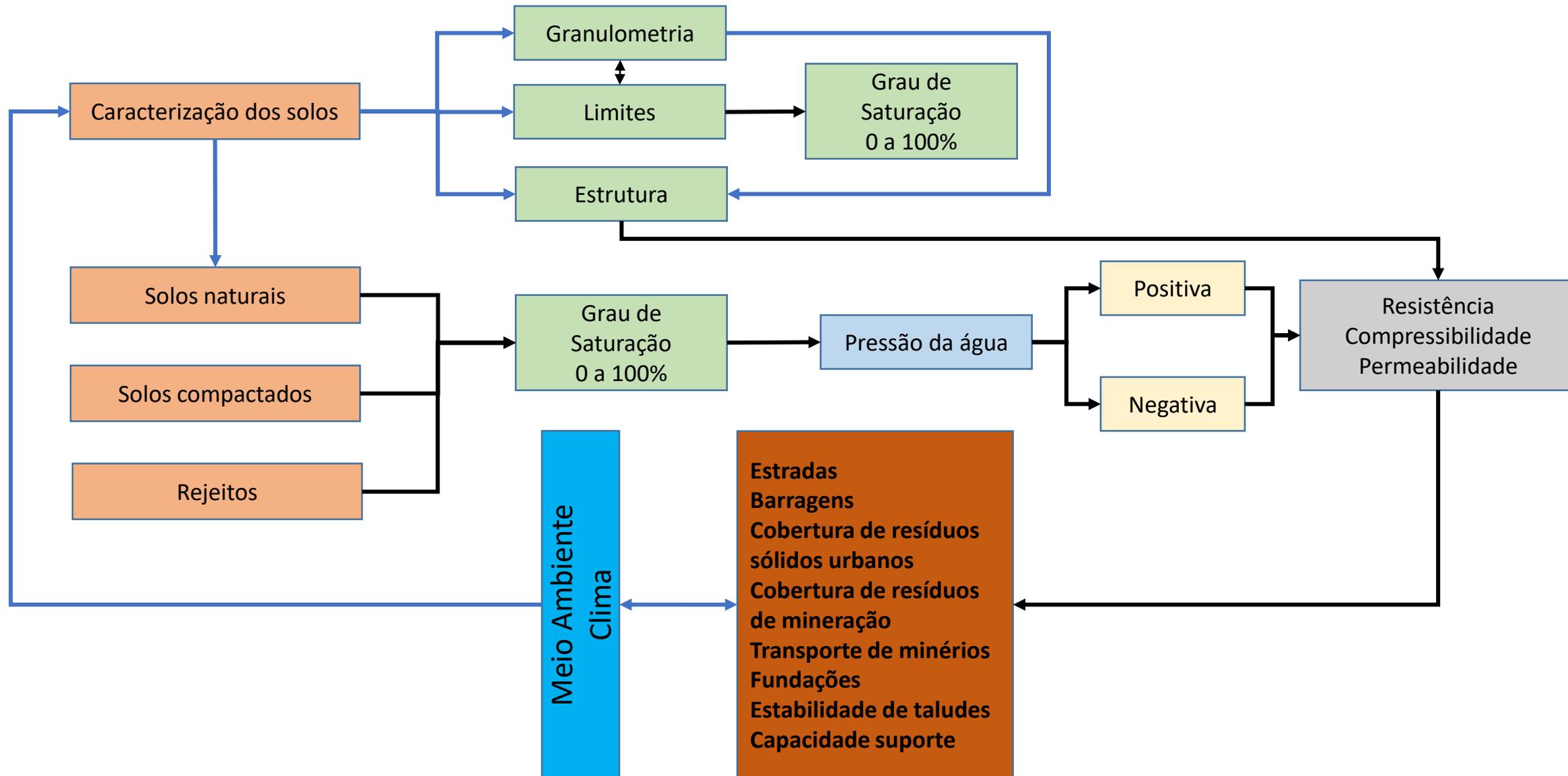
Mecânica dos Solos Não Saturados

- O significado da mecânica dos solos não saturados
- O fator climático e a relação com o solo
- O que é sucção?
- Medição de sucção
- O perfil de sucção
- A retenção de água em meios porosos
- A relação entre a quantidade de água e a sucção (curva de retenção)
 - Modelos de ajuste
 - Modelos para a função de permeabilidade
- Os efeitos da sucção
 - Na resistência ao cisalhamento
 - No fluxo de água
 - Na compressibilidade
- Aplicações
 - Taludes
 - Aterros/Barragens
 - Armazenamento e fluxo de água em material poroso
- Considerações finais

Por que Estudar a Mecânica dos Solos Não Saturados?



Importância dos Conceitos da Mecânica dos Solos Não Saturados

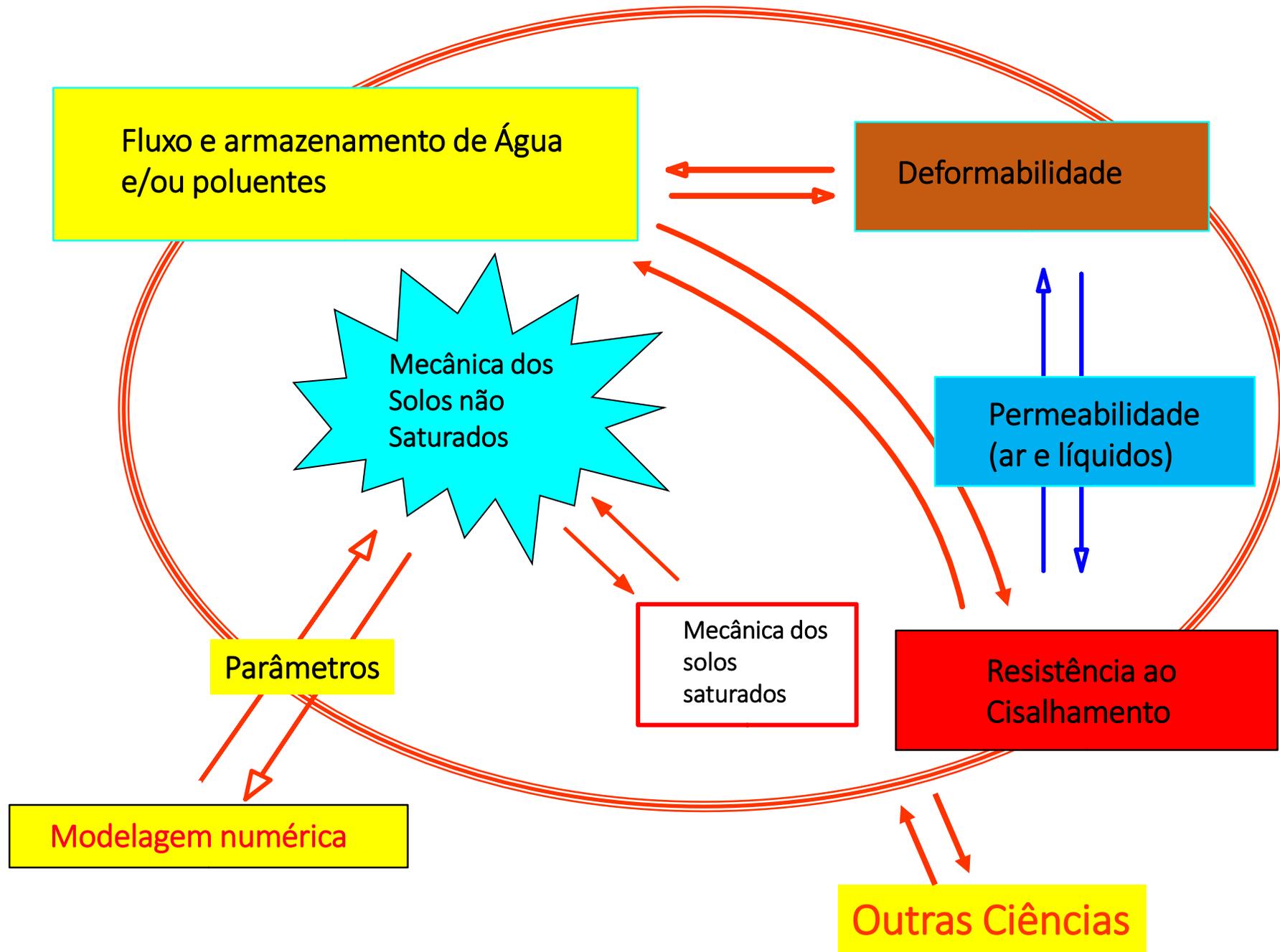


Enfoques

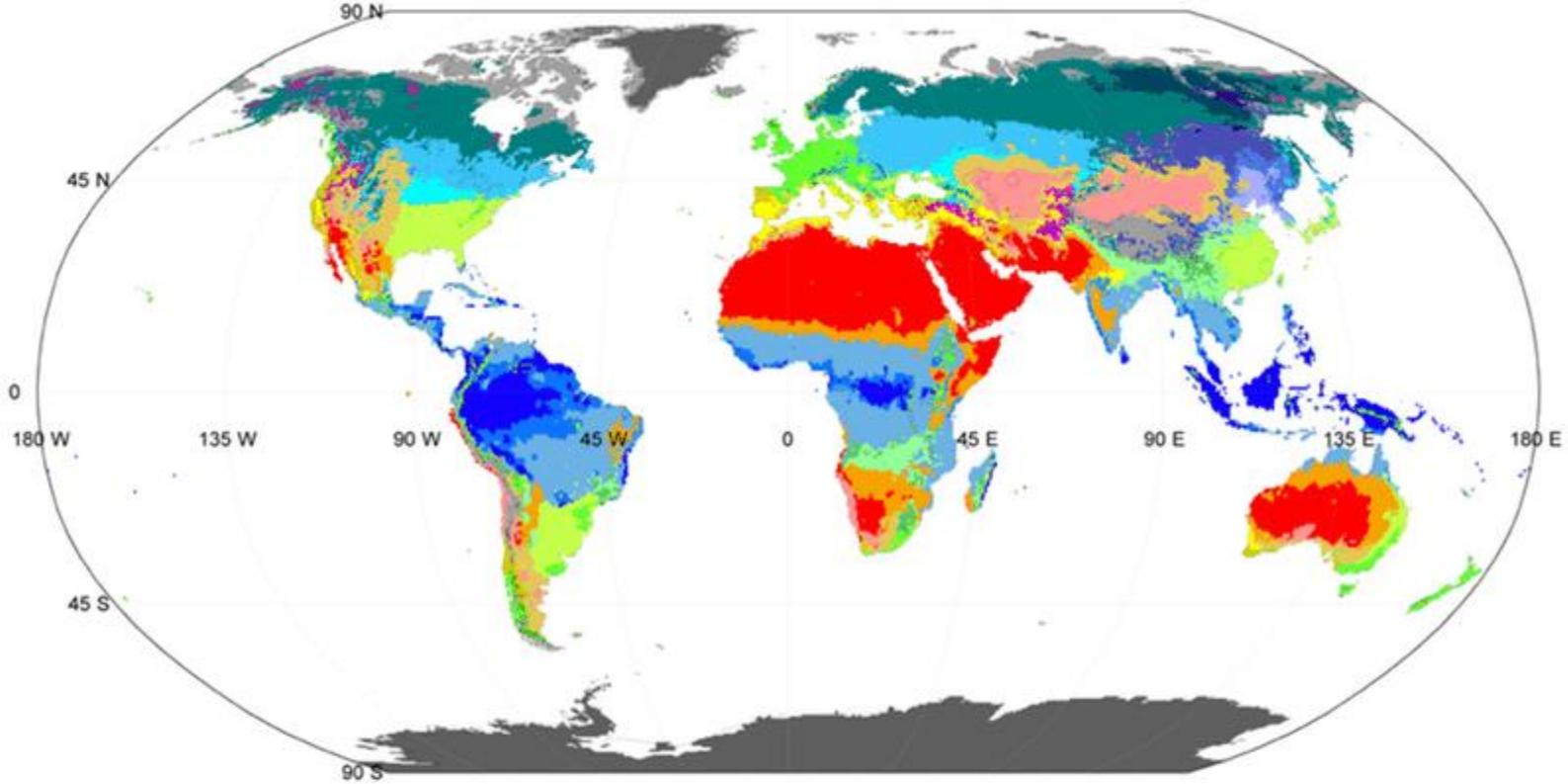
- ✓ Ciência do solo (Agronomia)
- ✓ Engenharia civil
- ✓ Engenharia de minas



Mecânica dos Solos
Termodinâmica
Química
Física



World map of Köppen climate classification for 1901–2010



First letter

A: Tropical
 B: Dry
 C: Mild temperate
 D: Snow
 E: Polar

Second letter

f: Fully humid
 m: Monsoon
 s: Dry summer
 w: Dry winter
 W: Desert
 S: Steppe

Third letter

T: Tundra
 F: Frost
 h: Hot arid
 k: Cold arid
 a: Hot summer
 b: Warm summer
 c: Cool summer
 d: Cold summer

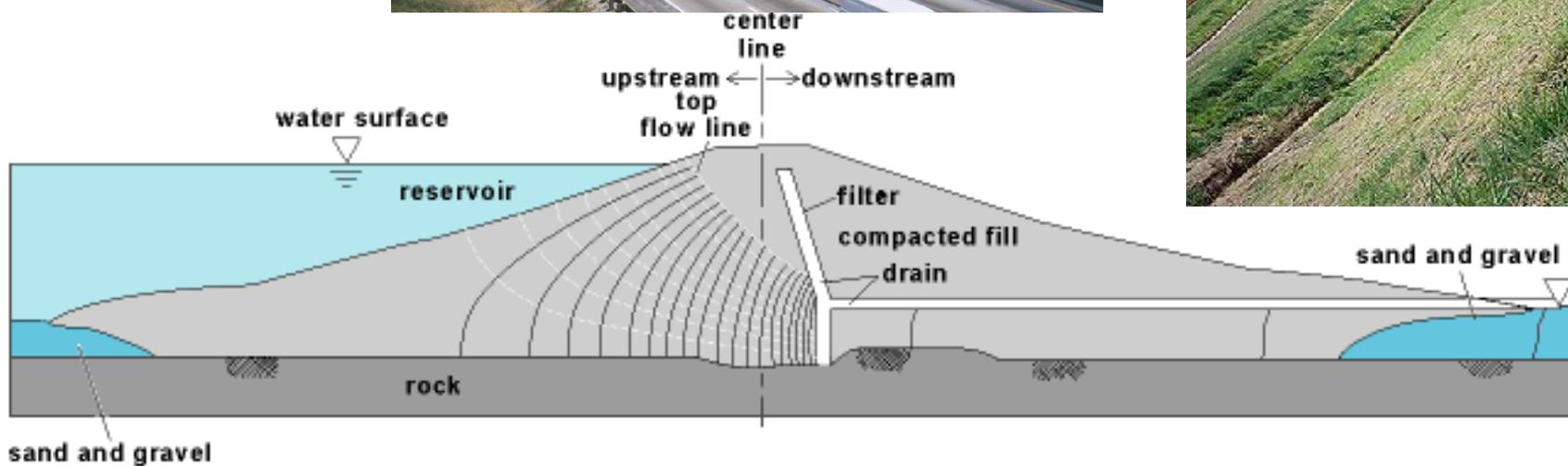
Data source: Terrestrial Air Temperature/Precipitation:
 1900-2010 Gridded Monthly Time Series (V 3.01)

Resolution: 0.5 degree latitude/longitude

Website: <http://hanschen.org/koppen>

Ref: Chen, D. and H. W. Chen, 2013: Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: An example for 1901–2010. *Environmental Development*, 6, 69-79, 10.1016/j.envdev.2013.03.007.

Construindo no "seco"



A Região Não Saturada dos Solos

A região acima do nível de água é normalmente conhecida como zona não saturada

NO ENTANTO



- Nem sempre esta região se apresenta não saturada.
- A capilaridade também satura o solo.
- Nestes casos os conceitos da mecânica dos solos saturados são normalmente aplicados.

Zona não saturada

Zona vadosa

Zona de aeração

Zona vadosa

“Vadose zone, region of aeration above the water table. This zone also includes the capillary fringe above the water table, the height of which will vary according to the grain size of the sediments. In coarse-grained mediums the fringe may be flat at the top and thin, whereas in finer grained material it will tend to be higher and may be very irregular along the upper surface. The vadose zone varies widely in thickness, from being absent to many hundreds of feet, depending upon several factors.”

