
Processos Hidrológicos

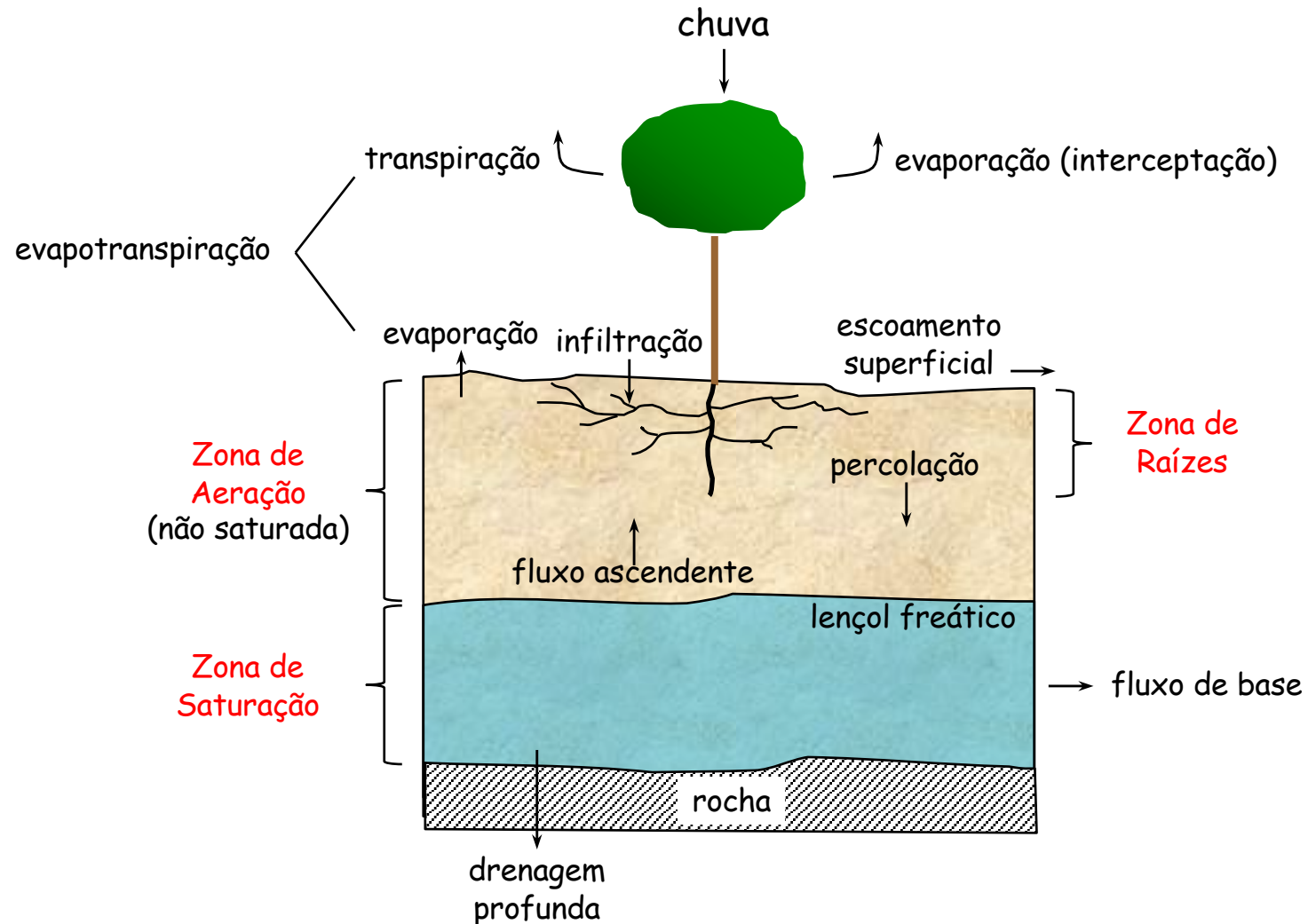
CST 318 / SER 456

Tema 4 - Infiltração e movimento da água no solo
Parte 1

ANO 2017

Laura De Simone Borma
Camilo Daleles Rennó
<http://www.dpi.inpe.br/~camilo/prochidr/>

Infiltração, movimento e retenção da água no solo

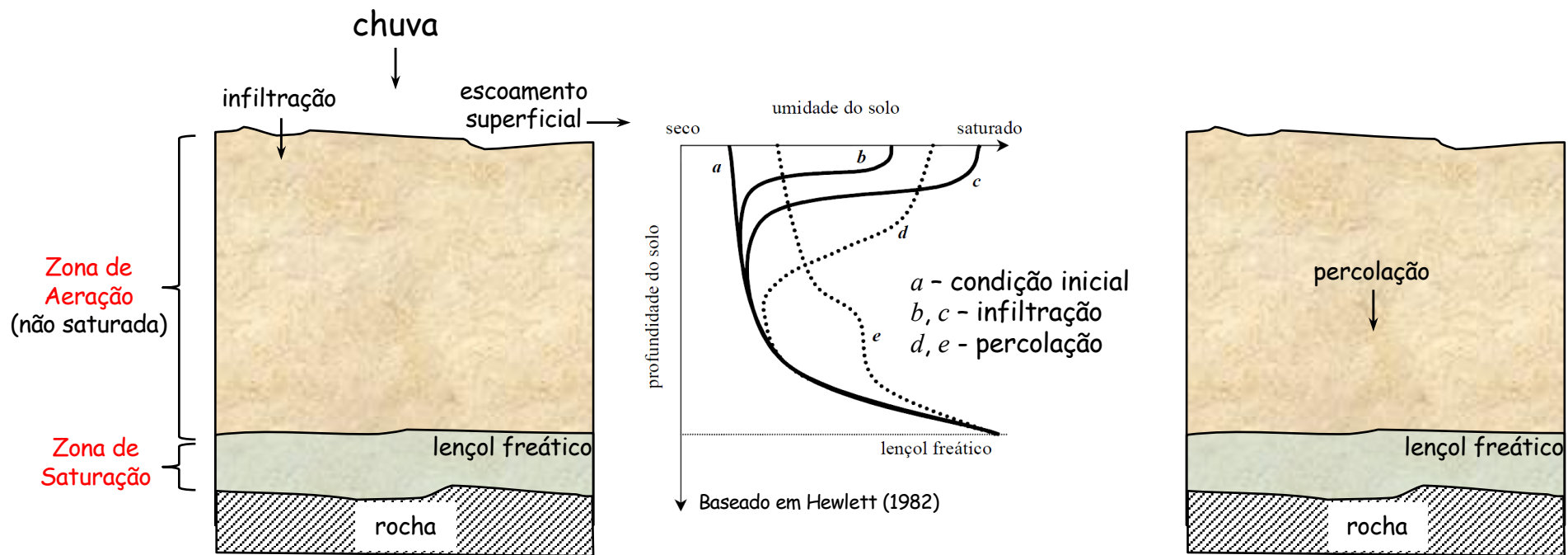


Infiltração, movimento e retenção da água no solo

Infiltration is the process of water entry into a soil from rainfall, snowmelt, or irrigation. Soil water movement is the process of water flow from one point to another within the soil. The two processes cannot be separated as the rate of infiltration is controlled by the rate of soil water movement below the surface and the soil water movement continues after an infiltration event, as the infiltrated water is redistributed. The soil water movement also controls the supply of water for plant uptake and for evaporation at the soil surface. Infiltration and soil water movement play a key role in surface runoff, groundwater recharge, evapotranspiration, soil erosion, and transport of chemicals in surface and subsurface waters.

