



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA AGRÍCOLA

© **M** Plataforma Moretti

Disciplina: Fundamentos de Hidrologia, Irrigação e Drenagem

# UNIDADE 3 – Relações massa, área e volume do solo

**Prof. Jorge Luiz Moretti de Souza**

E-mail: [jmoretti@ufpr.br](mailto:jmoretti@ufpr.br)

<http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/index.htm>

# 1 O SOLO

- Ciência do solo: desenvolvimento e atividades humanas
- Constituição do solo
- Processo de formação dos solos

$$\text{Solo} = f(M, I, C, T, O)$$

## 1.1 Considerações sobre os horizontes ou perfil do solo

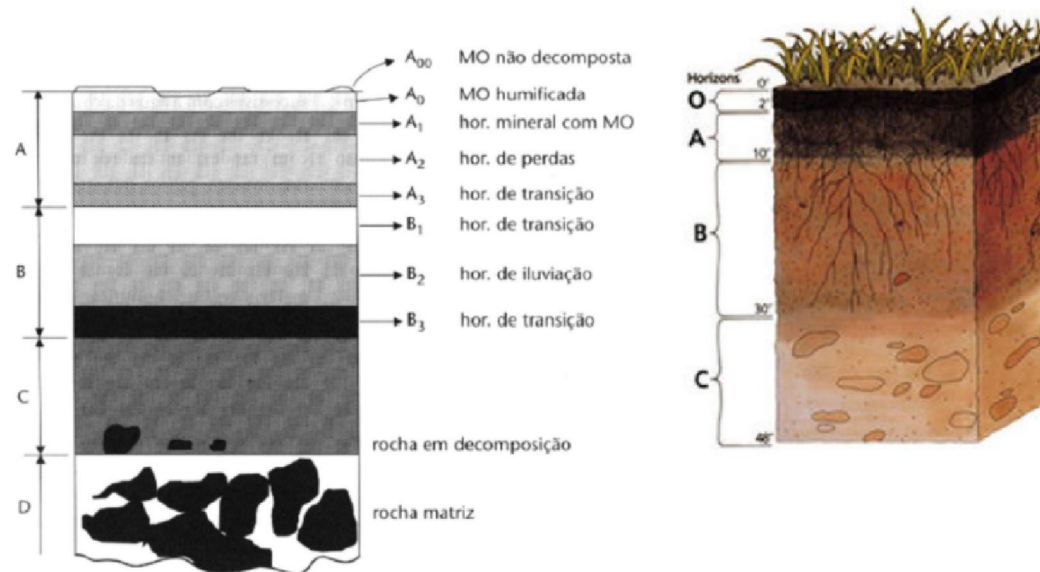


Figura 3.1 – Perfil do solo.

## 1.2 Partes que constituem um solo

### a) Parte sólida do solo:

- Primária
- Secundária

### b) Parte líquida

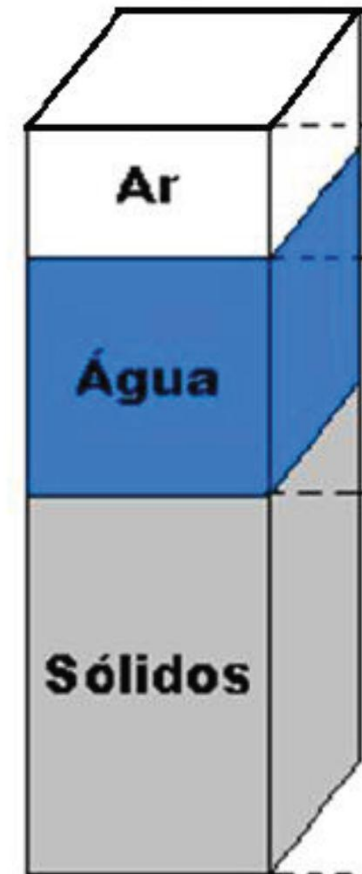
### c) Parte gasosa

## 2 FRAÇÃO SÓLIDA DO SOLO

- Varia quanto à qualidade e quantidade;

### 2.1 Textura do solo (granulometria)

- **Definição:** Proporção das frações argila, silte e areia no solo, que se diferenciam entre si pelo tamanho de suas partículas.



Figura

## 2.1 Textura do solo (granulometria)

### a) Classificação textural (**Tabela 3.1**):

- Sistema Norte Americano: Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA);
- Sistema Internacional ou Atterberg: Sociedade Internacional de Ciência do Solo (ISSS).