The Editors of Encyclopædia Britannica

A região vadosa possui três fases

Sólida

Líquida

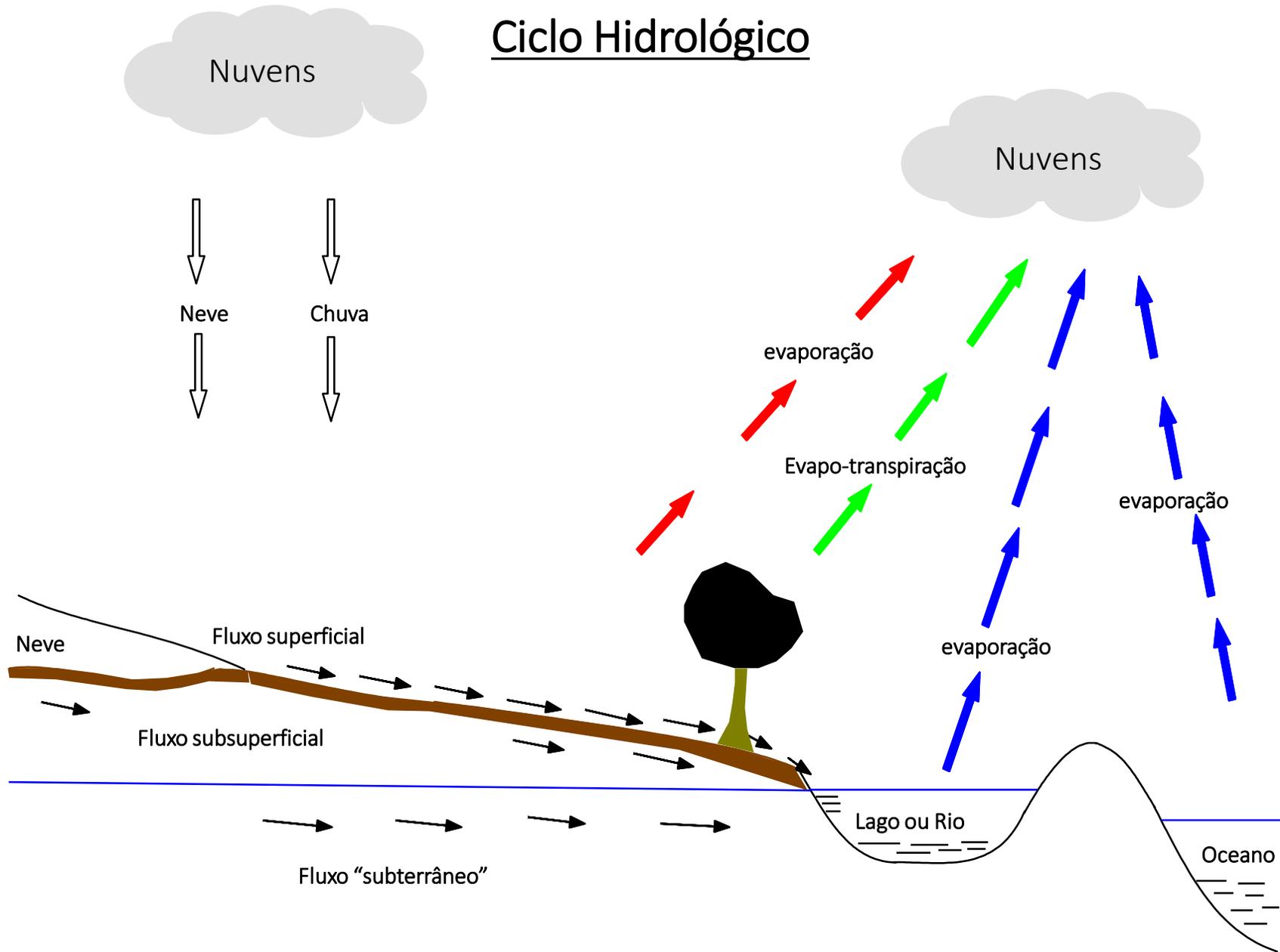
Gasosa

Sólido - Grãos minerais e matéria orgânica ou outro tipo de sólido

Líquido - Água “pura” ou com solutos

Gás - Ar ou outro gás, além do vapor de água

Ciclo Hidrológico



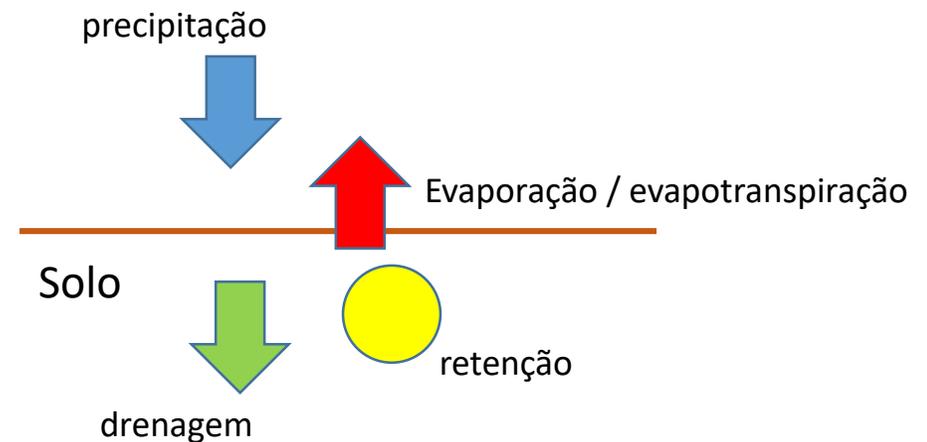
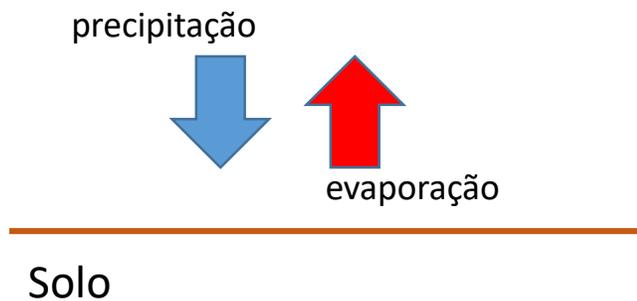
Relação Solo/Atmosfera



Balanço Hídrico Atmosférico



Balanço Hídrico do Solo



A equação do balanço hídrico **atmosférico** é:

$$\mathbf{B} = P - E$$

O balanço hídrico do **solo** é:

$$P - (I_i + R) = E + R_r + S$$

P – Precipitação

E – Evaporação

I_i – Água interceptada

S – Água armazenada

R – Runoff

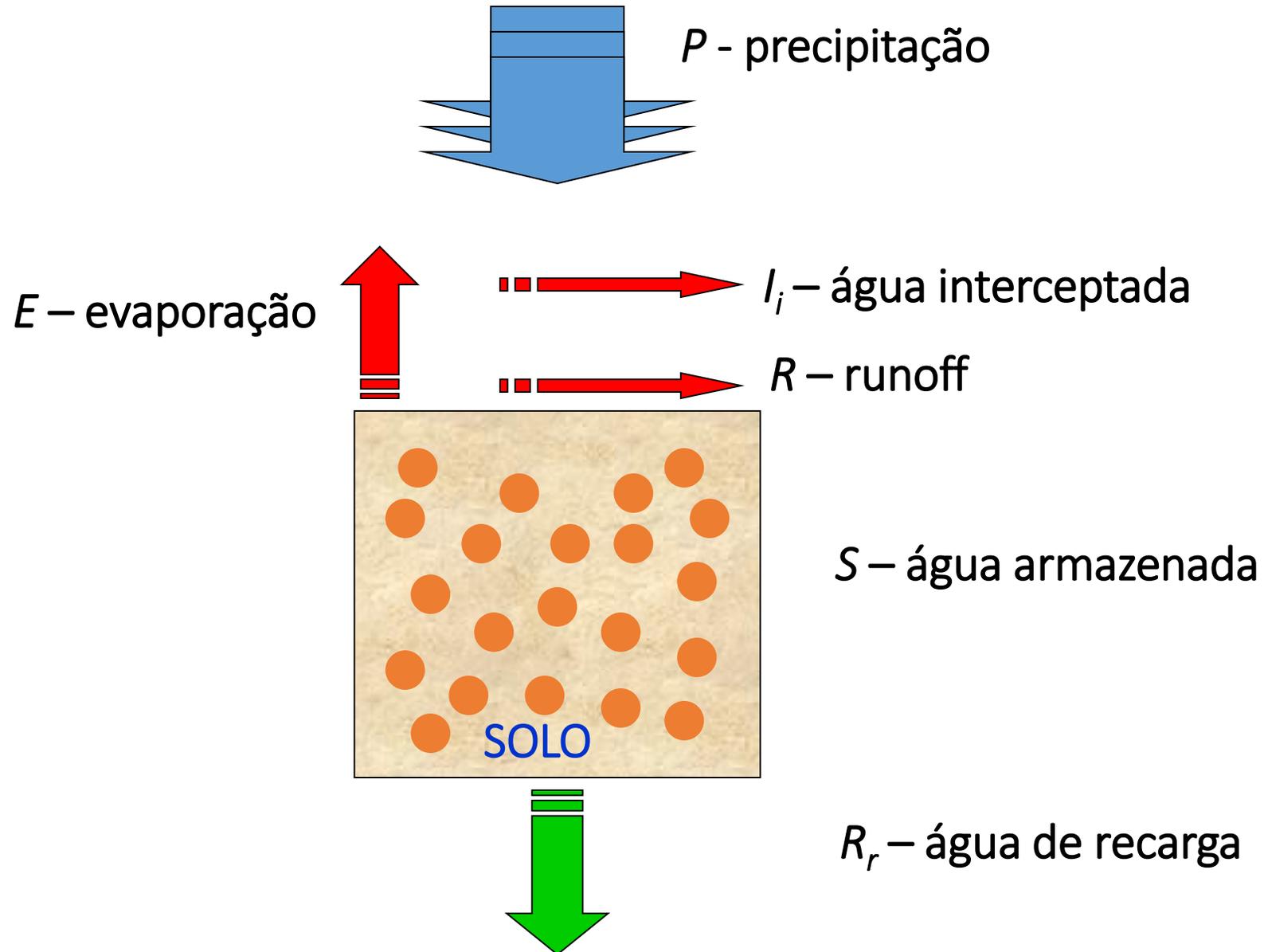
R_r – Água de recarga

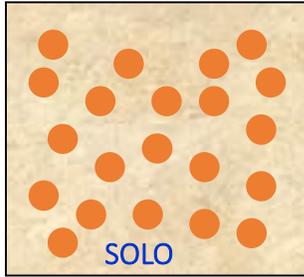
A quantidade de água que é absorvida pelo solo depende de fatores como:

- Topografia
 - Tipo do solo (argiloso, arenoso, etc.)
 - Características do perfil de solo (e.g. estratigrafia, estrutura)
 - Clima
 - Ambiente local
-

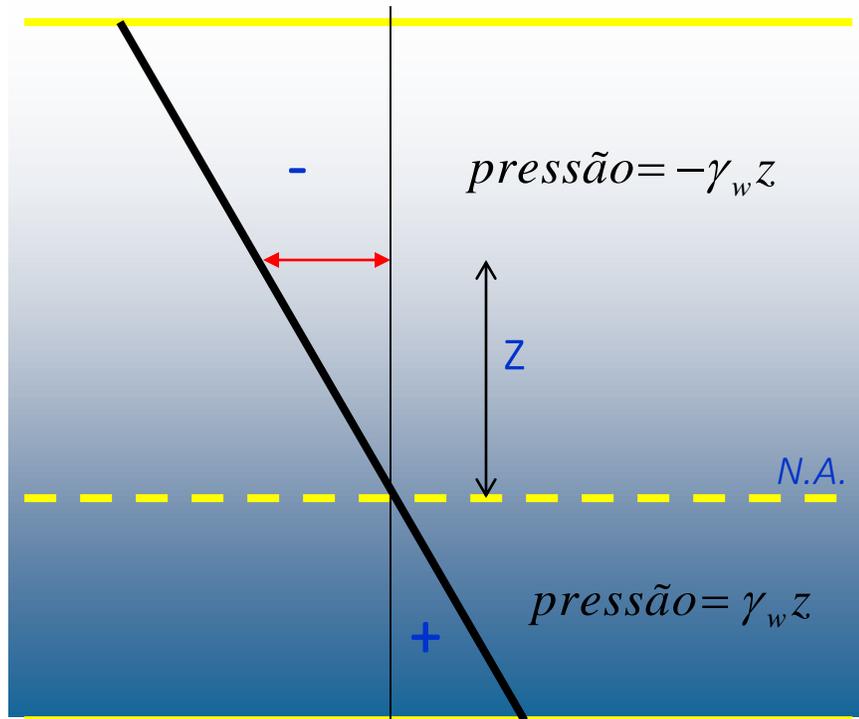
Na interface entre o solo e a atmosfera ocorre um fluxo de água (evaporação e infiltração) que é fundamental para o comportamento do solo do ponto de vista de engenharia (e também na agronomia).

O Balanço Hídrico do Solo



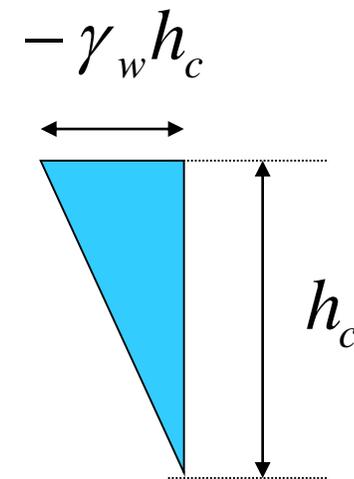
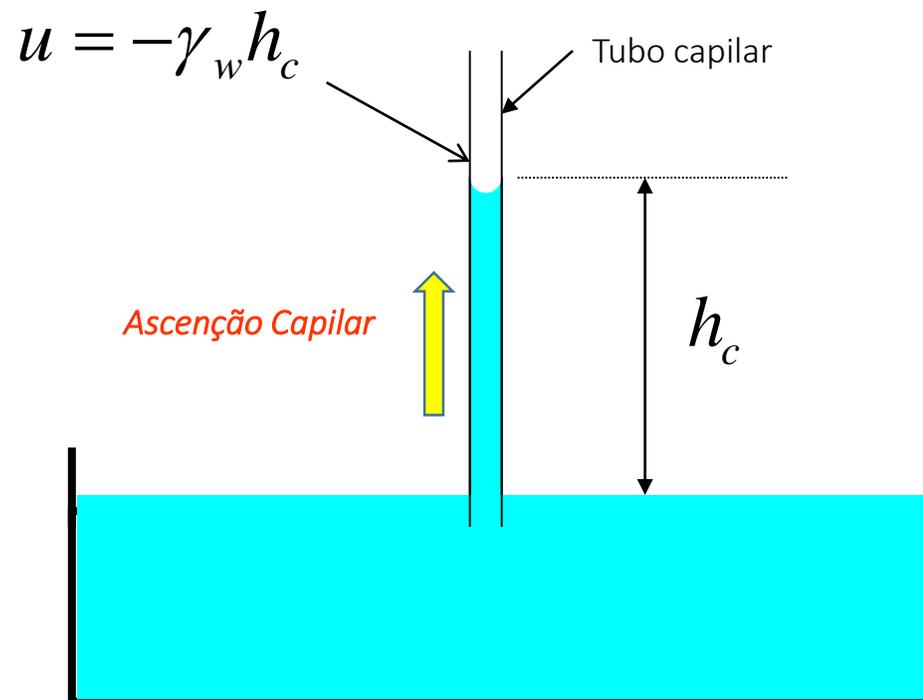


Água armazenada em equilíbrio Sem fluxo

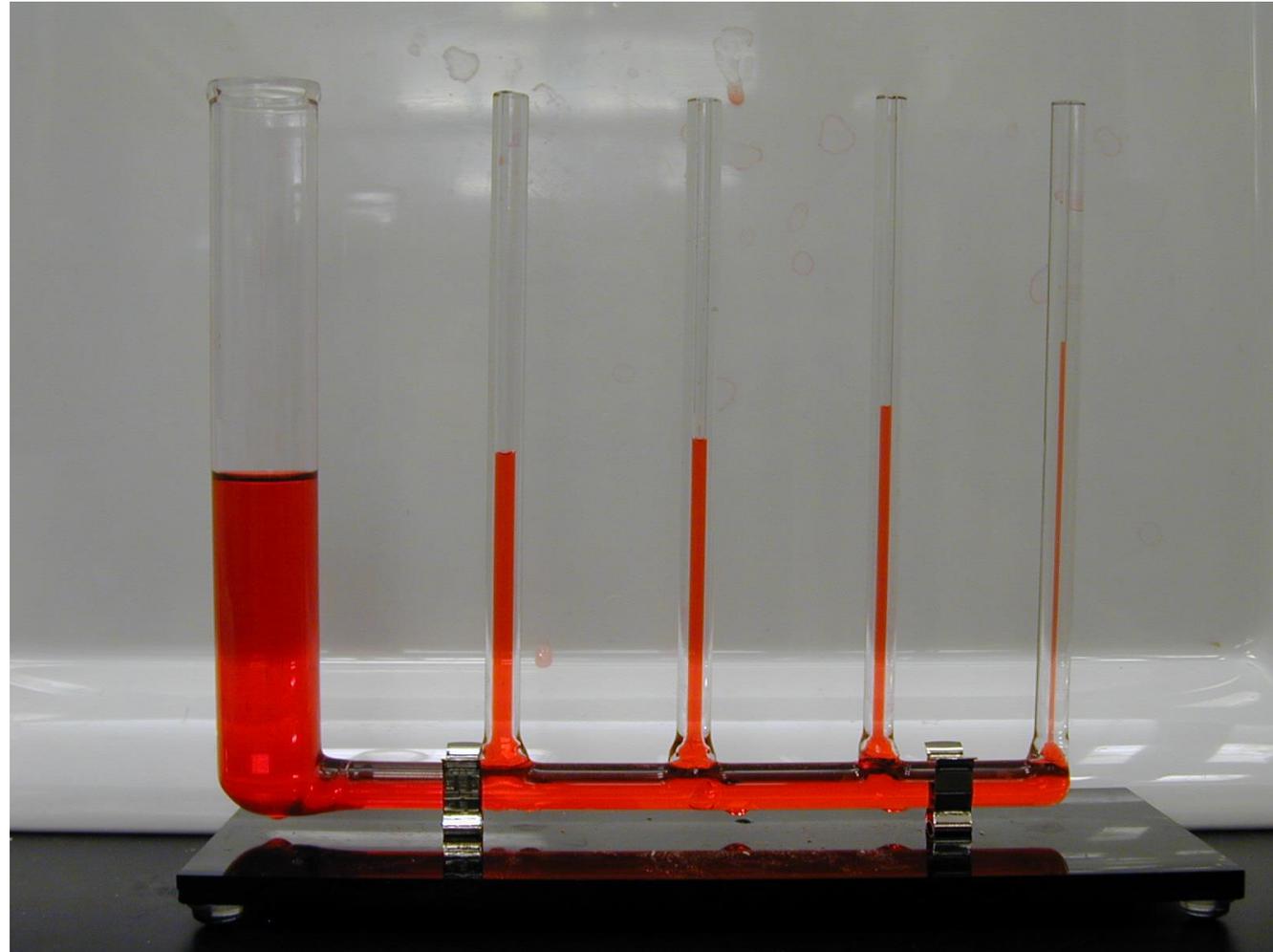


O Que é Sucção?

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

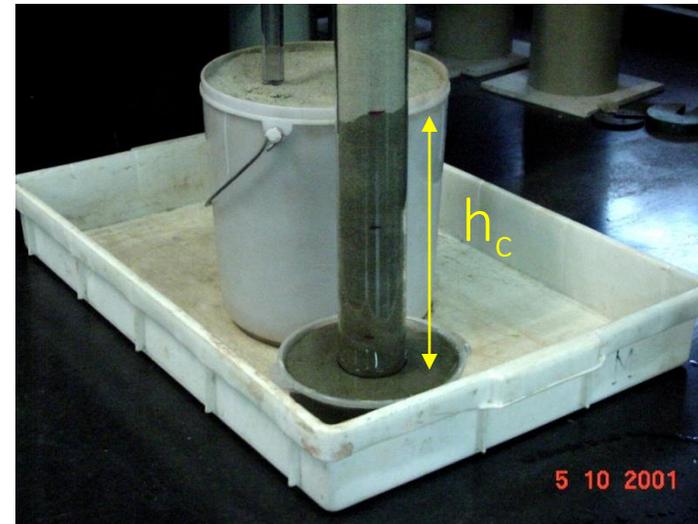
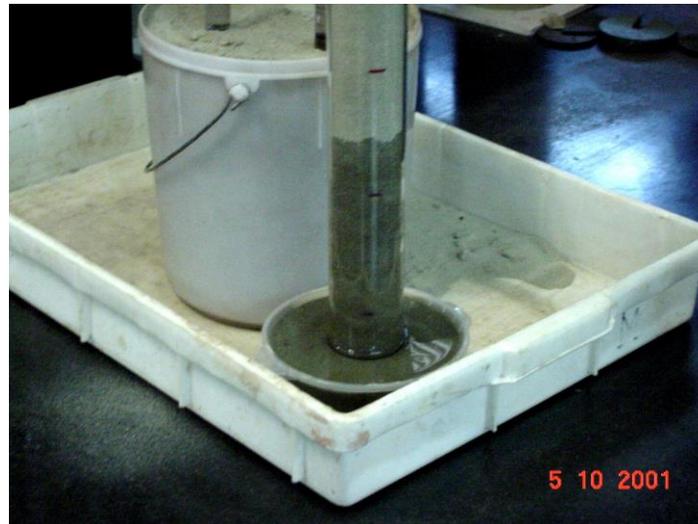


Ascensão Capilar



O que é Sucção?