The soil properties affecting soil water movement are hydraulic conductivity (a measure of the soil's ability to transmit water) and water-retention characteristics (the ability of the soil to store and release water). These soil water properties are closely related to soil physical properties.

Infiltração e Percolação



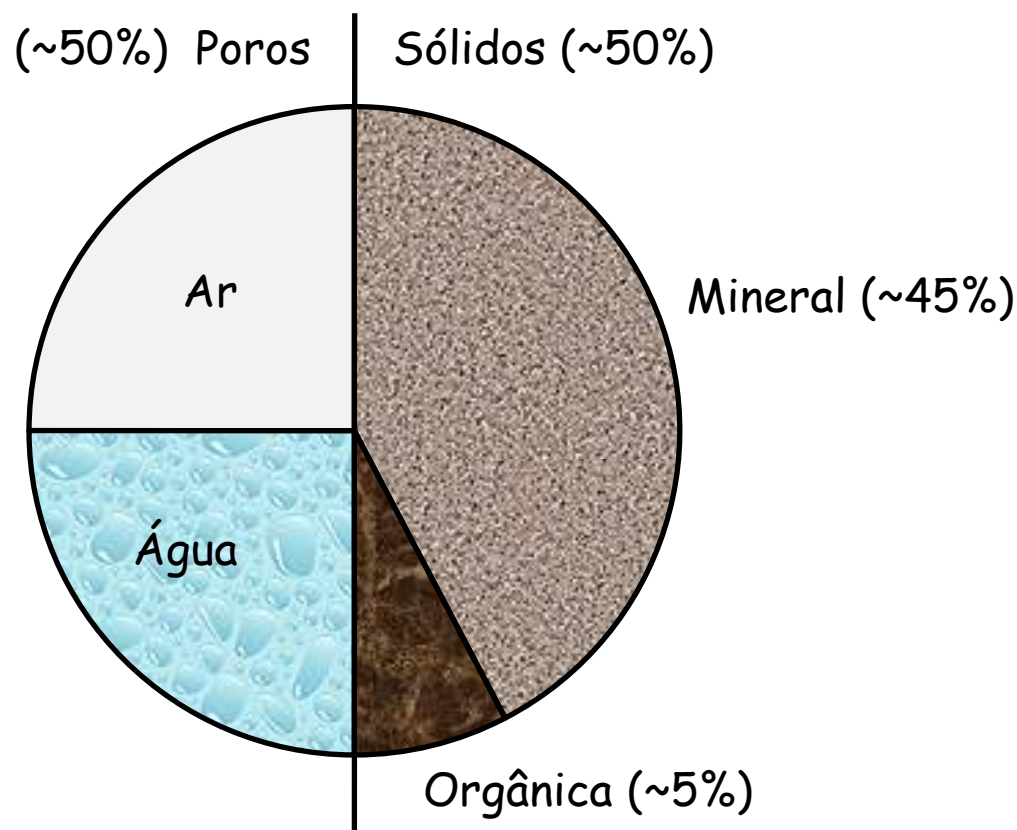
Infiltração é o processo de passagem da água pela superfície do solo.

Percolação é o avanço descendente da água na zona não saturada -

movimento da água no solo.

PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

Propriedades físicas do solo



A infiltração da água no solo só é possível pelo fato do solo ser **um meio poroso** que compreende uma **matriz de solo** composta por **partículas sólidas granulares e vazios** que podem ser preenchidos com água ou ar

O arranjo entre essas 3 fases resulta em diferentes propriedades físicas do solo

Propriedades físicas do solo

(ou características morfológicas do solo)

Cor

Textura (ou granulometria)

Estrutura e Porosidade

Presença de nódulos e
concreções

Propriedades físicas do solo

(ou características morfológicas do solo)

Atributos utilizados para:

- Identificação dos solos (gênese, levantamento e classificação)
- Habilidade do solo em suportar o desenvolvimento de plantas
- Resposta ao manejo
- Resistência à degradação por processos erosivos
- Estudo da infiltração e movimento da água no solo

Propriedades físicas do solo

Cor

Textura (ou granulometria)

Estrutura e Porosidade

Presença de nódulos e concreções

Cor

Importância:

- Característica do solo mais óbvia e mais facilmente determinável
- Infere sobre a ocorrência de processos pedogenéticos
 - Solos bem drenados possuem cor uniforme
 - Solos com lençol freático oscilante são mosqueados em cores acinzentadas, amareladas e/ou laranjadas
- Principais agentes responsáveis pela cor:
 - Matéria orgânica e óxidos de Fe

Cor



Cores escuras: indicam presença de matéria orgânica e estão relacionadas com os horizontes mais superficiais.



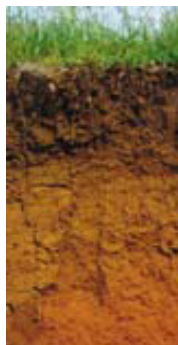
Cores claras: indicam presença de minerais claros (caolinita e quartzo). Pode significar a perda de materiais corantes e solos altamente lixiviados.



Cores vermelhas: indicam condições de boa drenagem e aeração do solo. Estão relacionadas com a presença de hematita (óxido de Fe).



Cores acinzentadas: indicam condições de saturação do solo com água (redução do ferro).



Cores amarelas: podem indicar condições de boa drenagem, mas com regime mais úmido. Estão relacionadas com a presença de goetita (óxido de Fe)