**Tabela 3.1.** Frações granulométricas encontradas nos Sistemas de Classificação Norte Americano (USDA) e Internacional (ISSS).

Frações	ISSS (Atterberg)	USDA
	----- Diâmetro $d$ (mm) -----	
Argila	$d \leq 0,002$	$d \leq 0,002$
Silte	$0,002 \leq d < 0,02$	$0,002 \leq d < 0,05$
Areia muito fina	-----	$0,05 \leq d < 0,1$
Areia fina	$0,02 \leq d < 0,2$	$0,1 \leq d < 0,25$
Areia média	-----	$0,25 \leq d < 0,5$
Areia grossa	$0,2 \leq d < 2,0$	$0,5 \leq d < 1,0$
Areia muito grossa	-----	$1,0 \leq d < 2,0$

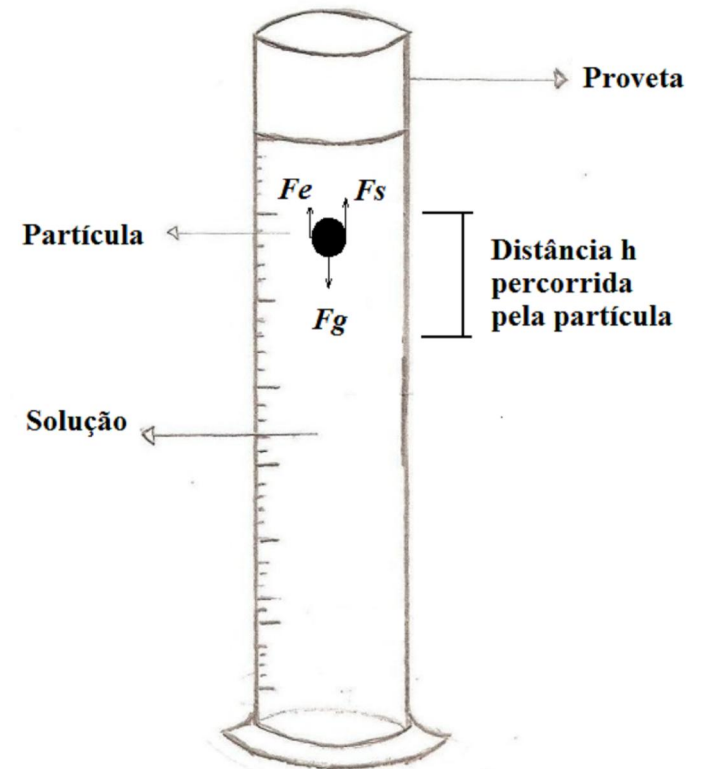
## 2.1 Textura do solo (granulometria)

### b) Determinação da textura do solo:

- Análise diretamente no campo;
- Análise em laboratório (mecânica):
  - Peneiramento;
  - Sedimentação:
    - Métodos do Densímetro;
    - Método da Pipeta;

$$t = \frac{18 \cdot h \cdot \eta}{d^2 \cdot g \cdot (\rho_P - \rho_F)}$$

Sendo:  $t$  – tempo necessário para sedimentação das partículas de diâmetro  $d$  (s);  $h$  – altura da queda da partícula (m);  $\eta$  – viscosidade dinâmica do fluido ( $\text{N s m}^{-2}$ );  $d$  – diâmetro da partícula (m);  $g$  – aceleração da gravidade ( $\text{m s}^{-1}$ );  $\rho_P$  – massa específica das partículas do solo ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $\rho_F$  – massa específica do fluido ou solução ( $\text{kg m}^{-3}$ ).



Figura

## 2.1 Textura do solo (granulometria)

### b) Determinação da textura do solo:

- Triângulo de Classificação Textural (Figura 3.2)