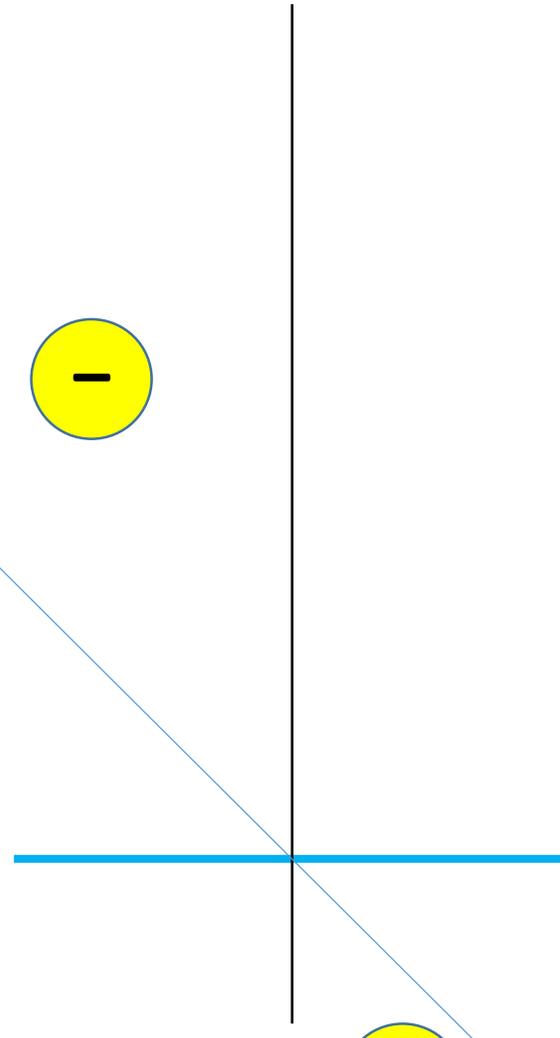
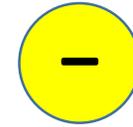
Ascensão Capilar



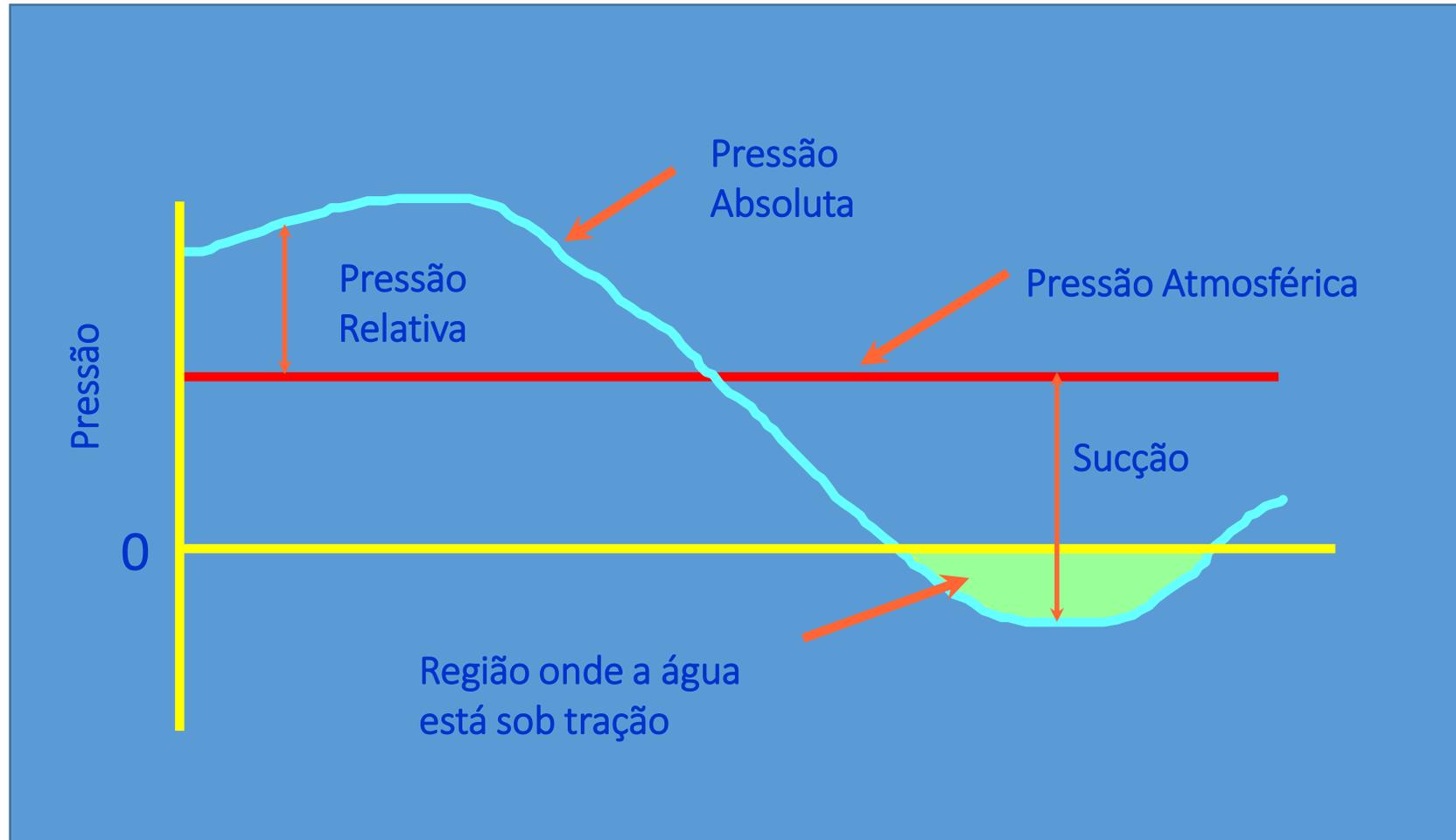
Ascensão Capilar



h_c



Conceitos de pressão



Sucção

É a pressão negativa da água em materiais porosos

Tipos de Sucção

- ✓ Sucção Matricial – Devida às características da estrutura do material poroso.
- ✓ Sucção Osmótica – Devida exclusivamente às características do líquido.
- ✓ Sucção Total – É a soma da sucção matricial com a osmótica.