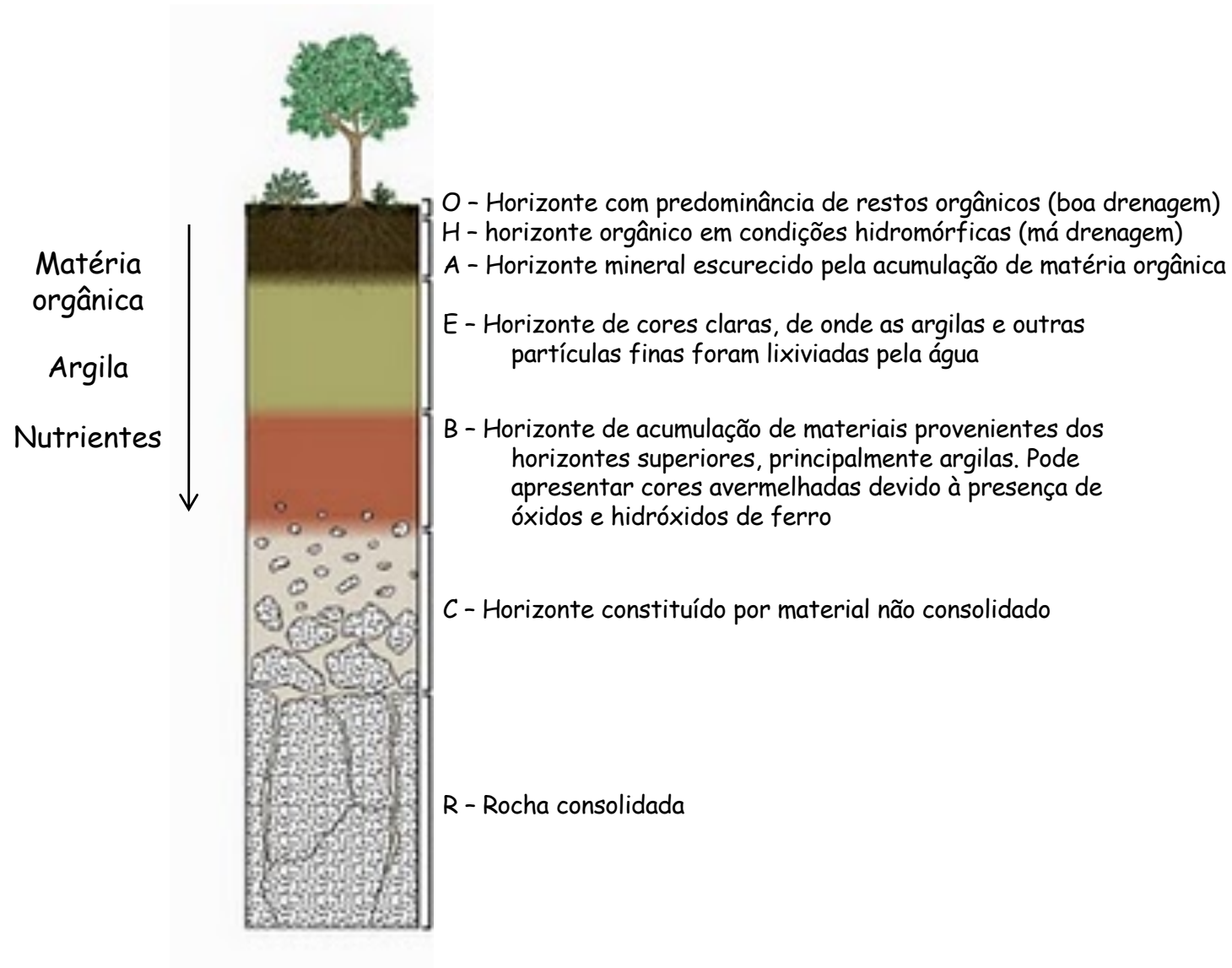


Cores mosqueadas (manchas amarelas, vermelhas, pretas, em uma matriz ou fundo normalmente acinzentado) - lençol freático oscilante

Definida a partir da Carta de Cores Munsell para Solos (Matiz/Valor/Croma)



Perfil do Solo



Propriedades físicas do solo

Cor

Textura (ou granulometria)

Estrutura e Porosidade

Presença de nódulos e concreções



Textura

- Refere-se à **distribuição das partículas** em termos de **tamanho**
- Escala de variação: desde cascalhos (ϕ de cm) até coloides (não podem ser vistos a olho nu)
- **Tamanho das partículas**: determina o número de partículas por unidade de volume ou de peso, a superfície e o tamanho dos poros

Classificação granulométrica

Fração	Diâmetro
Matacões	> 20 cm
Calhaus	20 mm a 20cm
Cascalhos	2 a 20 mm
Areia Grossa	0,2 a 2 mm
Areia Fina	0,05 a 0,2 mm
Silte	0,002 a 0,05 mm
Argila	< 0,002 mm

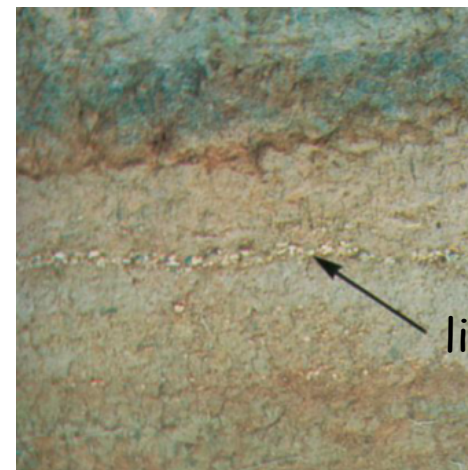
Influencia:

- movimentação da água (condutividade hidráulica)
- retenção/armazenamento de água
- fertilidade
- capacidade mecânica

Matacões, Calhaus e Cascalhos




Diâmetros maiores que 2 mm

Não são considerados como parte da fração fina do solo



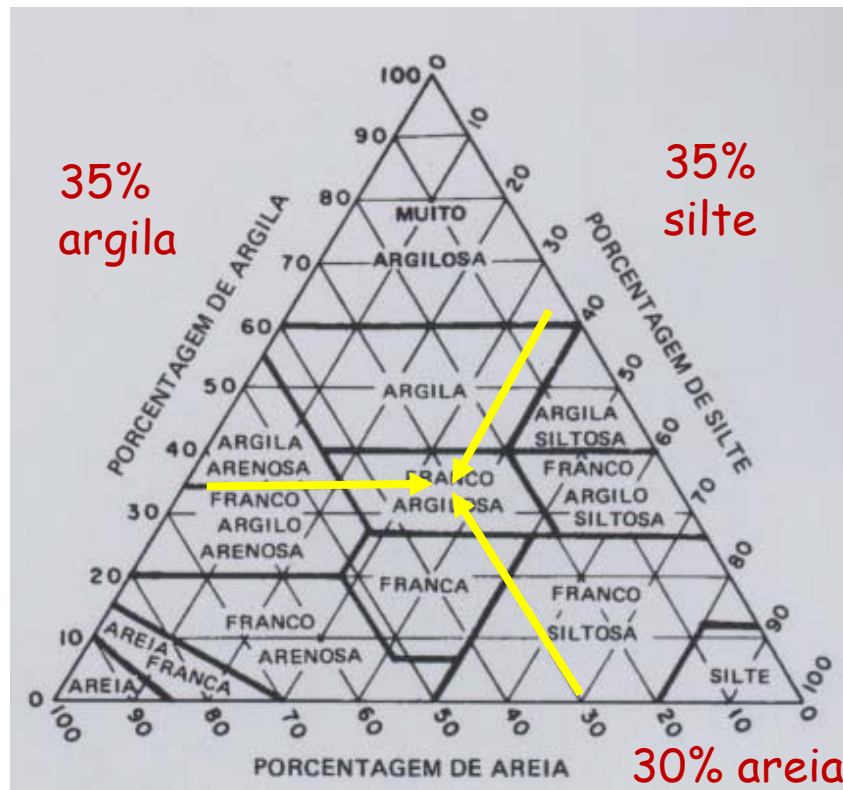
linha de pedras

Areias, siltes e argilas

Textura	Diâmetro (ABNT)	Características
<p>Areia</p> 	<p>2mm e 0,05mm</p> <p>Visíveis à olho nú</p>	<p>constituídas de minerais resistentes ao intemperismo</p> <ul style="list-style-type: none">↑ suscetibilidade à erosão↑ macroporosidade e permeabilidade↑ densidade↑ drenagem e lixiviação↓ retenção de água↓ agregação
<p>Silte</p> 	<p>0,05 e 0,002 mm</p> <p>invisíveis à olho nú</p>	<p>Moderada plasticidade</p> <p>Retém/Armazena mais água que a areia</p> <p>Facilmente lavável e sujeito à lixiviação/erosão</p> <p>Retém mais nutrientes que a areia</p>
<p>Argila</p> 	<p>< 0,002 mm</p> <p>invisíveis à olho nú</p>	<ul style="list-style-type: none">↑ plasticidade↑ superfície específica↓ permeabilidade↑ capacidade de retenção de água↑ capacidade de adsorção de elementos químicos (CTC)↓ densidade

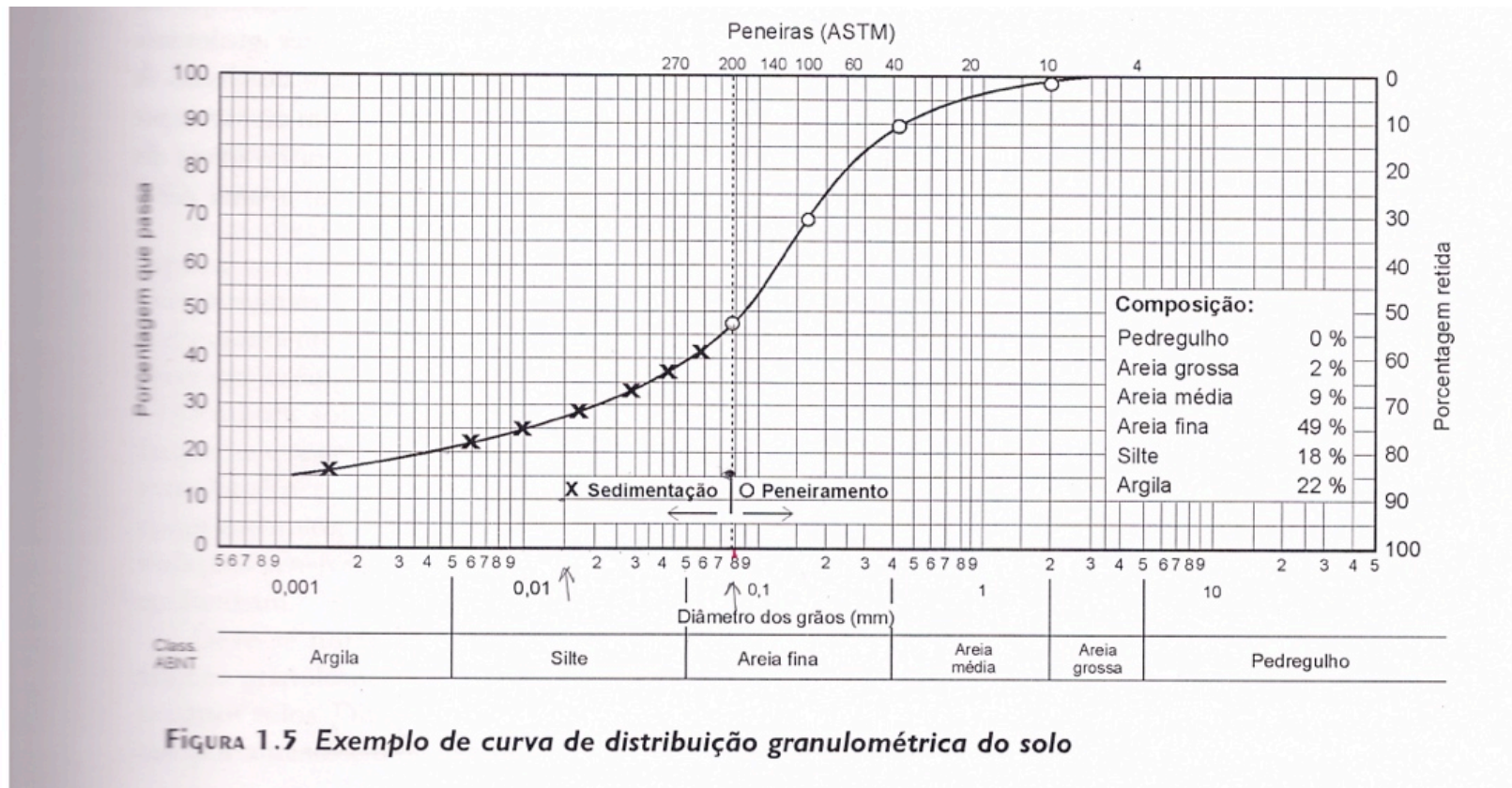
Classe Textural

A Classe textural é definida a partir das proporções das frações areia (grossa+finha), silte e argila presente na amostra de solo.



Franco argiloso

Curva granulométrica



- Peneiramento
- Sedimentação (solos argilosos)

Determinação da Textura do Solo

- Qualitativa (campo)
 - Baseada na sensação de tato (plasticidade, pegajosidade)
 - Requer experiência: presença de outros materiais pode mascarar o resultado
- Quantitativa (laboratório)
 - Peneiramento e sedimentação
 - Uso de peneiras para as frações mais grossas ($> 0,05\text{mm}$)
 - Método da pipeta para frações argila e silte
 - Sedimentos - lei de Stokes (velocidade de queda da partícula como função do diâmetro)



Propriedades físicas do solo

Cor

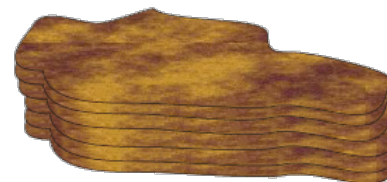
Textura (ou granulometria)

Estrutura e Porosidade

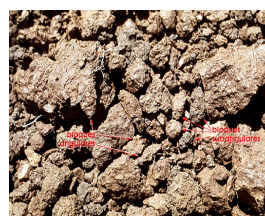
Presença de nódulos e concreções

Estrutura do solo

- Refere-se ao arranjo das partículas de areia, silte e argila no solo, formando ou não **agregados**



laminar
neve/sobrecarga



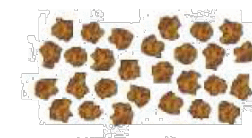
blocos
concentração de argilas

- **Tipos de estrutura:**

- Laminar
- Blocos
- Prismática ou colunar
- Granular, ou
- Ausência de estrutura
 - Grão simples (p.e. areia da praia)
 - Massiva (massa coesa e uniforme)



prismática e colunar
semi-árido brasileiro



granular
horizonte A

Estrutura do solo



Sem estrutura:
- grão simples
- massiva



Estrutura
laminar

Não favorece a
penetração de água nem
de raízes

Como isso afeta a infiltração?

Estrutura do solo

- Importância
 - De grande importância para a vida vegetal
 - Proteção contra agentes erosivos
 - Influência na profundidade do crescimento radicular
 - Se o solo não for bem estruturado, faltarão água, oxigênio e nutrientes
 - Capacidade de armazenamento de água e ar no solo → porosidade

• O manejo do solo pode afetar a estrutura do solo, inclusive destruindo a mesma, se não for adequadamente conduzido.