$$\text{Sucção Total} = (u_a - u_w) + \pi$$

Sucção total

Sucção matricial

Sucção osmótica

membrana permeável
à água e ao soluto

Membrana semi-permeável



Água do solo

Solo úmido

Água pura

Sucção osmótica

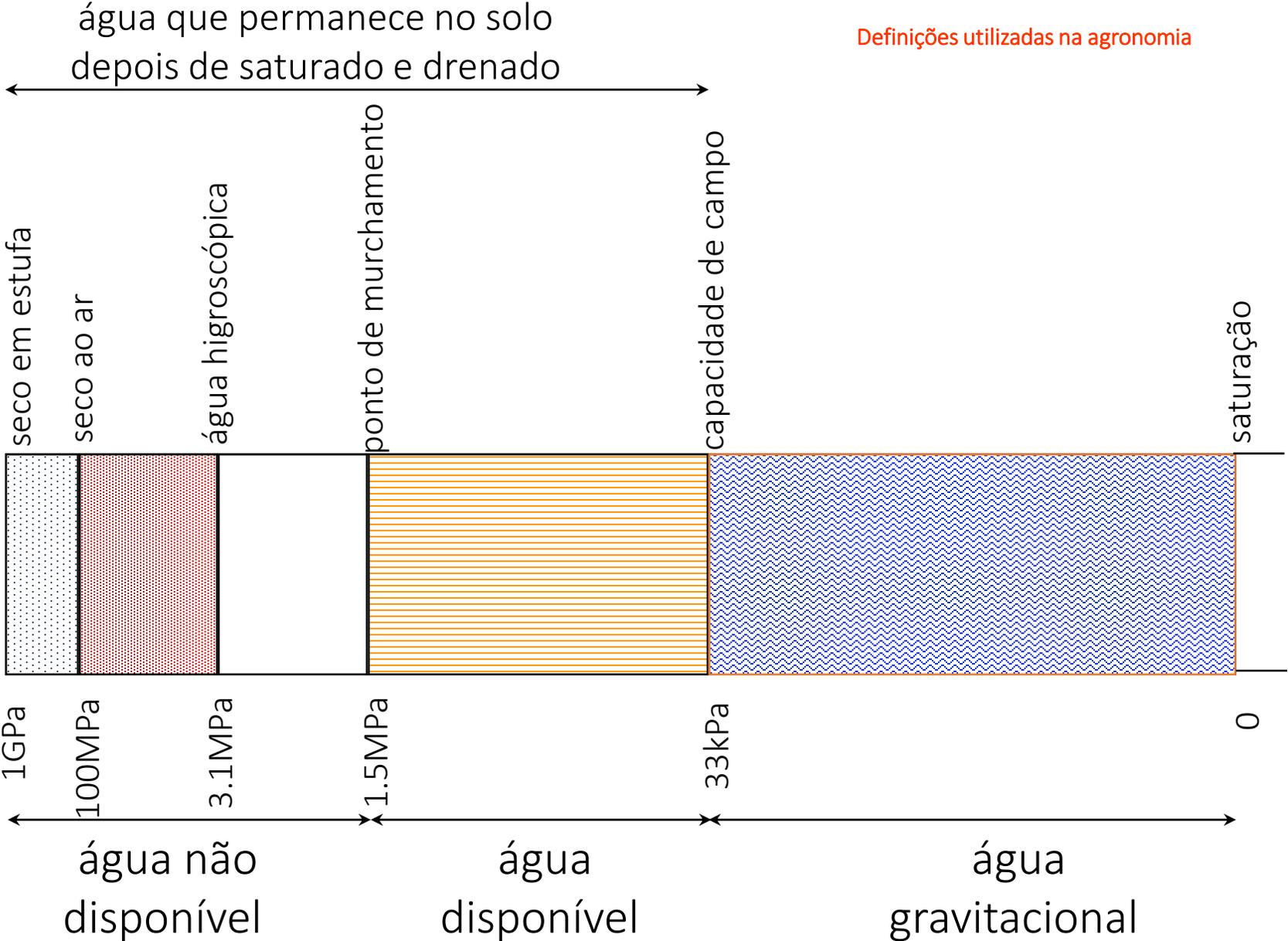
Sucção matricial

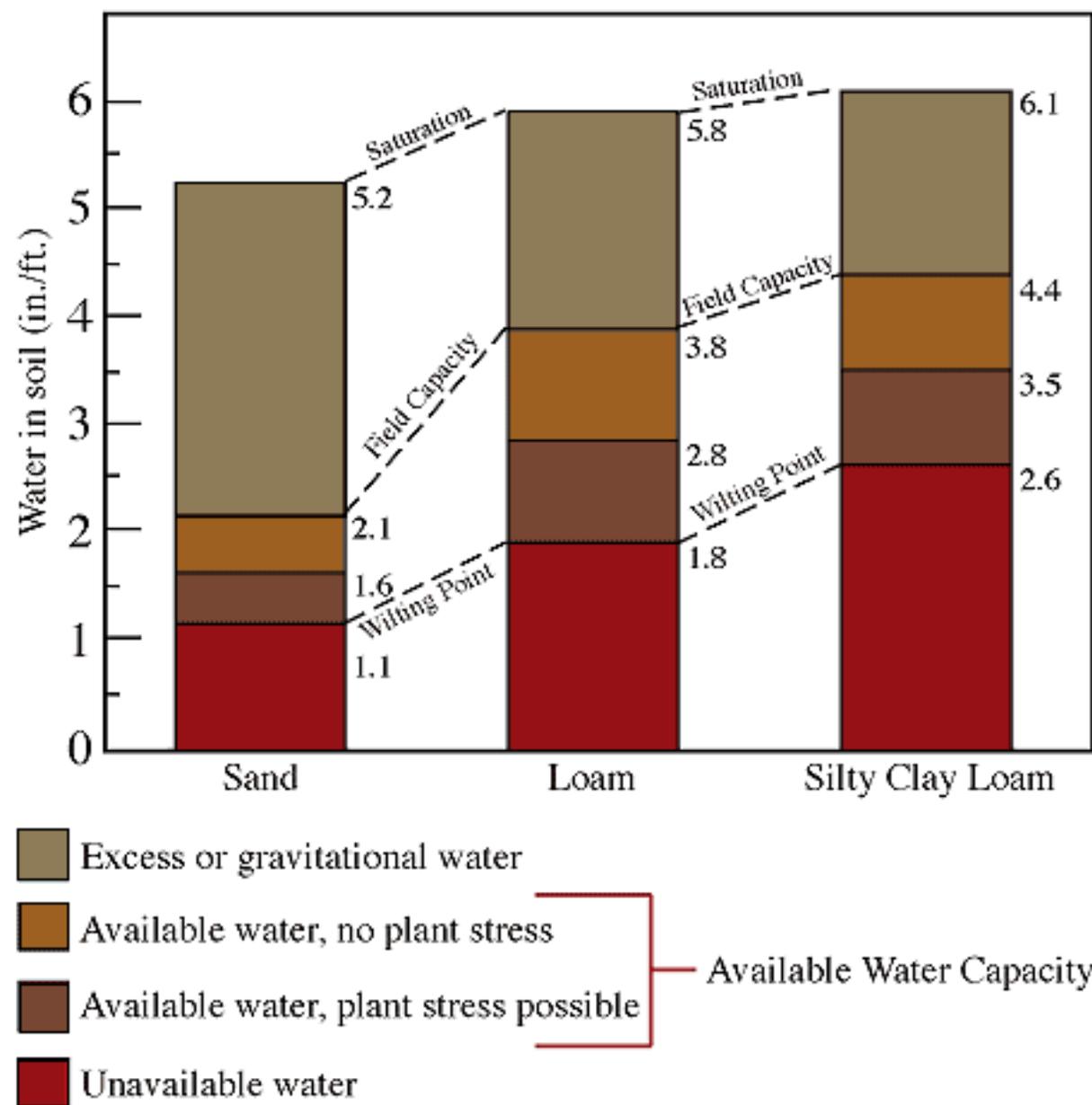
Sucção total

Efeito da capilaridade → *Coesão*

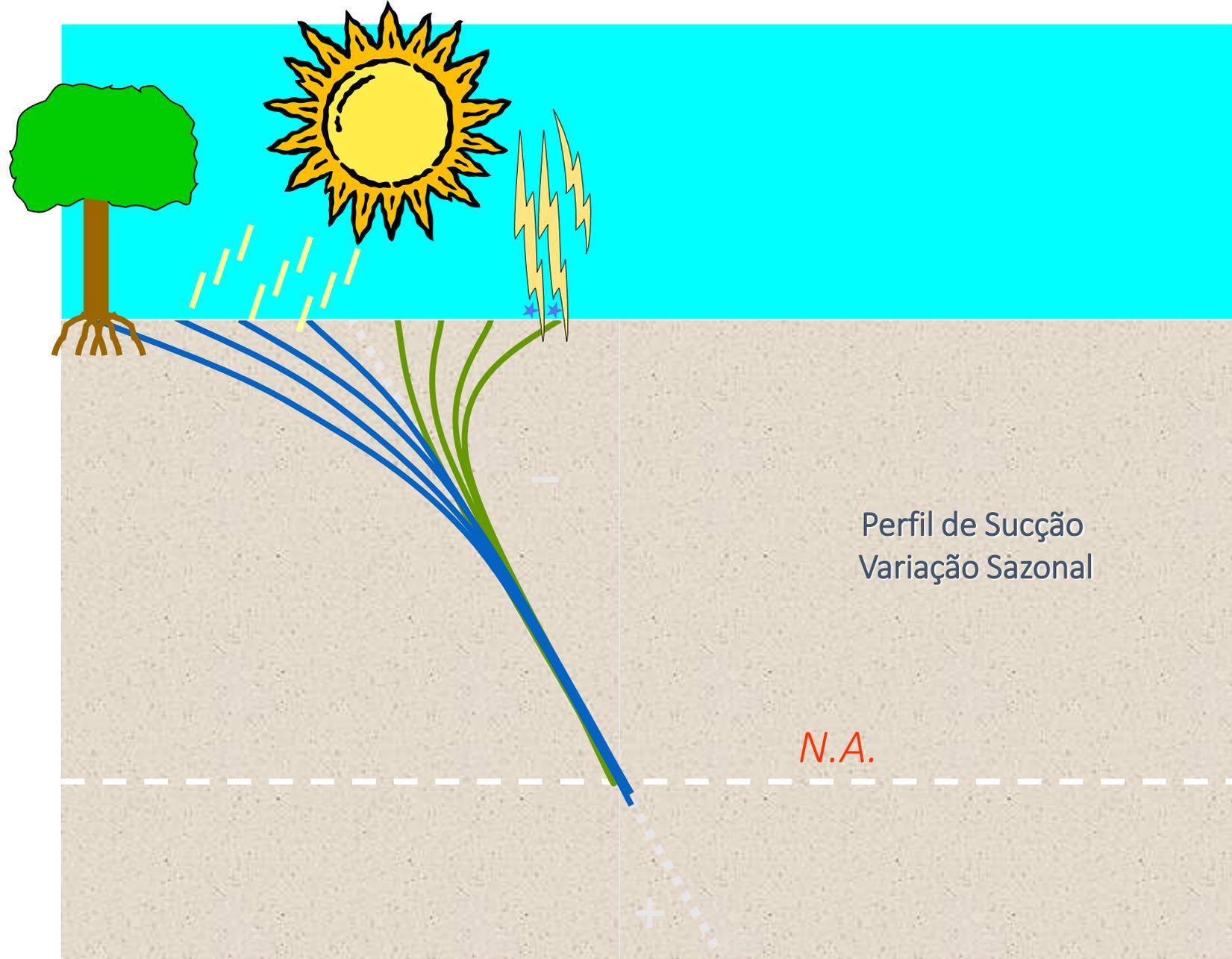


© ACruisingCouple

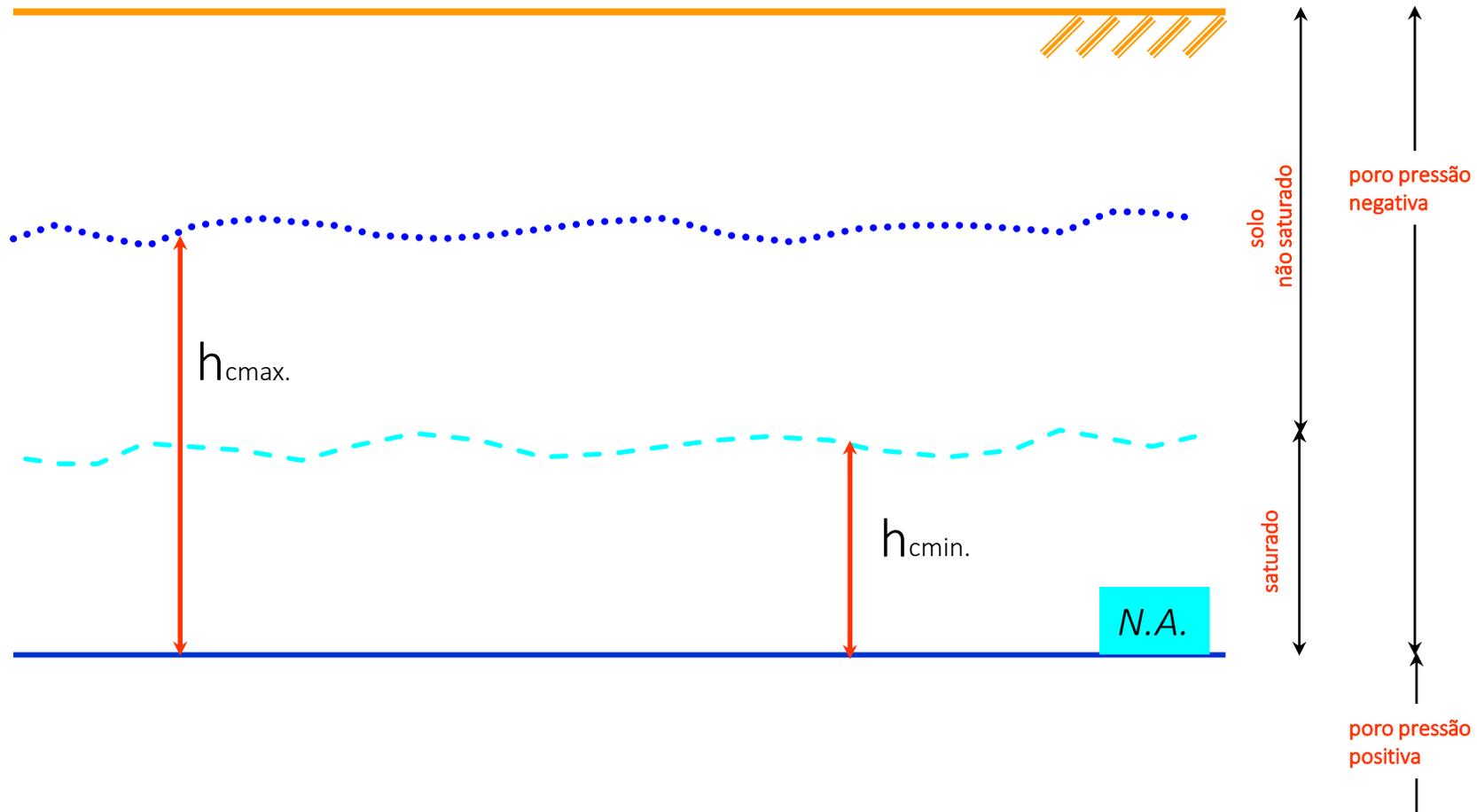




O Perfil de Sucção



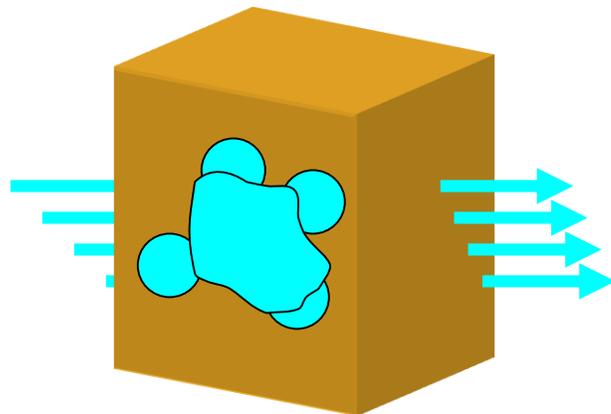
A Zona Vadosa



Balanço Hídrico Solo-Atmosfera

Capacidade de Retenção
de água do solo

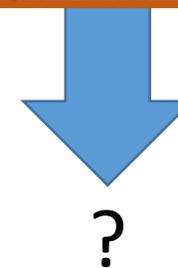
Precipitação
Temperatura
Radiação



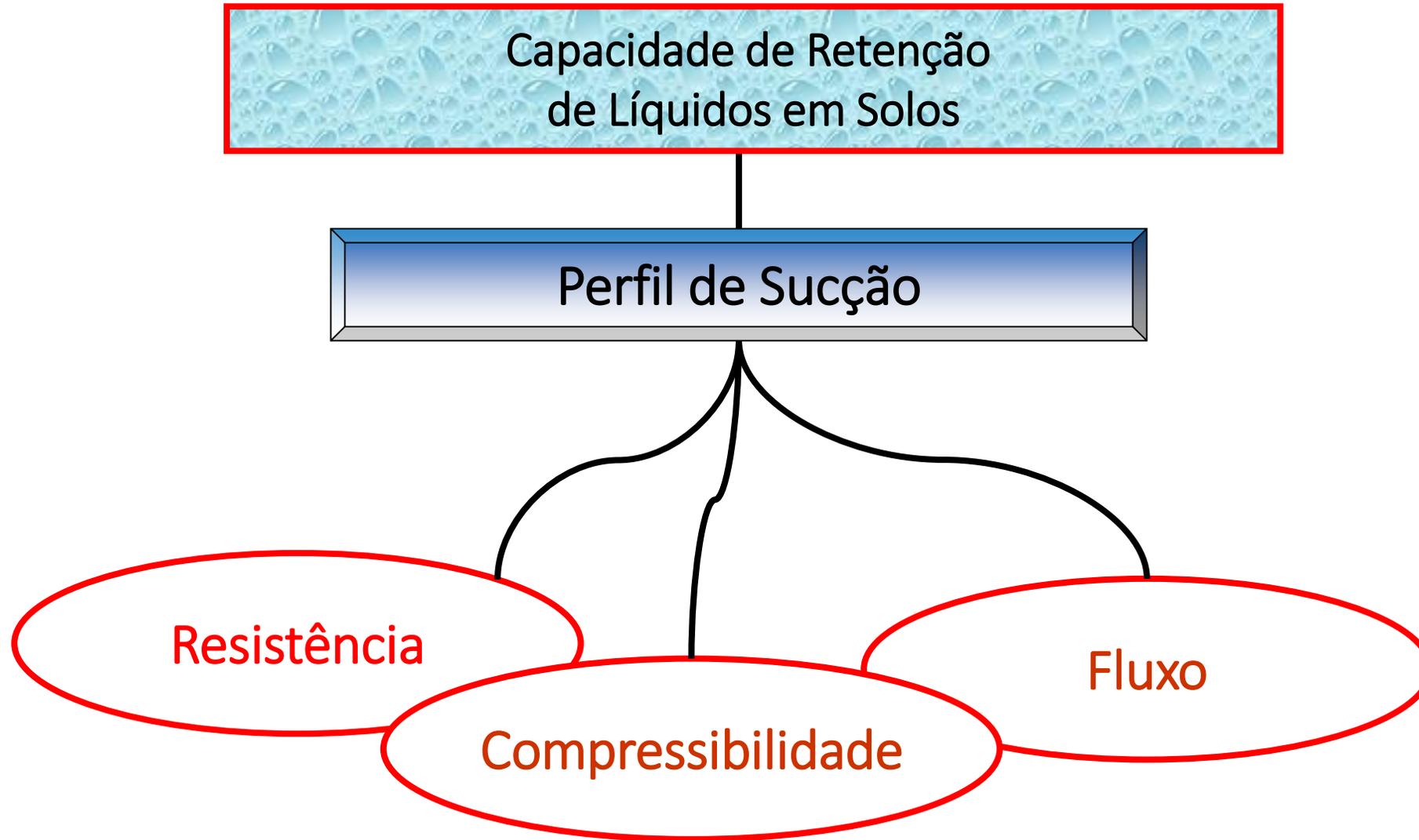
Escoamento
Evaporação
Infiltração

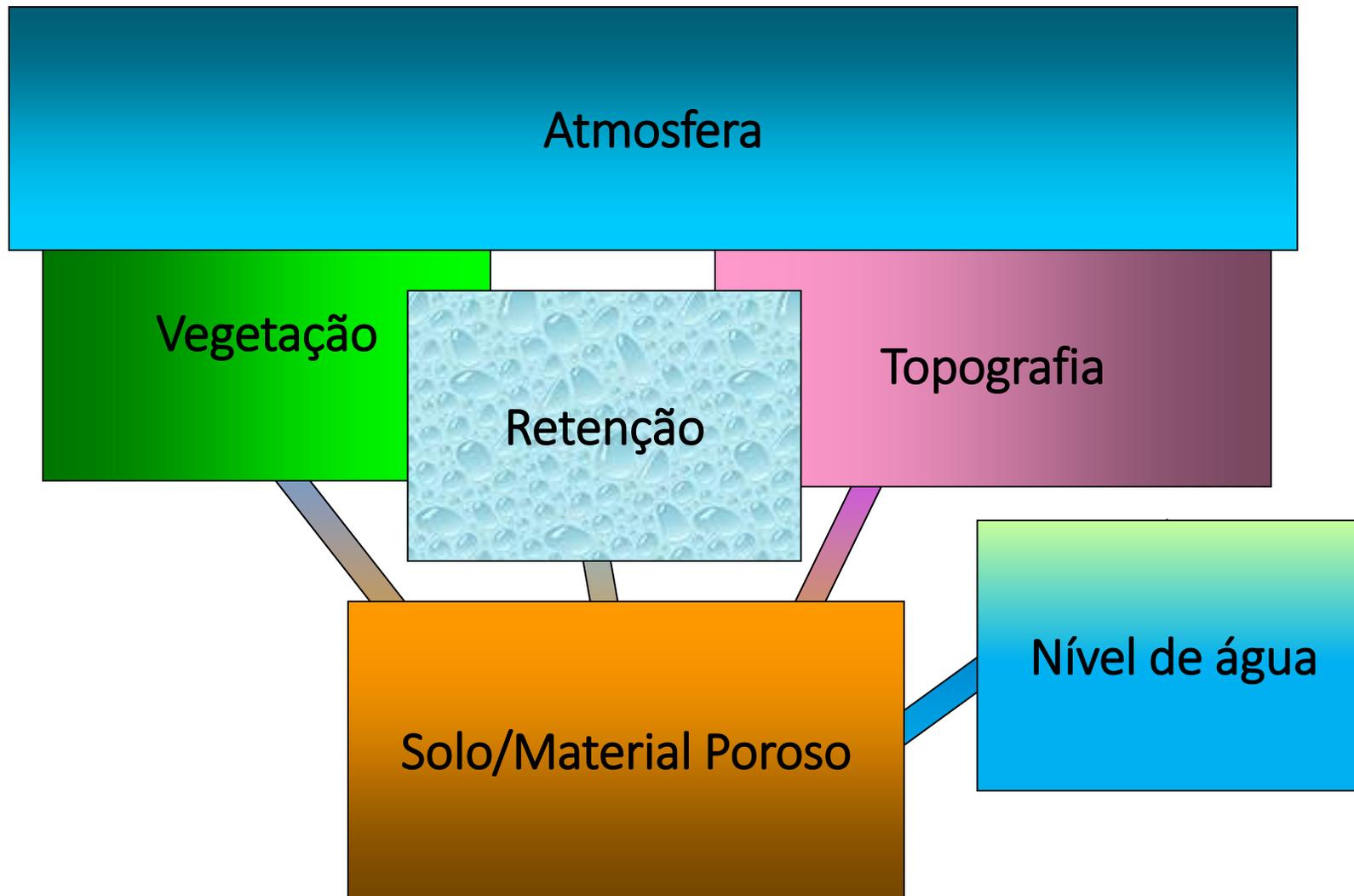
Acima

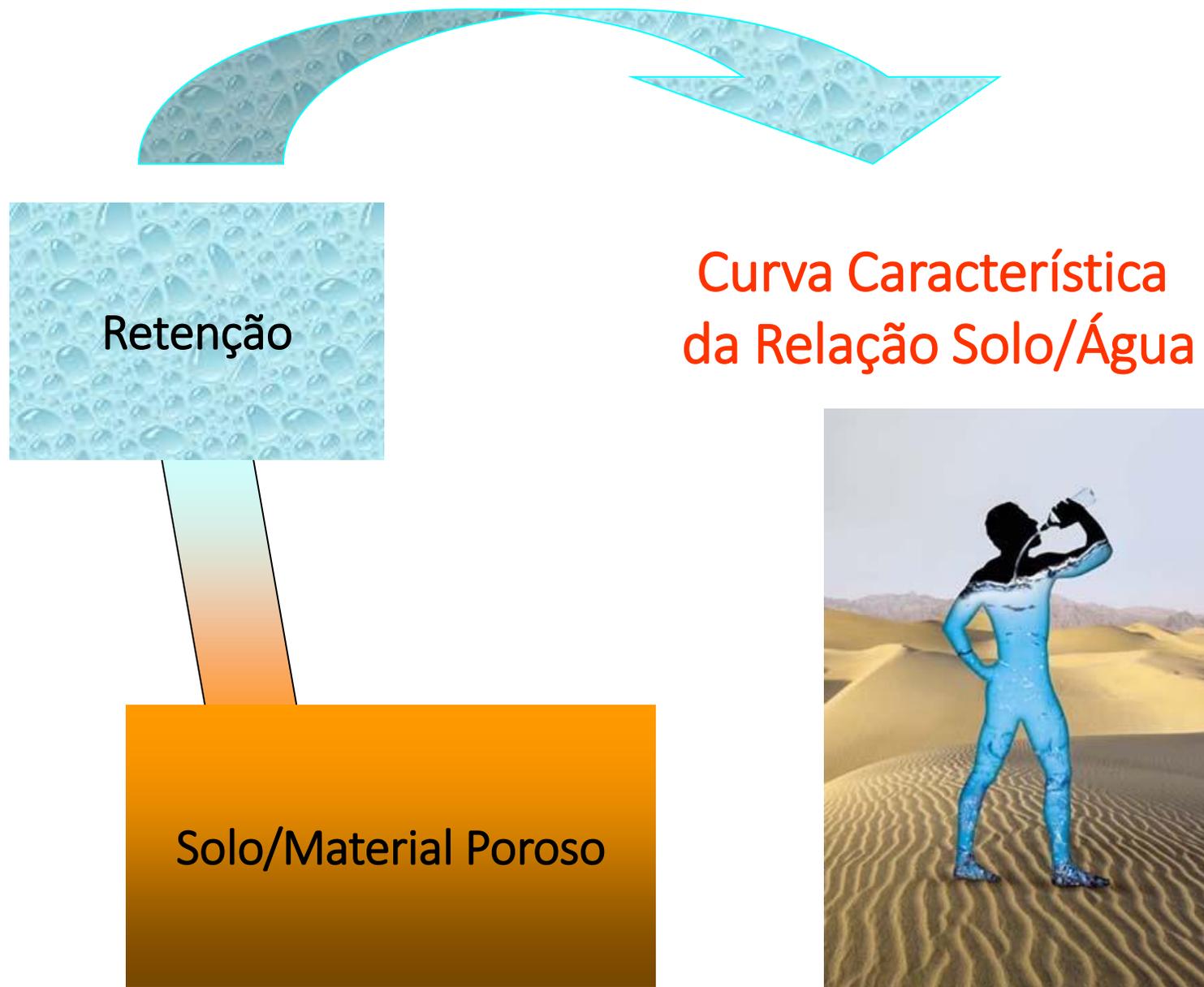
Abaixo



Balanço hídrico solo-atmosfera e o efeito no comportamento dos solos







Curva Característica

Curva de Retenção

?



Conceitos Básico (Curva de Retenção de Água)

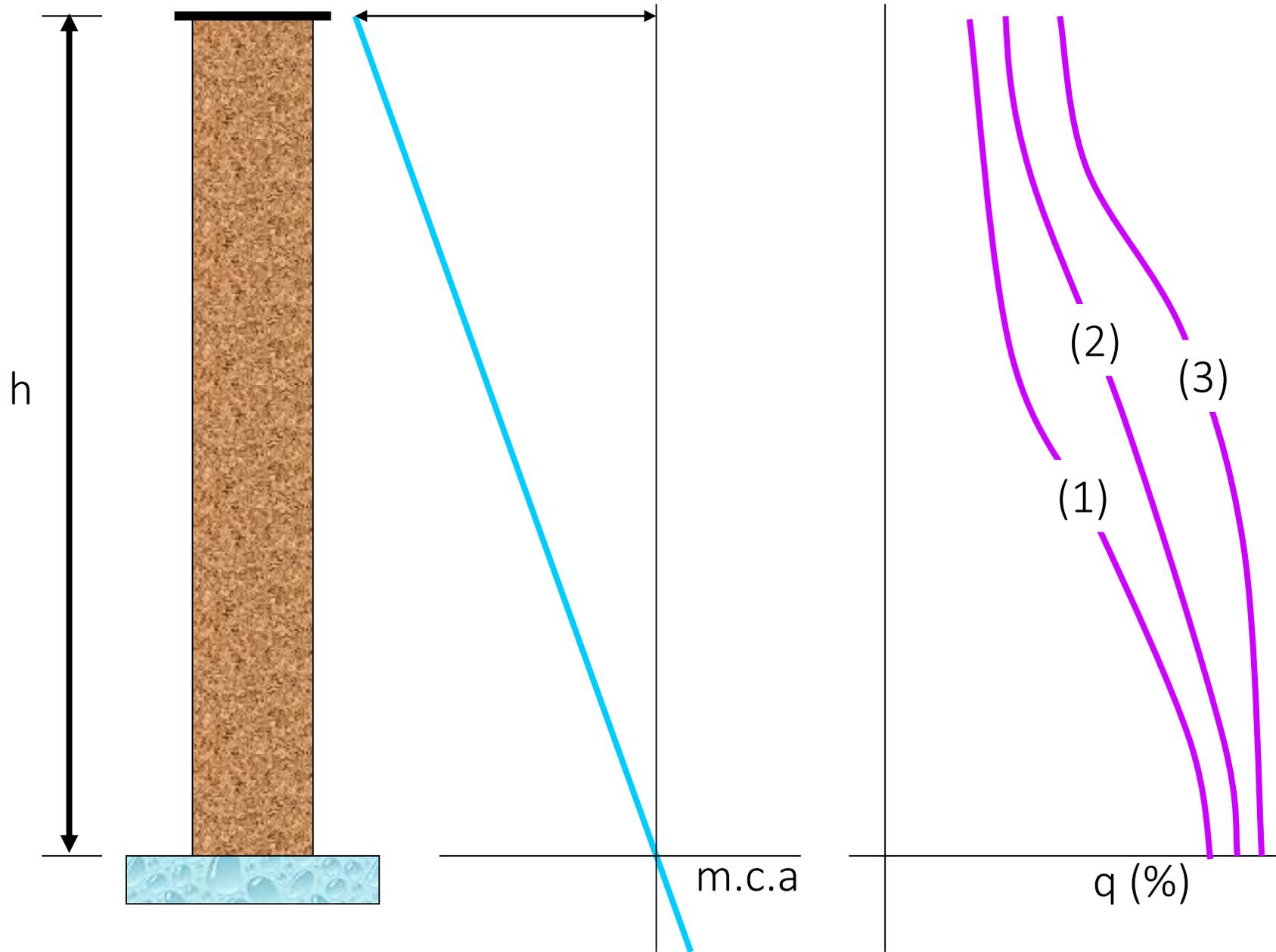
- A curva de retenção de água é também chamada de curva característica do material poroso.
- A curva de retenção pode ser obtida por diversos métodos. O objetivo é se determinar a relação entre a quantidade de água retida no material e a sucção.
- A sucção é a pressão com que a água fica retida nos poros do solo. Sendo necessário se aplicar uma energia (sucção) maior para se retirar um maior volume de água
- A curva de retenção pode ser representada pelo teor de umidade gravimétrico (w), teor de umidade volumétrico(θ) ou grau de saturação (S)
- Utiliza-se a curva de retenção para se avaliar a função de permeabilidade e também a envoltória de resistência do material poroso.
- A função de permeabilidade permite se realizar estudo de fluxo em meio não saturado.