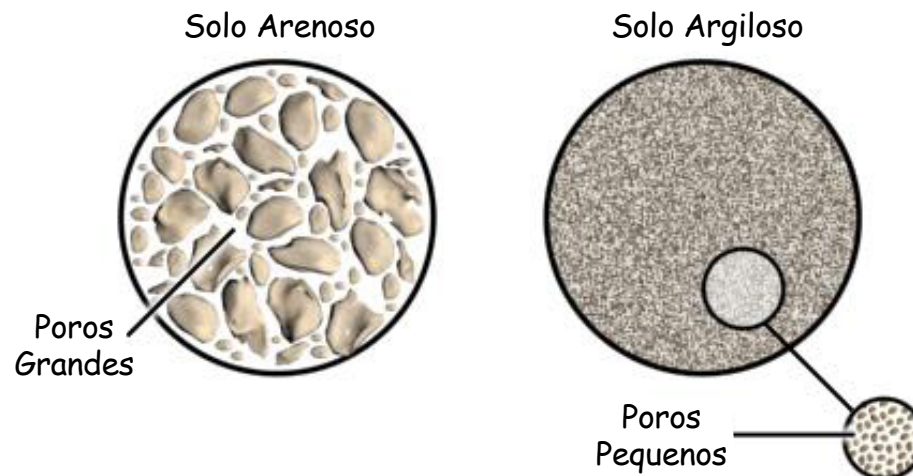


Porosidade

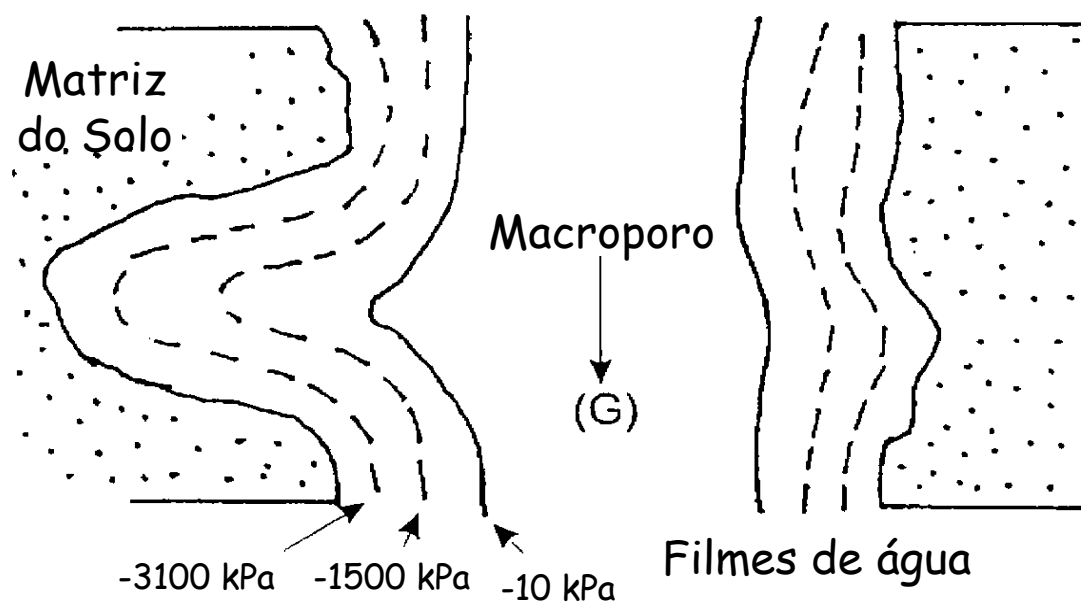
- Refere-se ao volume de solo ocupado pela água e pelo ar
- Estão incluídos todos os poros existentes: macro e microporosidade
 - Somente os macroporos são visíveis
- Influencia diretamente no movimento da água no solo
- Determina a capacidade de armazenamento de água no solo



macroporos



Macroporos (trincas ou fissuras)



Propriedades físicas do solo

Cor

Textura (ou granulometria)

Estrutura e Porosidade

Presença de nódulos e concreções

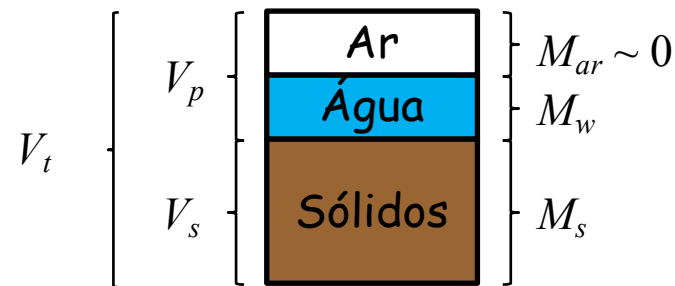
Nódulos e concreções

- Corpos cimentados de origem pedogenética (do próprio solo) que podem ser removidos intactos do solo
- Nódulos distinguem-se de concreções pois estas apresentam organização interna
- Devem ser identificados quanto à quantidade, tamanho, dureza, forma, cor e natureza do material (composição provável). Ex. Concreções ferromagnesianas; carbonáticas, nódulos gipsíticos, etc.
- Têm origem pedogenética e não devem ser confundidos com resíduos da decomposição da rocha



Índices físicos

- Através das relações de massa e volume de cada fase do solo é possível determinar uma série de métricas (índices físicos) que caracterizam o estado do solo em resposta às propriedades físicas (textura, estrutura, etc.);
- Índices físicos: densidade, porosidade, umidade do solo, grau de saturação, etc.



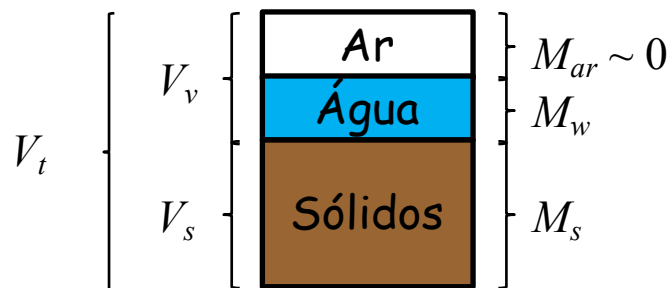
Densidade do Solo

Densidade real dos grãos: relação entre a massa do solo seco (M_s , g) e o volume (V_s , cm³) das partículas do solo, dada por:

$$\rho_r = \frac{M_s}{V_s}$$

Densidade aparente (bulk density): relação entre a massa do solo seco (M_s , g) e o volume total* (V_t , cm³) da amostra do solo, dada por:

$$\rho_a = \frac{M_s}{V_t}$$



Unidade usual: Kg.m⁻³

Pode também ser dada em:

$$g.cm^{-3} = 1 \text{ kg/L} = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$$

* V_t considera a amostra indeformada, ou seja, a estrutura do solo

Determinação da densidade

- Princípio básico - determinação da massa e do volume
- Densidade real dos grãos (ρ_r)
 - Coleta de amostra deformada
 - Secagem em estufa para eliminação da água
 - Determinação da massa (M_s)
 - Determinação do volume (V_s) - como pode ser feito?
 - Cerca de $2,65 \text{ g.cm}^{-3}$ para a maioria dos solos minerais
- Densidade aparente
 - Coleta de amostras indeformadas in situ
 - secagem em estufa para eliminação da água
 - Determinação da massa (M_s)
 - Determinação do volume (V_s) - como pode ser feito?