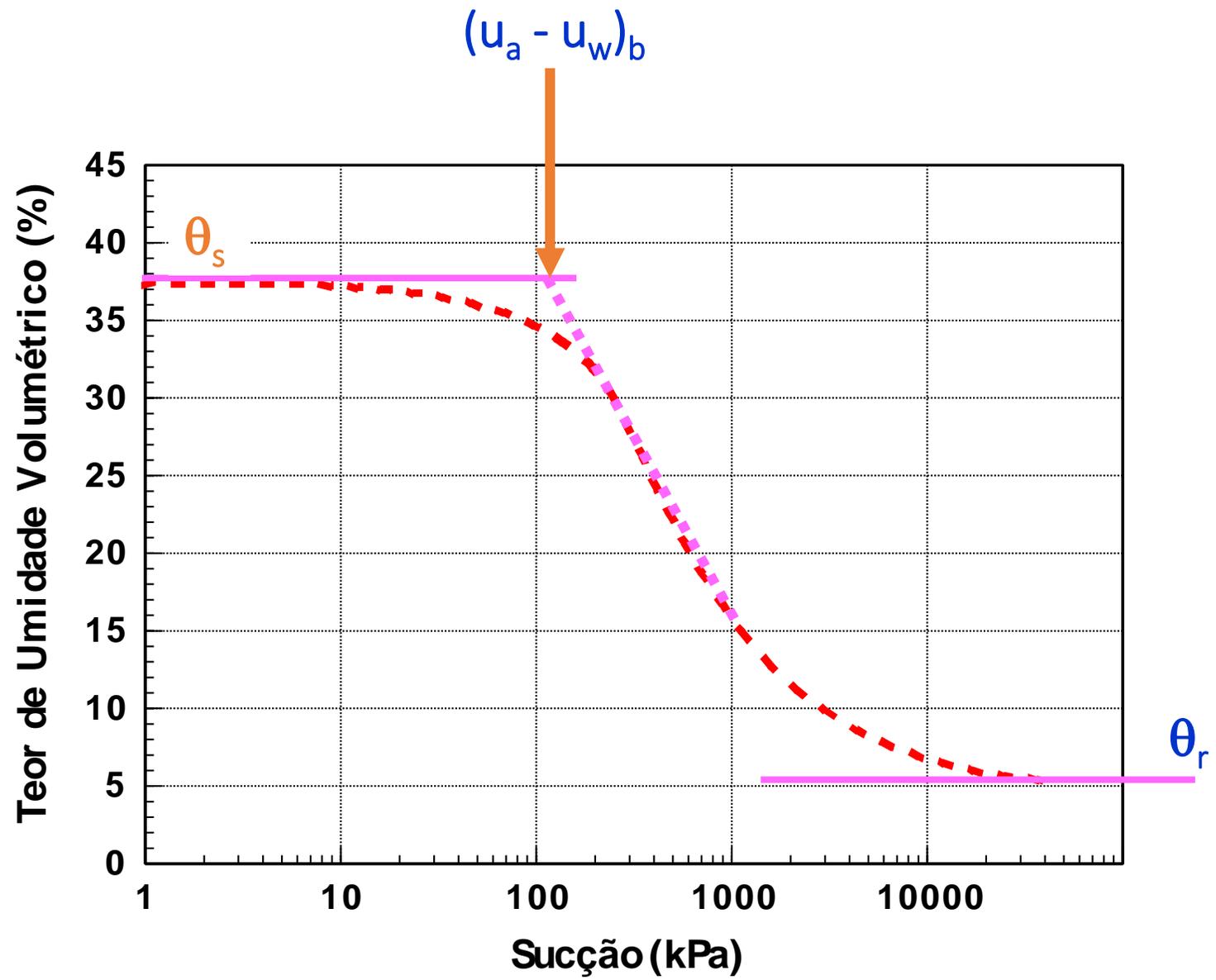
Conceitos Básico (Curva de Retenção de Água)

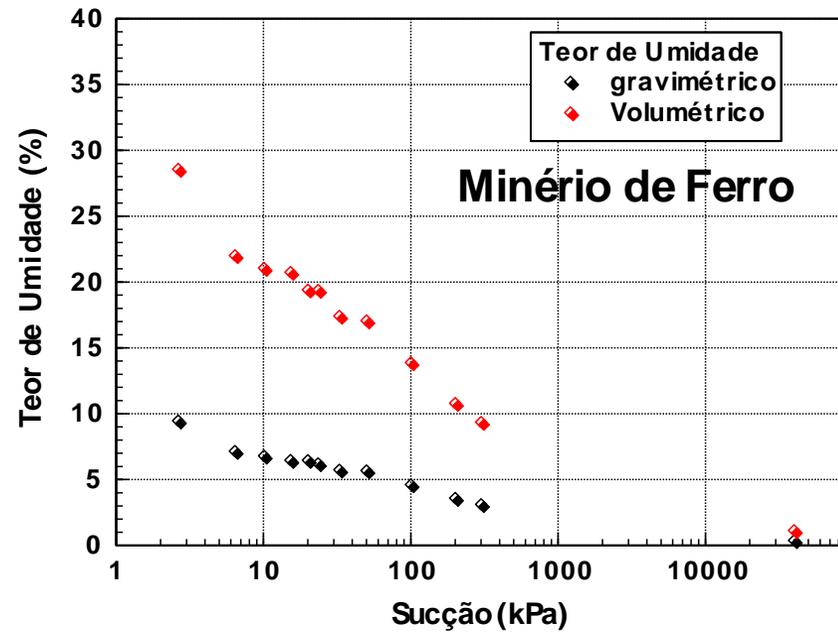
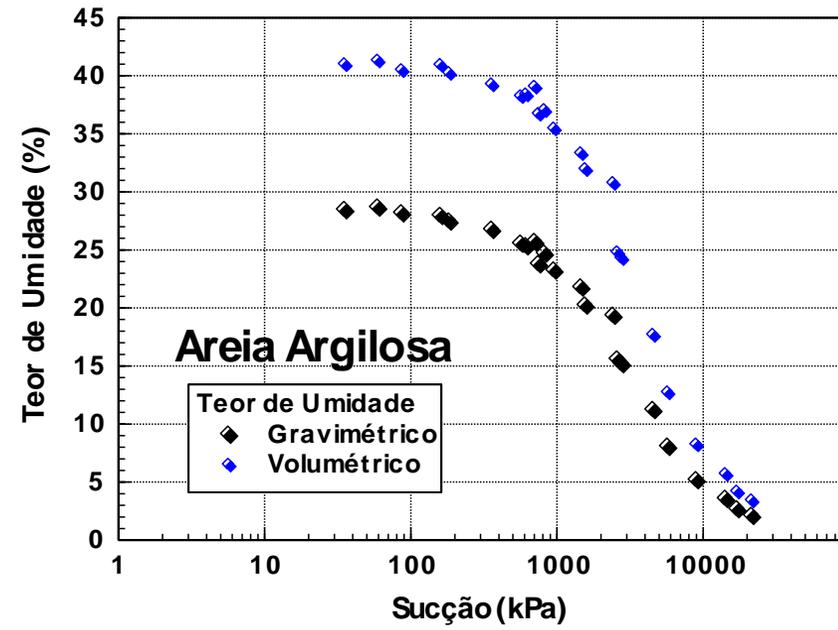
Todos estes aspectos afetam o comportamento do solo não saturado. Isto está refletido na curva de retenção.

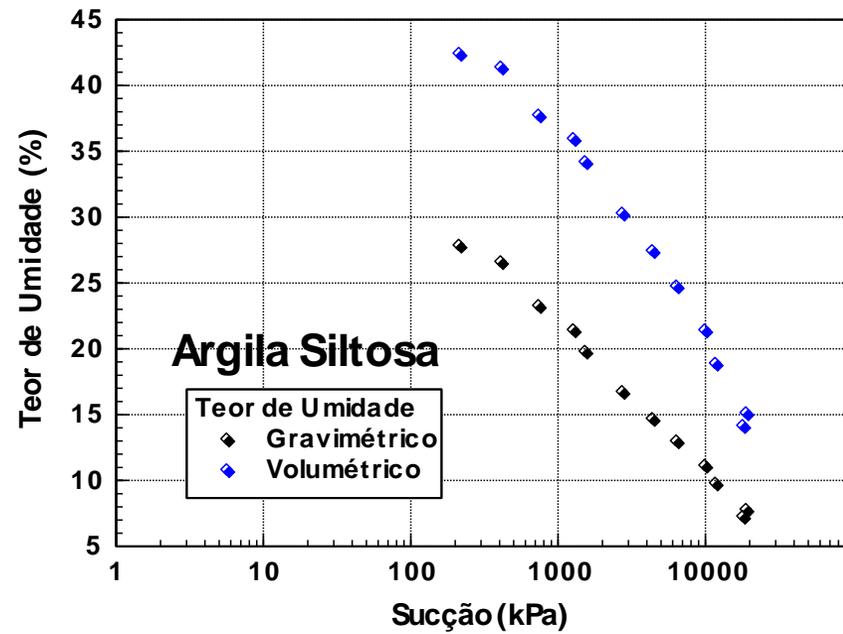
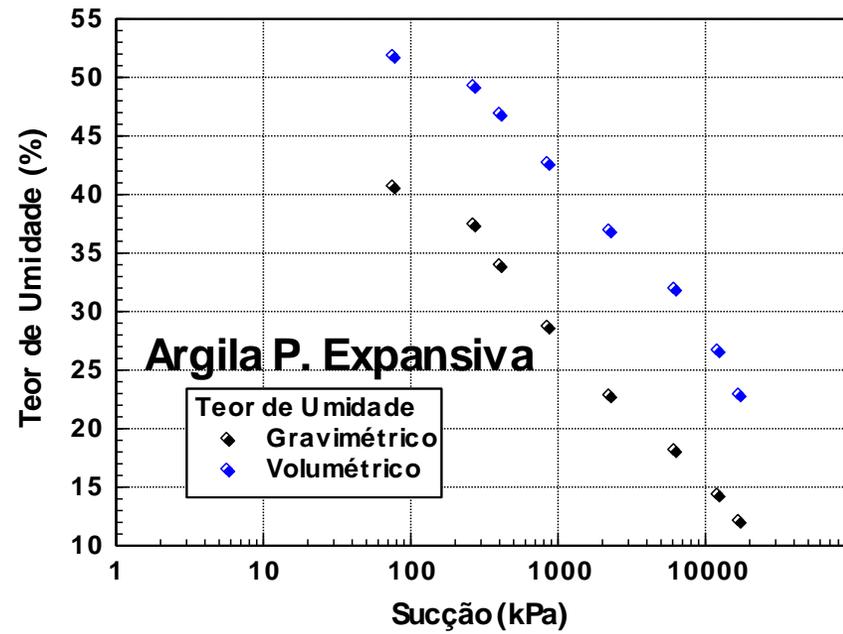
- Composição mineralógica
- Perfil de solo
- Textura/Estrutura
- Análise granulométrica

Conceitos Básico (Curva de Retenção de Água)





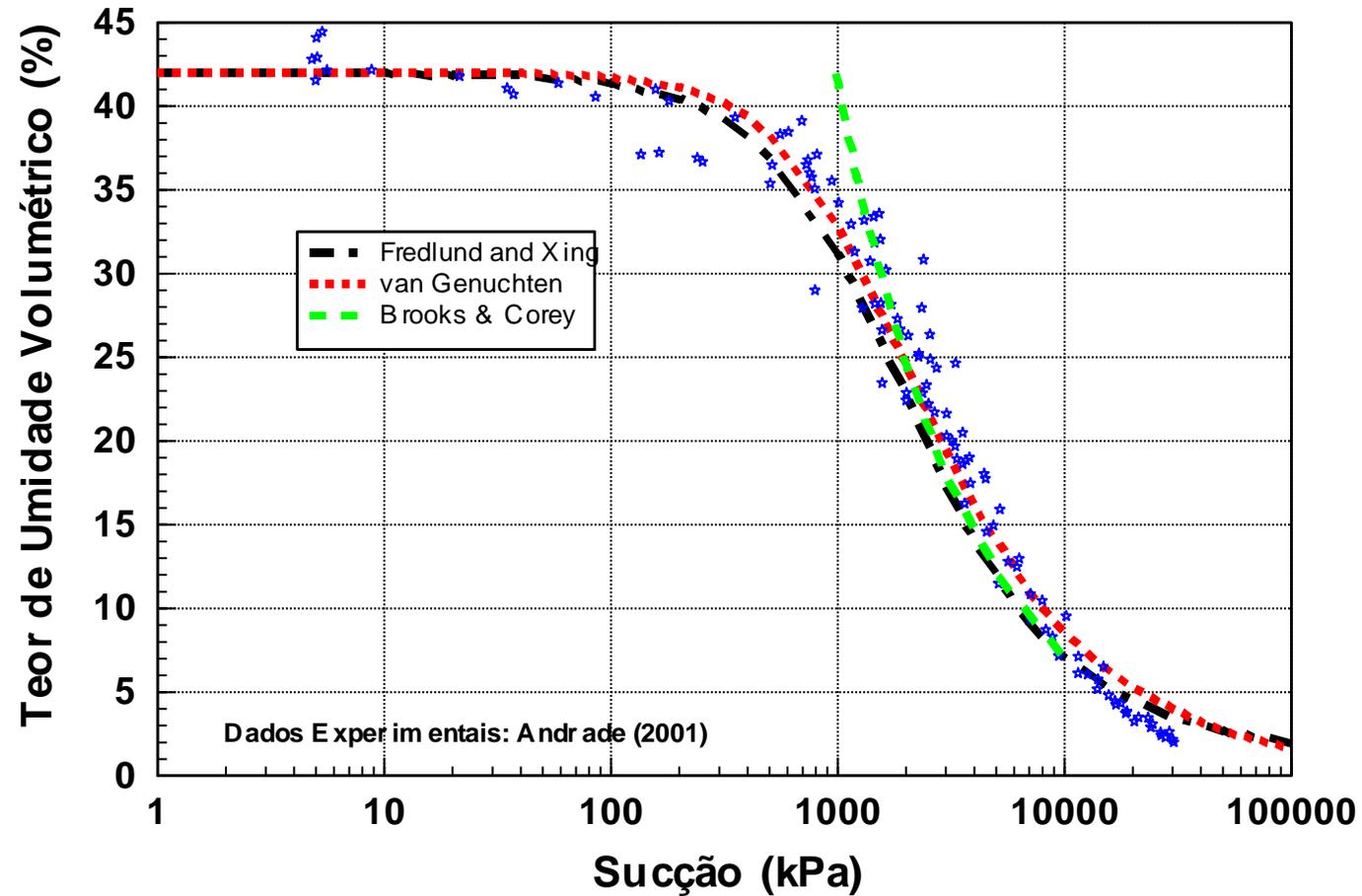




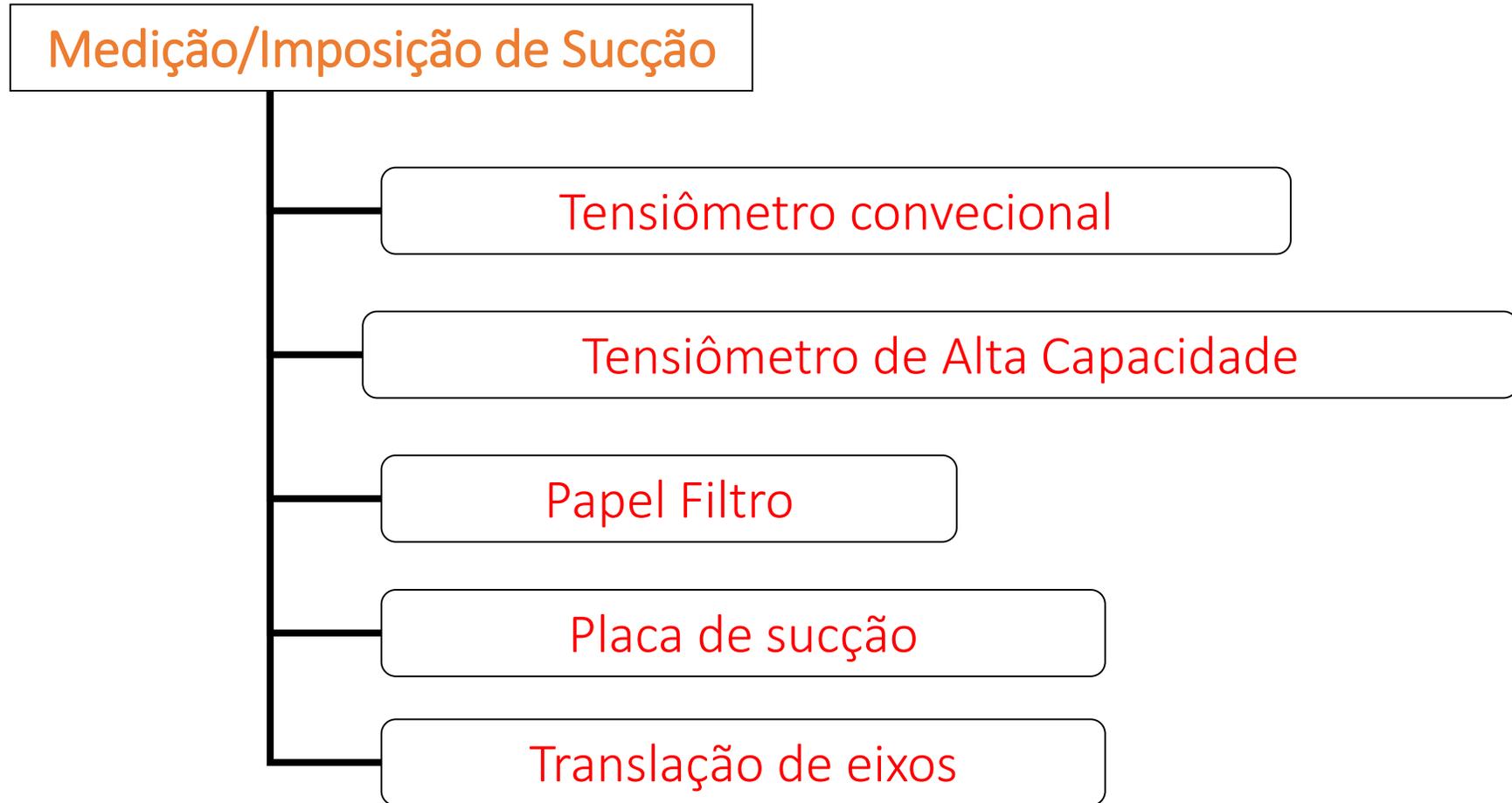
Modelos de Ajuste para a Curva de Retenção