<https://www.youtube.com/watch?v=Q39oJhEXPvo>

Amplitude de variação da densidade

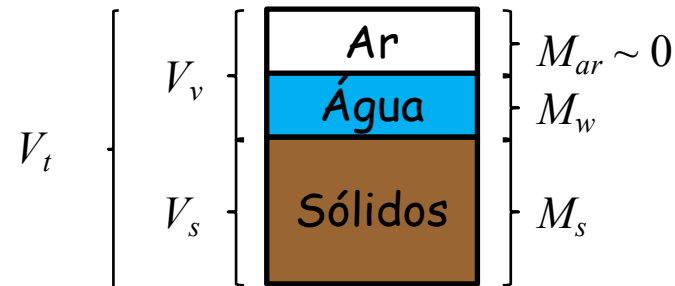
Tipo de solo	Densidade
Solos argilosos	1,0 a 1,4 g/cm ³
Solos arenosos	1,2 a 1,6 g/cm ³
Solos húmicos	0,7 a 1,0 g/cm ³
Turfa	0,2 a 0,5 g/cm ³

Fonte: Reichard, 1987 - Á água em sistemas agrícolas

Porosidade do Solo

Porosidade (n): relação entre o volume de vazios (V_v , cm³) e o volume total (V_t , cm³) da amostra do solo, dada por:

$$n = \frac{V_v}{V_t}$$

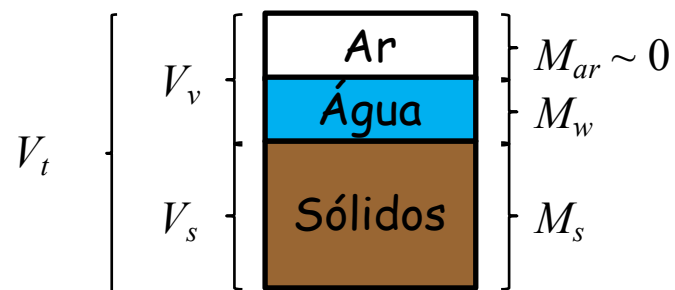


* V_t considera a amostra indeformada, ou seja, a estrutura do solo

Porosidade do Solo

Porosidade (n): relação entre o volume de vazios (V_v , cm^3) e o volume total (V_t , cm^3) da amostra do solo, dada por:

$$n = \frac{V_v}{V_t} = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r} \quad (\text{varia entre 30 e 70\%})$$



* V_t considera a amostra indeformada, ou seja, a estrutura do solo

Conteúdo de Água no Solo

Conteúdo gravimétrico: é uma medida da relação entre as massas de água (M_w , g) e do solo seco (M_s , g), dada por:

$$w = \frac{M_w}{M_s}$$

Conteúdo volumétrico: é uma medida da relação entre os volumes de água (V_w , cm³) e total (V_t , cm³) do solo, dada por:

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} = w\rho_a$$

Usa-se umidade volumétrica para se calcular a lâmina d'água ($1 \text{ mm} = 1 \text{ l m}^{-2}$) equivalente estocada no solo, quando se quer realizar o balanço hidrológico (relacionar precipitação, água no solo, evapotranspiração e deflúvio na mesma unidade de medida).

Grau de saturação

Grau de saturação (S): refere-se à proporção dos poros que contém água. É dado pela relação entre o volume de água (V_w , cm³) e o volume de vazios (V_v , cm³)

$$S(\%) = \frac{V_w}{V_v} = \frac{\theta}{n}$$

Onde:

θ - teor de umidade volumétrico

n - porosidade

Pode variar de 0 a 100%

Determinação da umidade do solo

Métodos diretos:

- Gravimétrico

Métodos indiretos:

- Sonda de nêutrons
- Baseados na condutividade elétrica (TDR)
- Tensiômetros (curva de retenção)

Método Gravimétrico

Uma amostra indeformada (não perturbada) do solo é retirada usando-se um anel volumétrico e imediatamente pesada (M_t)

Leva-se a amostra para secar em estufa (105°C) por 24 horas, pesando-a novamente. A diferença entre pesos resulta na massa de água (M_w)

$$w = \frac{M_w}{M_t - M_w}$$

É um método destrutivo, não permitindo a repetição da amostragem no mesmo ponto



Exemplo

Uma amostra não perturbada foi tirada do solo. A amostra tem 10 cm de comprimento e 5 cm de diâmetro. O peso da amostra imediatamente após ser retirada foi de 331,8 g. Após secagem a 105°C, o peso foi de 302,4 g. Calcule a densidade aparente, a porosidade, o conteúdo de água (gravimétrico e volumétrico).

$$\text{Volume da amostra é } V_s = 10 \text{ cm} \times (2,5 \text{ cm})^2 \times 3,1416 = 196,35 \text{ cm}^3$$

$$\text{A densidade do solo é } \rho_a = \frac{M_s}{V_t} = \frac{302,4 \text{ g}}{196,35 \text{ cm}^3} = 1,54 \text{ gcm}^{-3}$$

$$\text{Considerando que } \rho_r = 2,65 \text{ gcm}^{-3}, \text{ a porosidade é } \phi = 1 - \frac{1,54 \text{ gcm}^3}{2,65 \text{ gcm}^3} = 0,419$$

$$\text{O conteúdo volumétrico de água é } \theta = \frac{V_w}{V_t} = \frac{(331,8 \text{ g} - 302,4 \text{ g}) \times 1 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}}{196,35 \text{ cm}^3} = 0,15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$$

$$\text{O conteúdo gravimétrico é } w = \frac{M_w}{M_s} = \frac{331,8 \text{ g} - 302,4 \text{ g}}{302,4 \text{ g}} = 0,097 \text{ gg}^{-1}$$

Sonda de Nêutrons

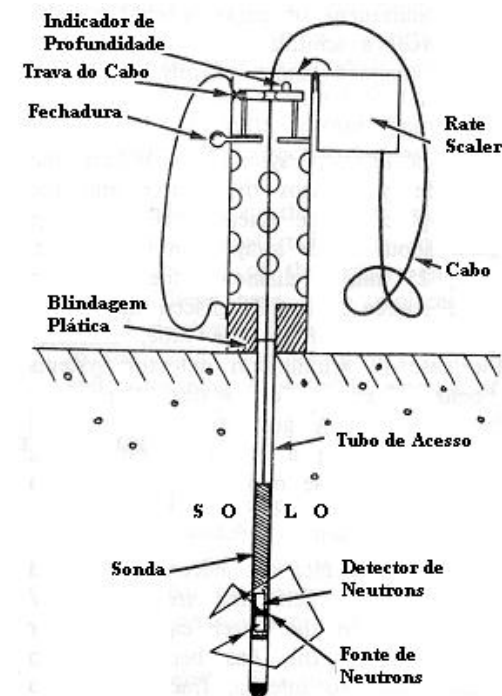
Usa uma fonte radioativa que emite nêutrons rápidos. Os nêutrons rápidos colidem com elementos do solo e desaceleram.

Um detector "conta" o número de nêutrons lentos. A densidade de nêutrons lentos é diretamente proporcional a quantidade de hidrogênio presente no solo, permitindo correlacioná-la com a umidade volumétrica do solo através de uma calibração prévia.