- Gardner (1958)
- Brooks & Corey (1964)
- van Genuchten (1980)
- Fredlund & Xing (1994)

Ajuste da Curva de Retenção



Medição da Sucção



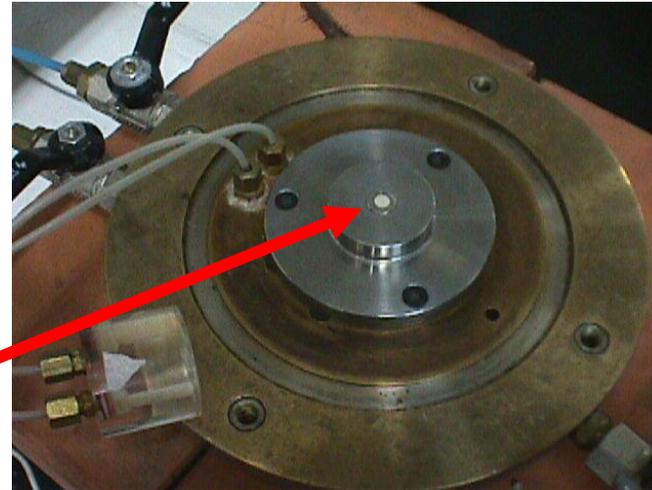
Tensiômetro convencional



Tensiômetro de Alta Capacidade



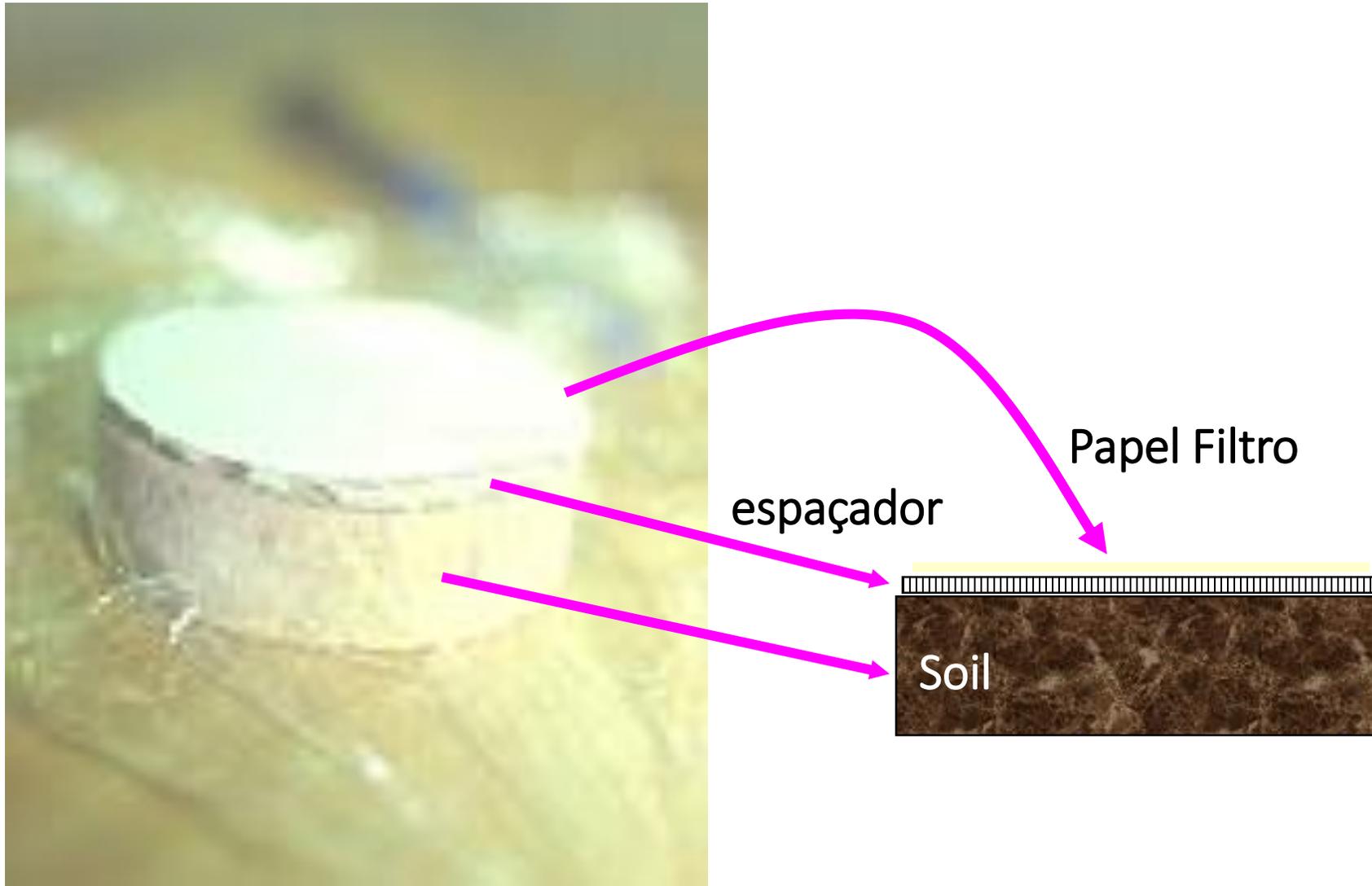
Pedra porosa



Papel Filtro



Medição de Sucção Total Utilizando o Papel Filtro



Placa de pressão

Translação de eixos



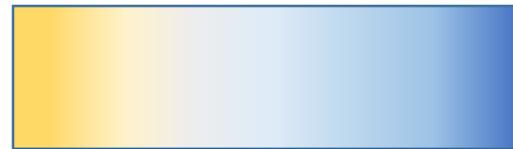
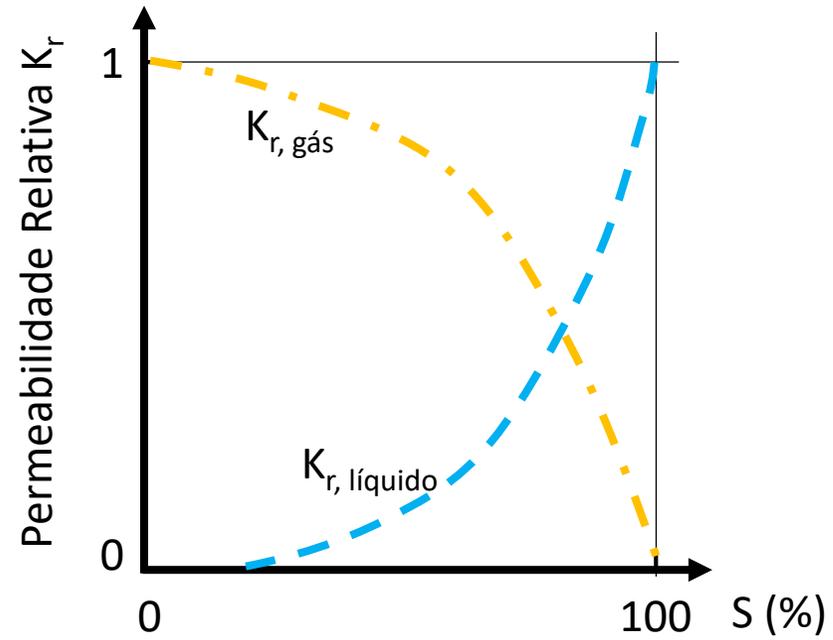
Placa de Sucção



Os efeitos da sucção

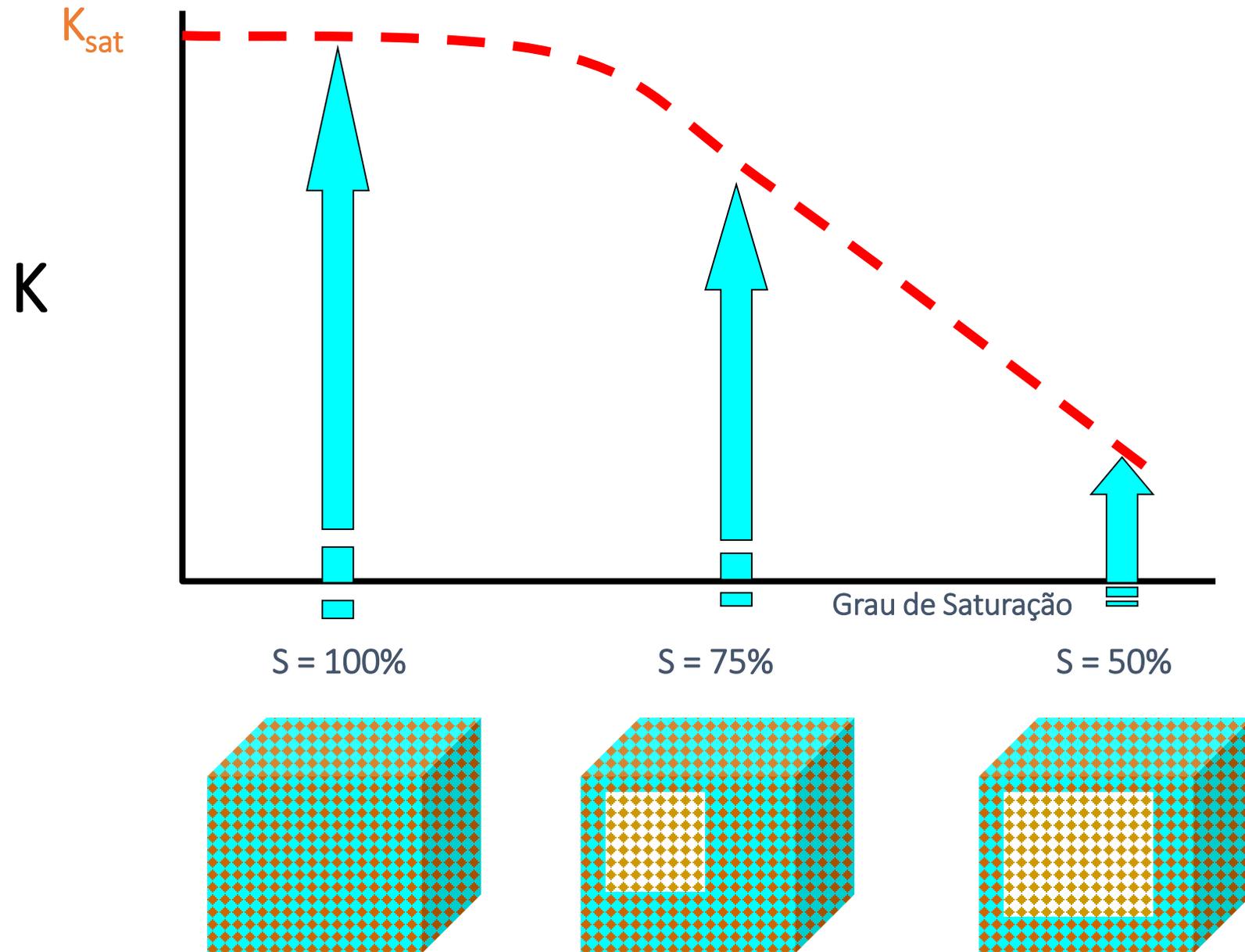
- No fluxo de água
- Na resistência ao cisalhamento
- Na compressibilidade

A Função de Permeabilidade



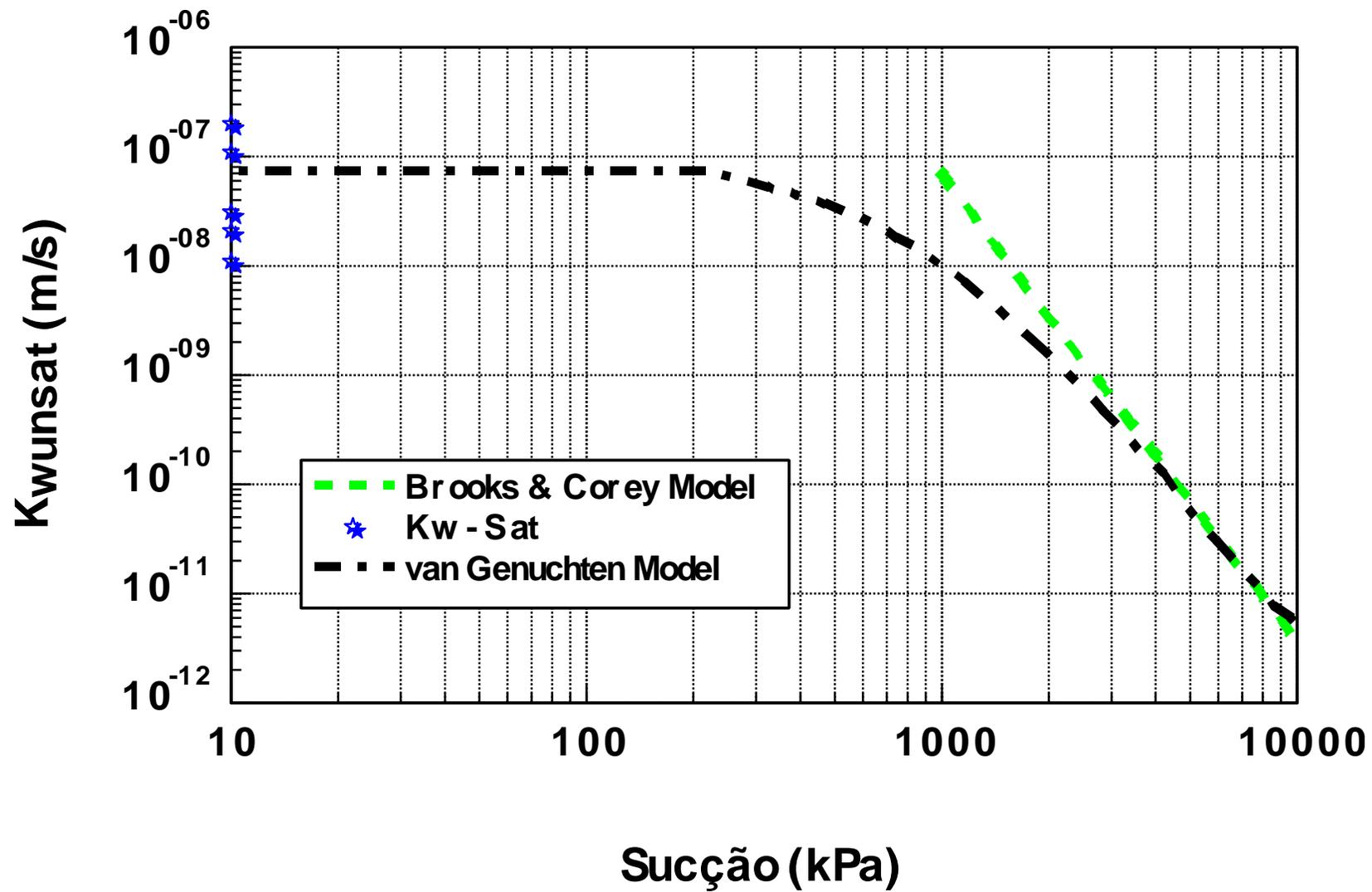
Continuidade hidráulica

A Função de Permeabilidade



Modelos para a Função de Permeabilidade

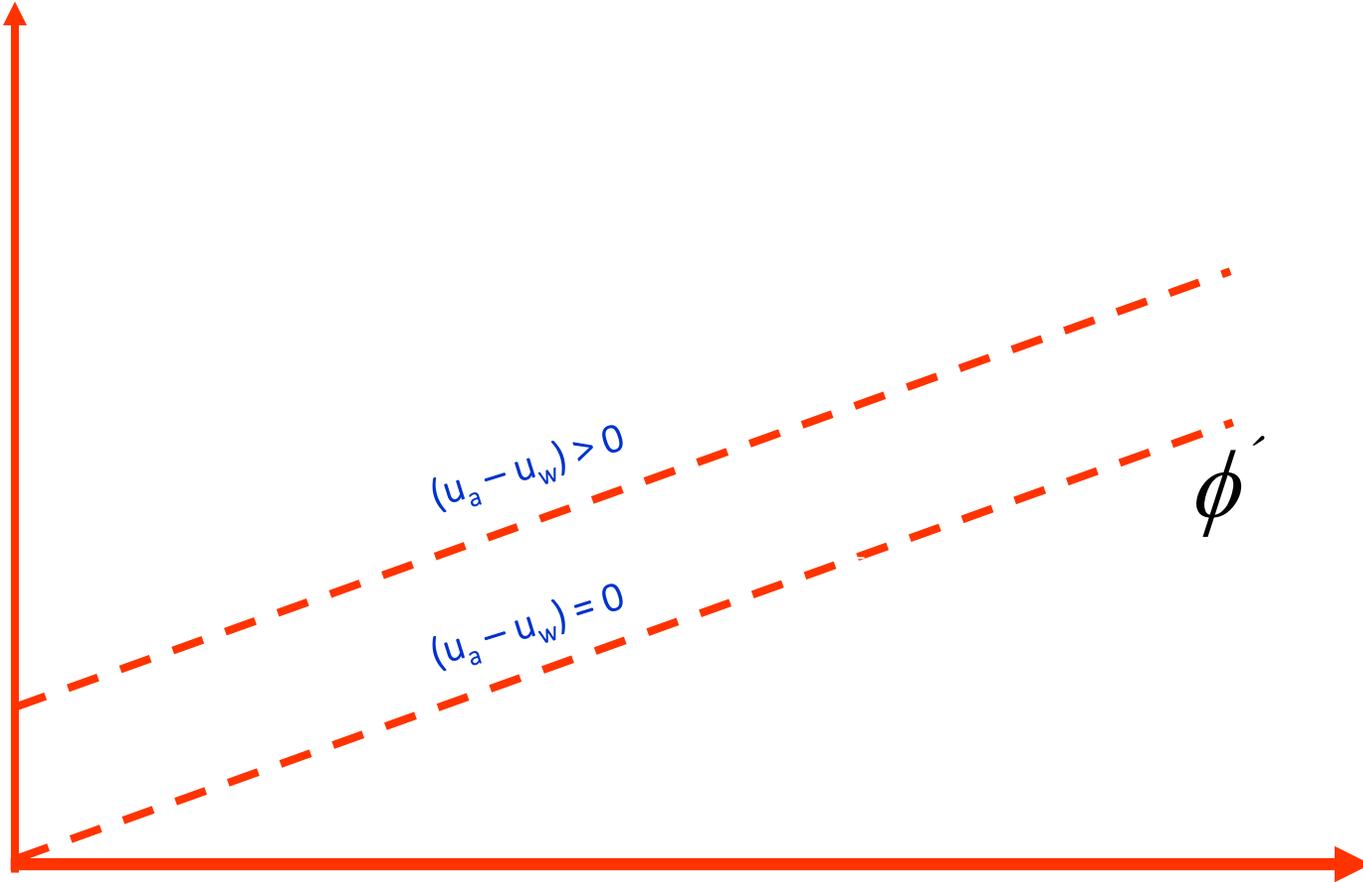
- Gardner (1958)
- Brooks & Corey (1964)
- van Genuchten (1980)
- Fredlund et al. (1994)



resistência

τ

Ganho de
resistência
devido à
sucção



$(u_a - u_w) > 0$

$(u_a - u_w) = 0$

ϕ'