Grande limitação: é radiativo!

Pode ser usado a qualquer profundidade (exceto à superfície), avaliando um volume referente a uma esfera de 15 a 30 cm de diâmetro, sem introduzir uma grande perturbação no solo.

No entanto, sofre influência do conteúdo natural de hidrogênio no solo (grande desacelerador de nêutrons), da densidade do solo e de outros componentes químicos.



TDR (*Time Domain Reflectometry*)

Baseia-se na determinação da constante dielétrica do solo (ϵ), que mede a tendência de moléculas de uma substância de se orientarem em um campo elétrico. A constante dielétrica da água é de cerca de 80, das partículas minerais de 3 a 7, e do ar de 1. Esta grande diferença permite estimar a umidade volumétrica do solo.

É um método não destrutivo e não radiativo. Permite medições automáticas e contínuas. No entanto, requer uma calibração específica para cada tipo de solo e não funciona adequadamente em solos com alto teor de argila, quartzo e matéria orgânica. A temperatura do solo também influencia nas medições de umidade.



PERGUNTAS ??

Movimento e retenção da água no solo

Conceitos:

- Zona saturada e não saturada do solo;
- Propriedades hídricas do solo

Propriedades hídricas do solo

Potencial de água no solo

Curva de retenção de água no solo (ou curva característica solo-água - *CCSA*)

Capacidade de campo (*CC*)

Ponto de murcha permanente (*PMP*)

Atributos utilizados para definir o estado e o potencial de fluxo da água no solo

Propriedades hídricas do solo

- **Permeabilidade do solo**
 - Expressa numericamente pela Condutividade hidráulica do solo ou Coeficiente de permeabilidade (K)
 - Meio saturado: $K = K_s$
 - Meio não saturado: $K = K(\theta)$
 - Métodos de determinação da permeabilidade do solo
 - Lei de Darcy
- **Capacidade de retenção de água no solo**
 - Equação de Richards
 - Potencial de água no solo
 - Conceitos de capacidade de campo e ponto de murcha permanente

Atributos utilizados para definir o fluxo e armazenamento da água no solo

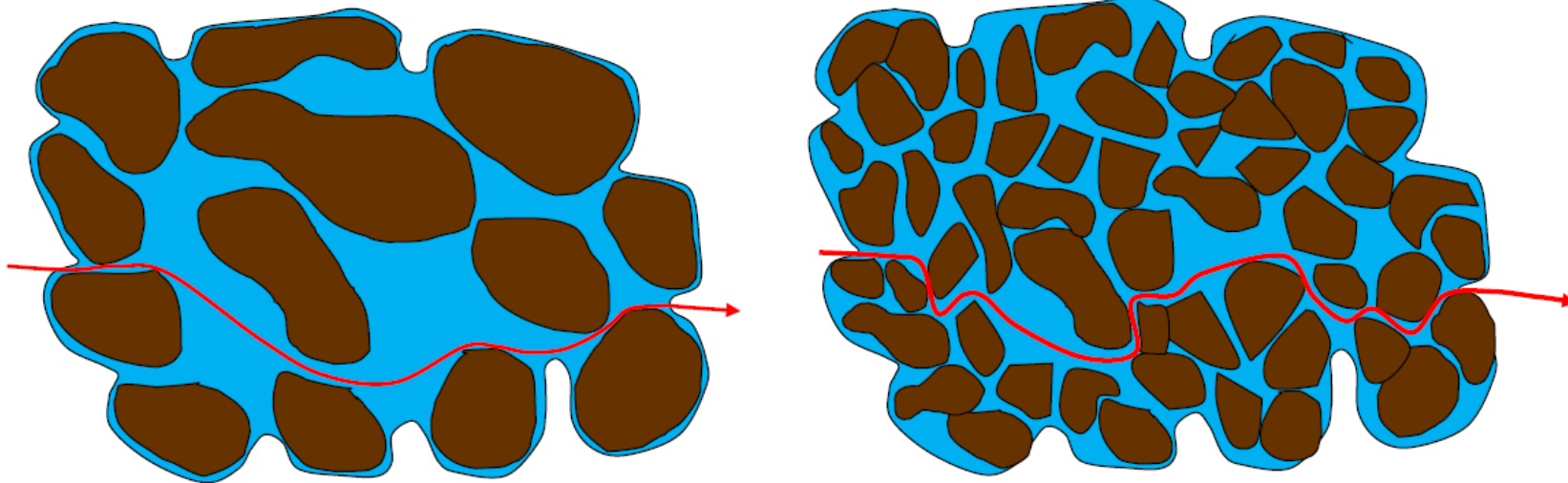
Condutividade hidráulica do solo meio saturado (K_s)

Função:

- Das propriedades do fluido (maior ou menor viscosidade)
- Da temperatura
- Das características do meio poroso
 - Textura do solo
 - Estrutura do solo
 - Presença de trincas e fraturas



tortuosidade



K_s (solos arenosos) $>$ K_s (solos argilosos) - em meio saturado

Condutividade hidráulica do solo meio saturado (K_s)

expressa a facilidade com que um fluido é transportado através de um meio poroso e combina as propriedades do fluido e do meio:

$$K_s = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (\text{m s}^{-1})$$

Onde:

k - permeabilidade intrínseca (m^2) que depende apenas do meio poroso (granulometria e estrutura)

ρ - densidade do fluido (kg. m^{-3})

g - aceleração da gravidade (m.s^{-2})

μ - viscosidade dinâmica do fluido (N s m^{-2})

Pergunta: aonde entra a temperatura?

Condutividade hidráulica do solo meio saturado (K_s)

expressa a facilidade com que um fluido é transportado através de um meio poroso e combina as propriedades do fluido e do meio:

$$K_{s(20^\circ)} = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (\text{m s}^{-1})$$

Onde:

k - permeabilidade intrínseca (m^2) que depende apenas do meio poroso (granulometria e estrutura)

ρ - densidade do fluido (kg. m^{-3})

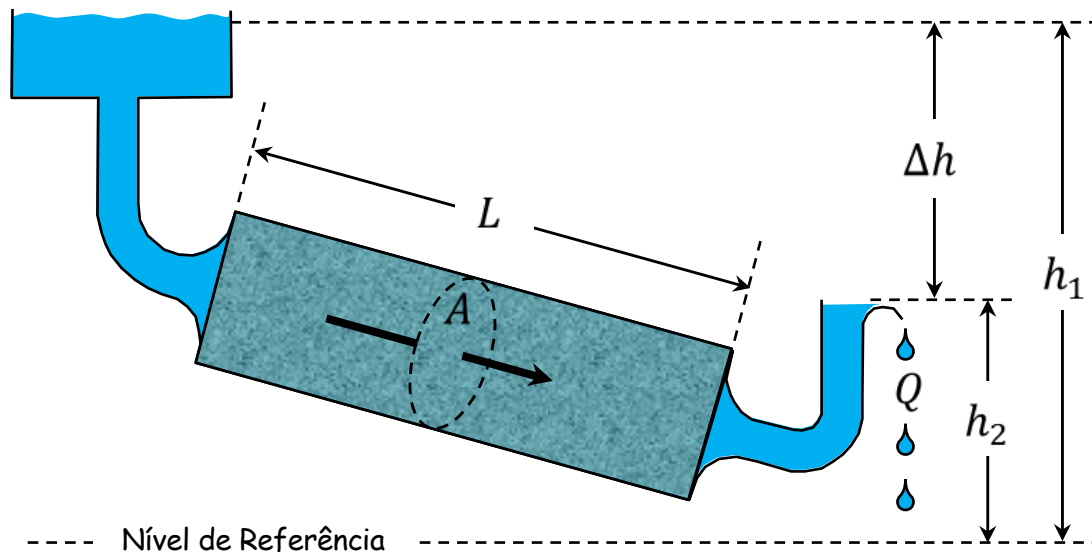
g - aceleração da gravidade (m.s^{-2})

μ - viscosidade dinâmica do fluido a 20°C (N s m^{-2})

Lei de Darcy

Henry Darcy (1856) → experimento para determinação da velocidade do fluxo da água em um meio poroso saturado

Observação → velocidade de descarga em meio poroso, por unidade de tempo, é:



- Proporcional à área da seção transversal A_x (m^2)
- Proporcional à diferença das cargas hidráulicas (h_1 e h_2) (m)
- Inversamente proporcional à distância L (m)
- Proporcional ao coef. de permeabilidade do meio (K)

Q → descarga ou vazão [L^3T^{-1}]

K → condutividade hidráulica [LT^{-1}]

A → área da seção transversal [L^2]

h → potencial ou carga hidráulica [L]

$\frac{dh}{L}$ → Gradiente hidráulico ou gradiente de potencial [LT^{-1}]

$$Q = KA \frac{(h_2 - h_1)}{L} = -KA \frac{\Delta h}{L} \quad (9)$$

Lei de Darcy

Lei de Darcy

Velocidade de Darcy

$$Q = KA \frac{(h_2 - h_1)}{L} = -KA \frac{\Delta h}{L} = Aq$$

$$\frac{Q}{A} = q = -K \frac{\Delta h}{L}$$

$$q = -K \frac{\partial h}{\partial x}$$

Velocidade de Darcy [LT⁻¹]

(10)

Para fluxo nas 3 dimensões (situação mais comum na natureza), temos:

$$q_x = -K_x \frac{\partial \psi_t}{\partial x}$$

$$q_y = -K_y \frac{\partial \psi_t}{\partial y}$$

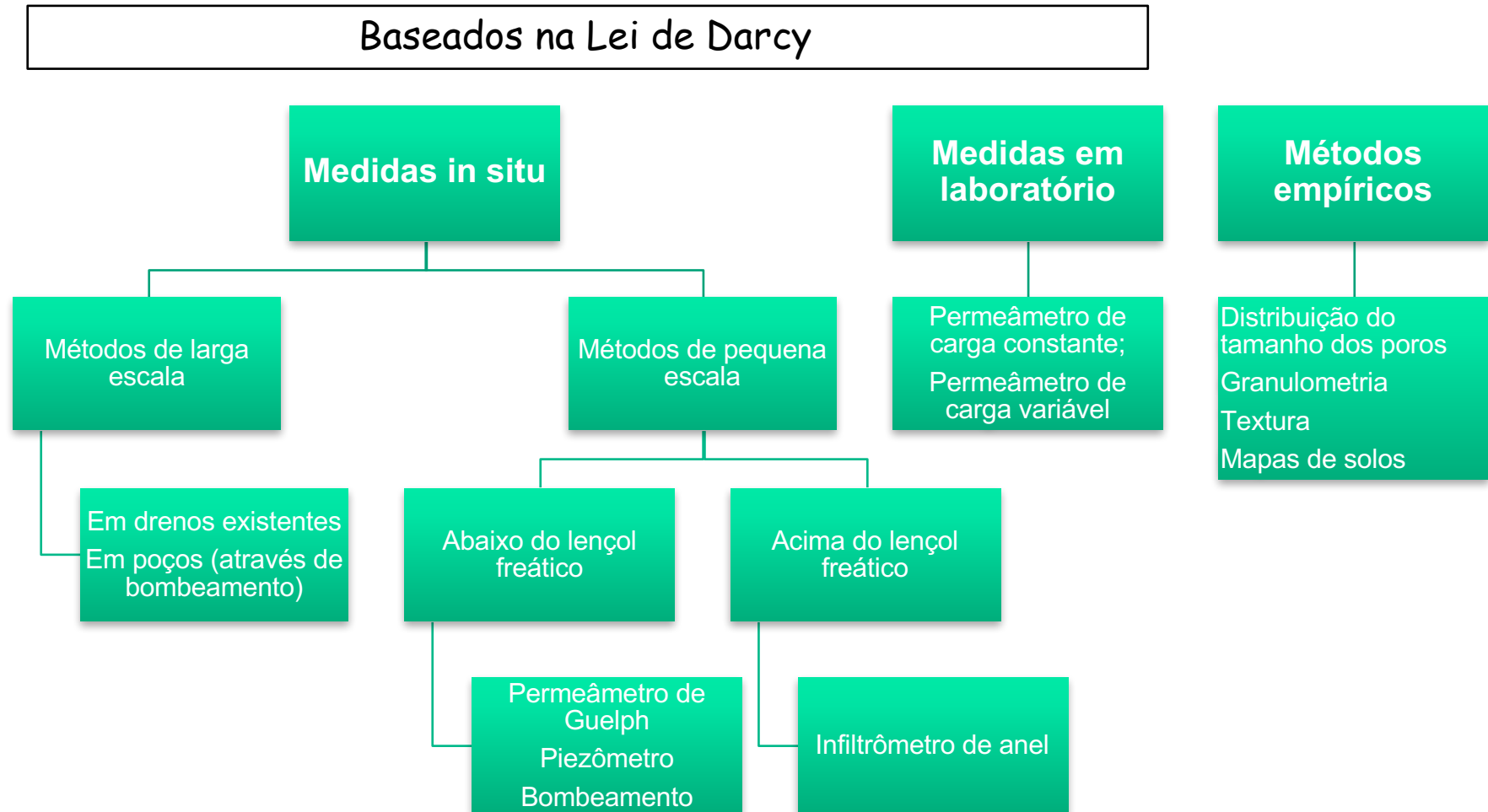
$$q_z = -K_z \frac{\partial \psi_t}{\partial z}$$

meio isotrópico - $K_x = K_y = K_z$

Condutividade hidráulica saturada K_s

Material	Permeabilidade intrínseca (cm^2)	Coefficiente de permeabilidade K (cm/s)
Argila	10^{-14} a 10^{-11}	10^{-9} a 10^{-6}
Silte, silte arenoso	10^{-11} a 10^{-9}	10^{-6} a 10^{-4}
Areia argilosa	10^{-11} a 10^{-9}	10^{-6} a 10^{-4}
Areia siltosa, areia fina	10^{-10} a 10^{-8}	10^{-5} a 10^{-3}
Areia	10^{-8} a 10^{-6}	10^{-3} a 10^{-1}
Cascalho	10^{-7} a 10^{-5}	10^{-2} a 10^0

Determinação de K_s



PERGUNTAS ??