σ

Fluxo

k

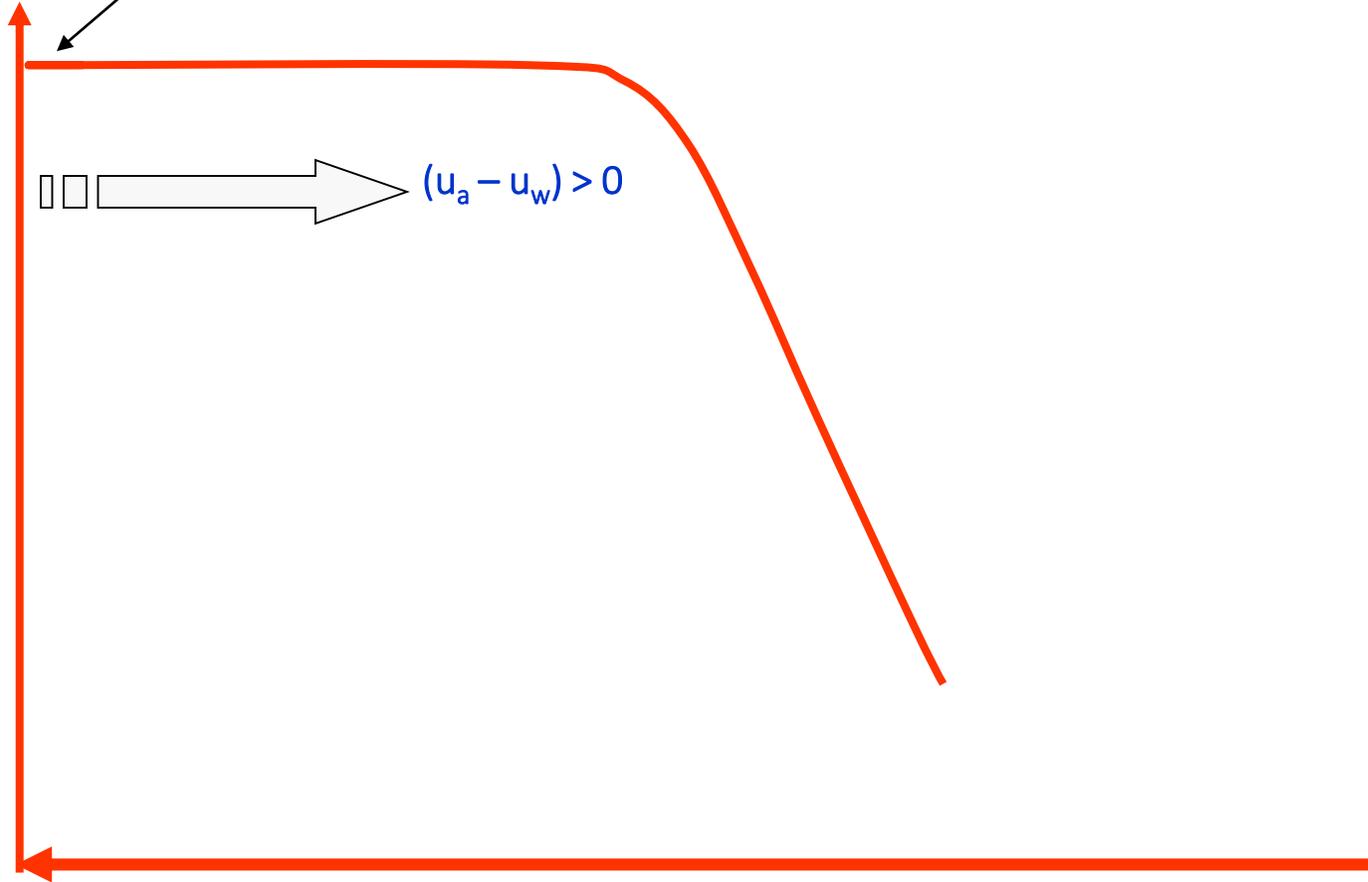
Permeabilidade saturada



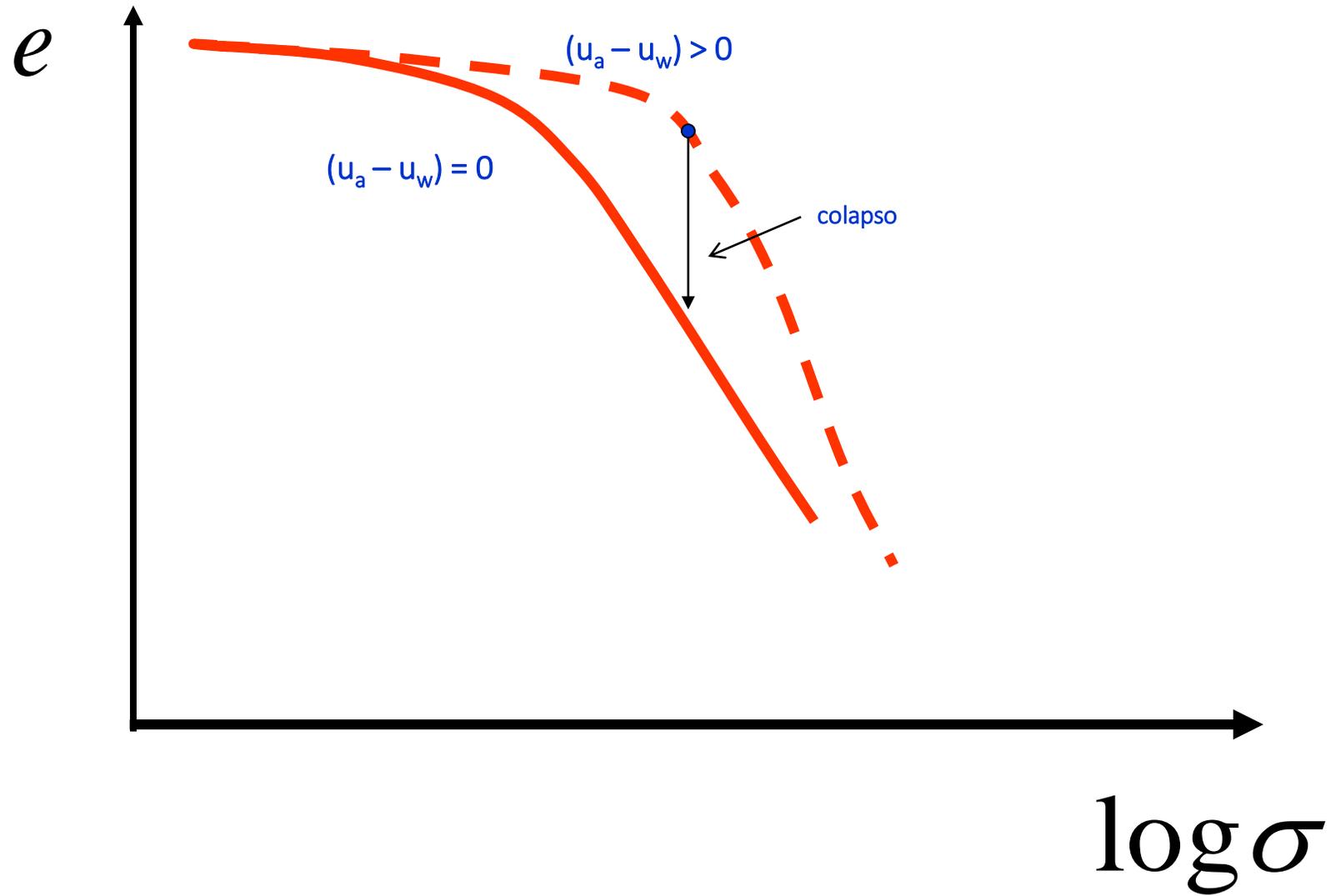
$$(u_a - u_w) > 0$$

100%

S



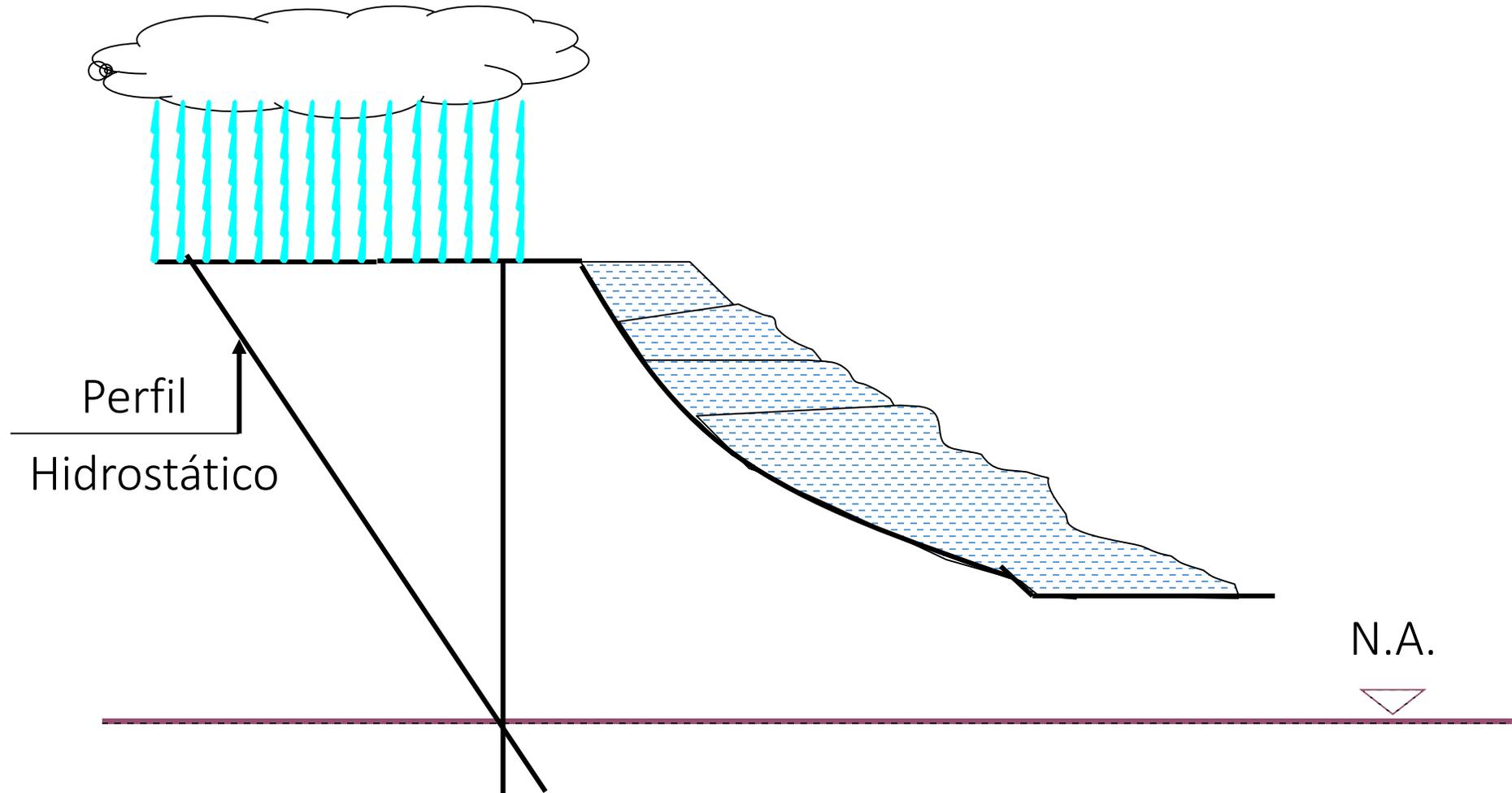
Compressibilidade



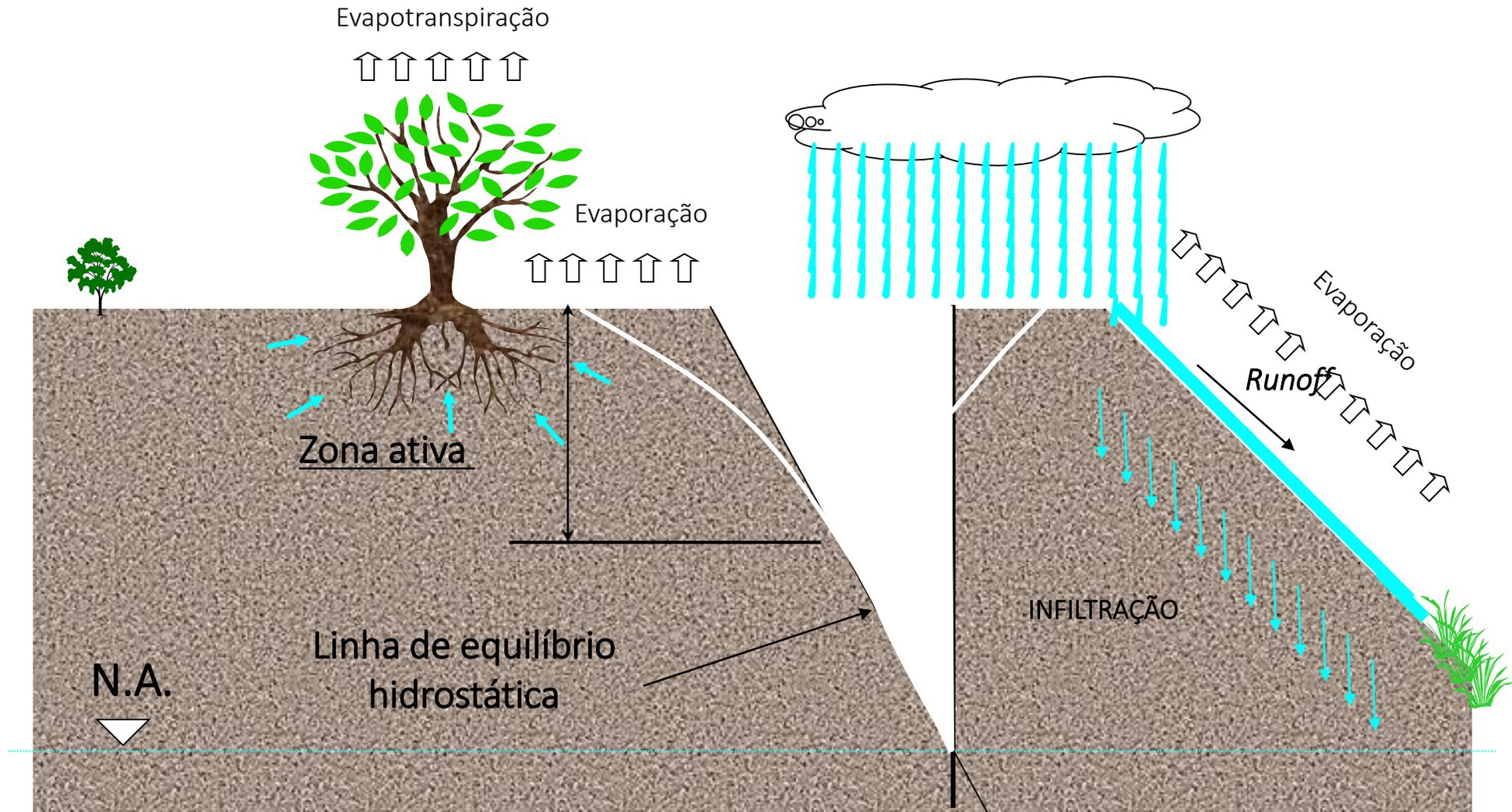
Aplicações

- Taludes
- Aterros/Barragens
- Armazenamento e transporte de material poroso
- Cobertura de Aterros de Resíduos

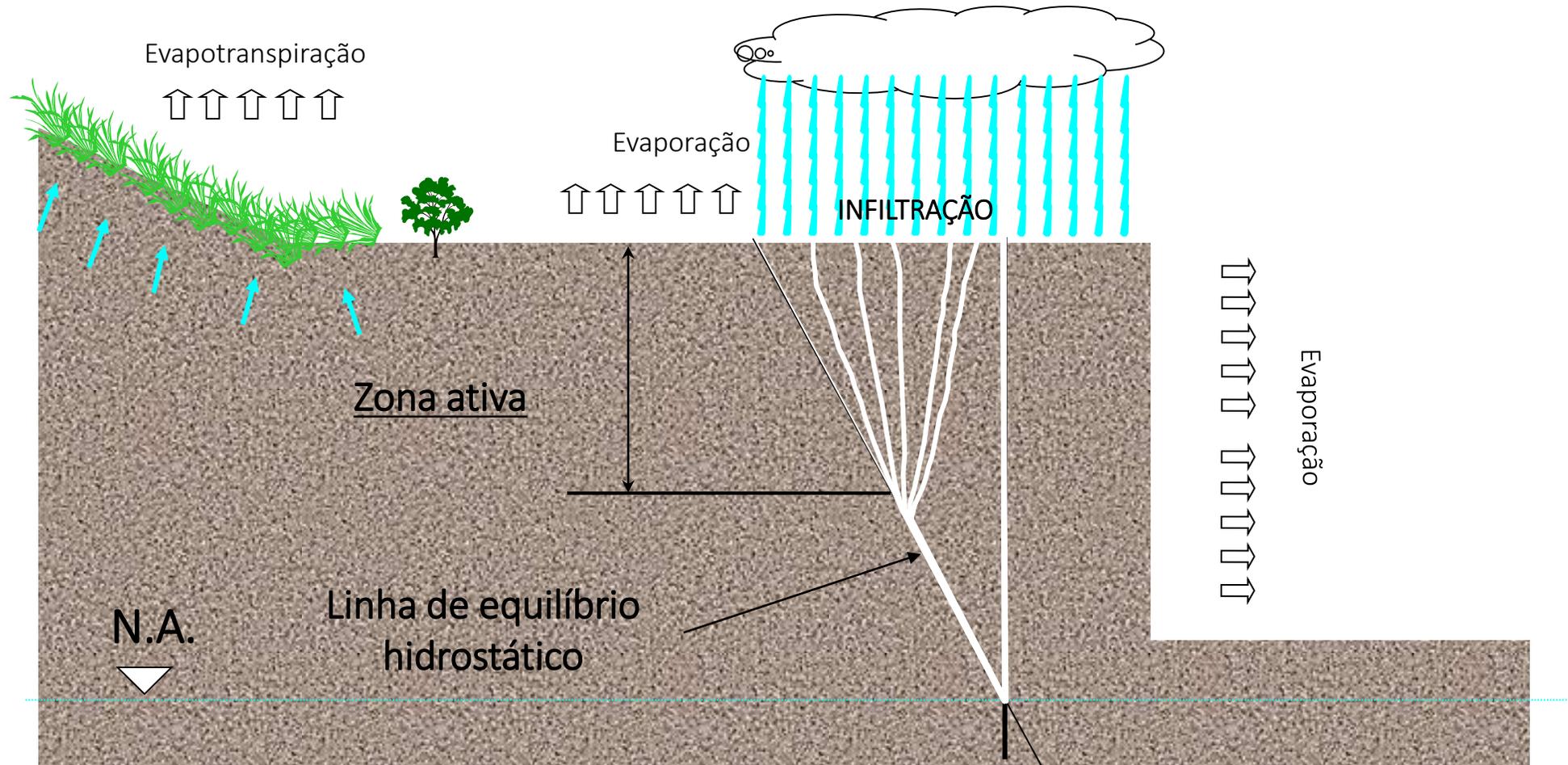
- Taludes



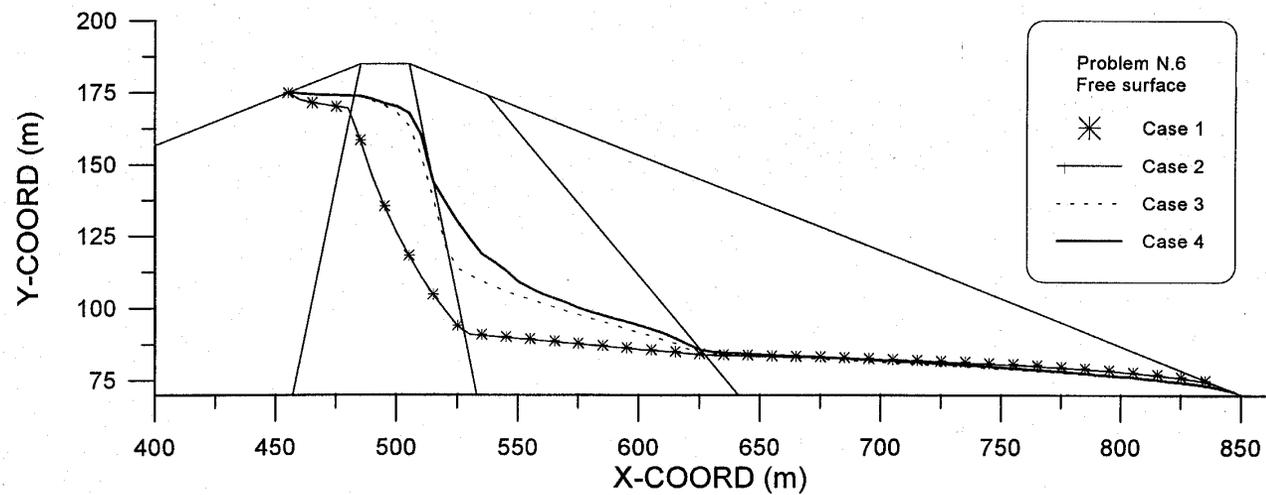
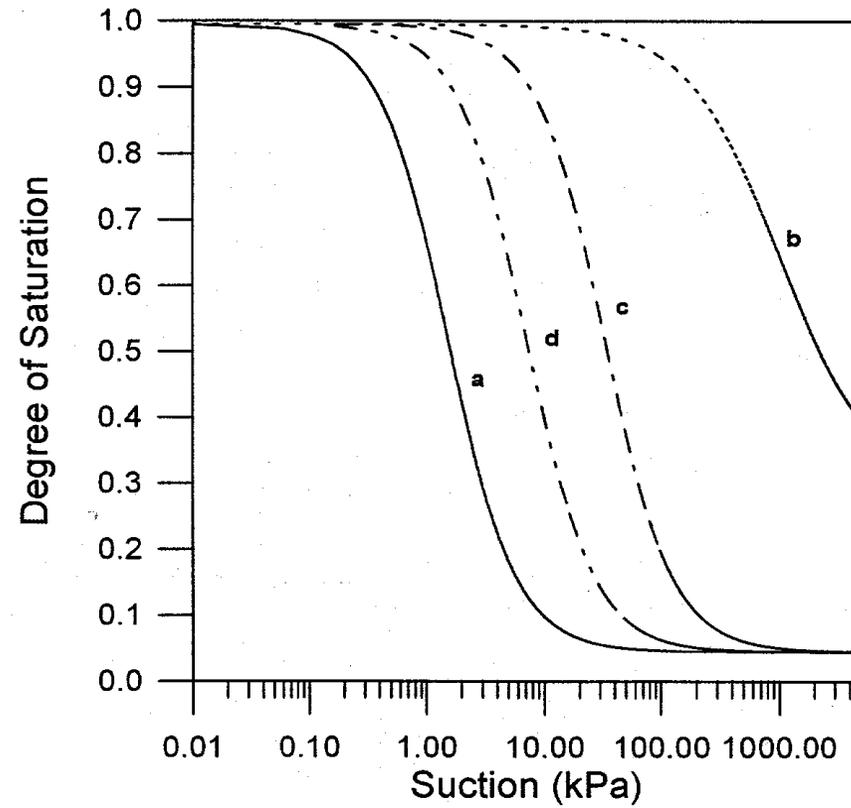
Variação sazonal da sucção

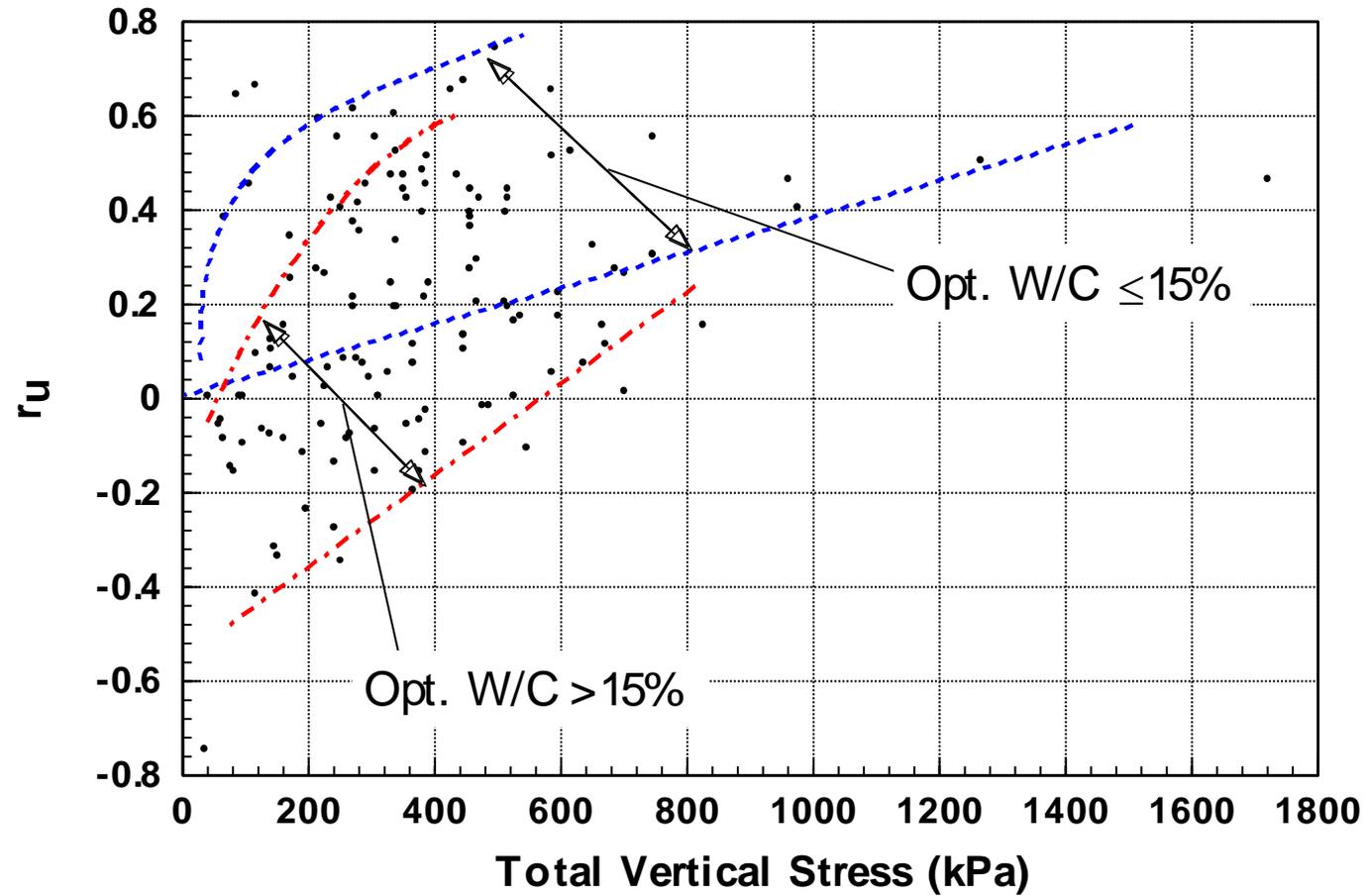


Variação sazonal da sucção

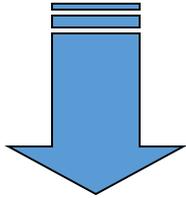


- Aterros e Barragens



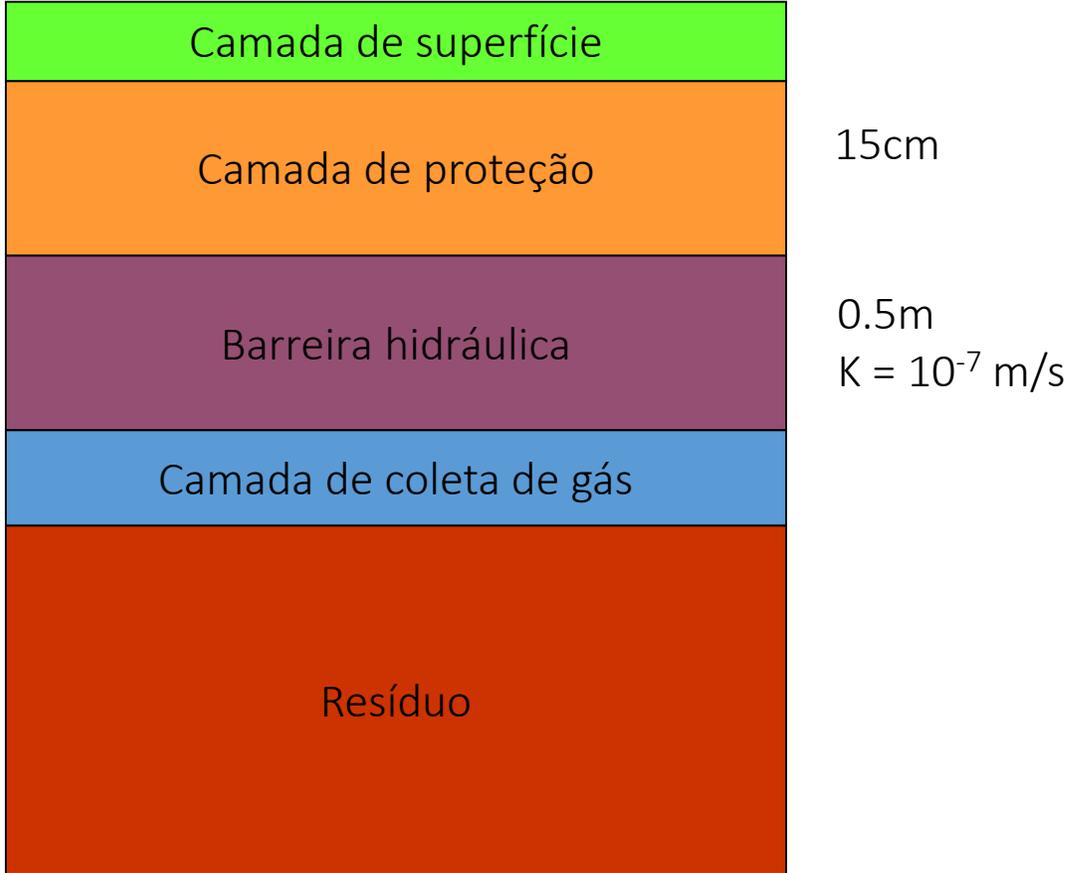


Barreira Convencional



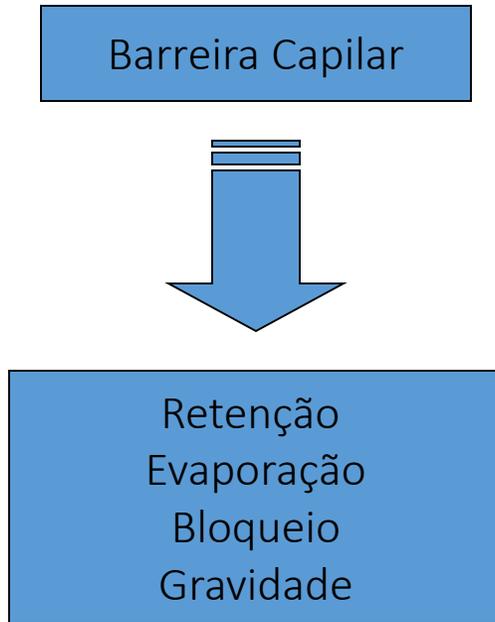
“impermeabilizante”

Especificações Gerais



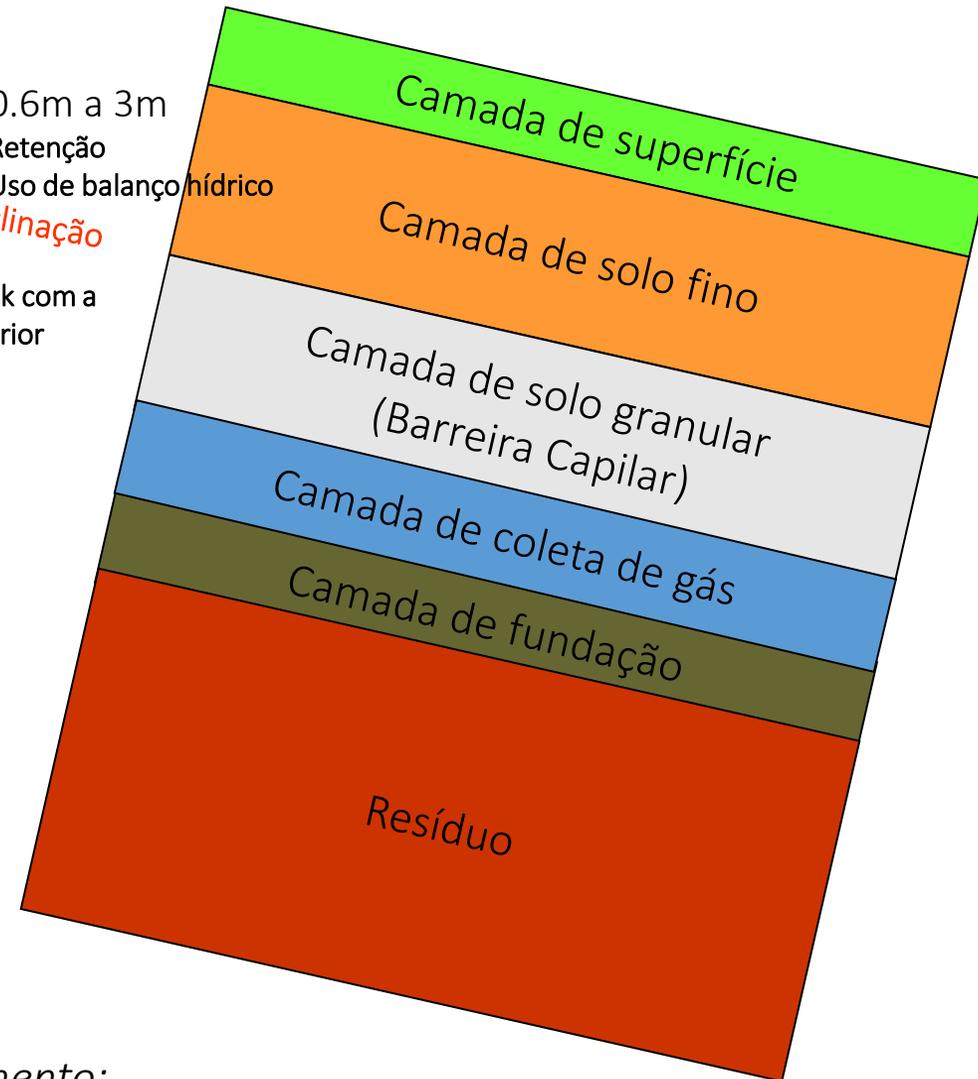
Requerimento:

Solo com capacidade de apresentar baixa permeabilidade quando adequadamente compactado, ou geomembrana.



Especificações Gerais

0.6m a 3m
Retenção
Uso de balanço hídrico
Inclinação
Contraste de k com a
camada superior

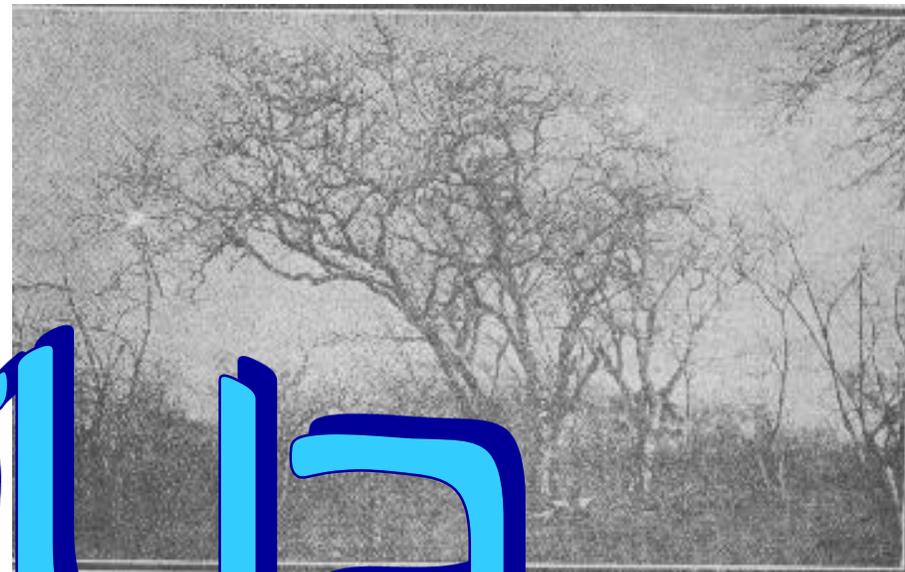


Requerimento:

Sistema que inclui solo com capacidade de retenção de água adequada para o clima local, camada de bloqueio e inclinação.



Barragem de Ent...



www.barabemrevisita.org



Barragem de Oros (CE)

Água