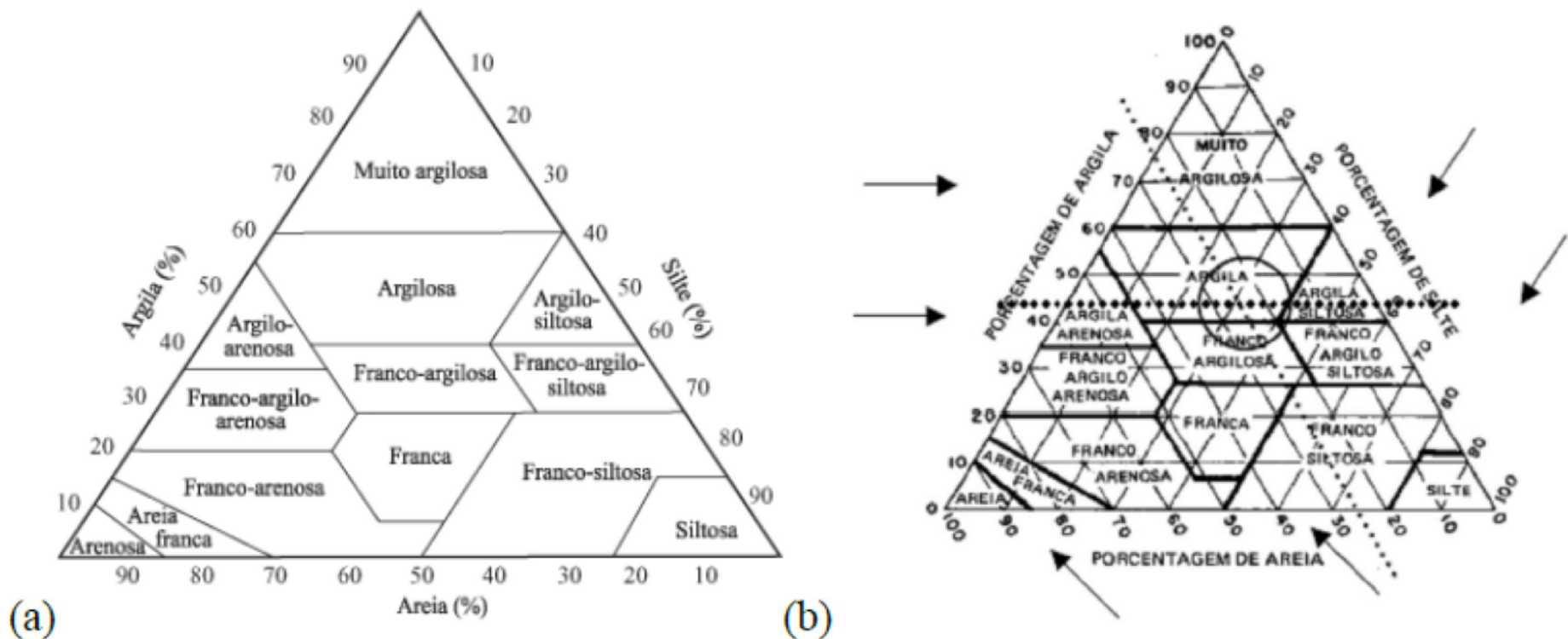


Figura 3.2 – (a) Triângulo de classificação textural de solos; e (b) Junção das três retas que determinam a classe textural do solo.

**Exemplo 3.1** – Após a análise textural de um solo verificou-se: 45% de argila; 25% de areia; e, 30% de silte. Qual é a classe textural do solo?

– A partir do Triângulo de classificação textural (Figura 3.2b):

- Traçar uma reta paralela ao ponto referente a 45% de argila;
- Traçar uma reta paralela ao teor de 25% de areia;
- A intersecção das duas retas coincide como teor de silte, no caso 30%;
- A junção das três retas determinará a classe textural do solo;
- Logo, o solo apresenta textura argilosa.

**Exemplo 3.2** – Qual é o tempo necessário para que uma suspensão a 0,1 m de profundidade fique livre de areia e “areia e silte”. Considerar:  $\rho_P = 2650 \text{ kg m}^{-3}$ ;  $\rho_F = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ ;

$d_{(\text{areia})} = 0,02 \text{ mm}$ ;  $d_{(\text{silte})} = 0,002 \text{ mm}$ ; temperatura = 20 °C (logo  $\eta = 10^{-3} \text{ N s m}^{-2}$ ).

$$t_{(\text{argila} + \text{silte})} = \frac{18 \cdot h \cdot \eta}{d^2 \cdot g \cdot (\rho_P - \rho_F)} = \frac{18 \cdot 0,1 \cdot 0,001}{(0,00002)^2 \cdot 9,8 \cdot (2650 - 1000)} = 278,3 \text{ s ou } 4,64 \text{ min.}$$

$$t_{(\text{argila})} = \frac{18 \cdot h \cdot \eta}{d^2 \cdot g \cdot (\rho_P - \rho_F)} = \frac{18 \cdot 0,1 \cdot 0,001}{(0,000002)^2 \cdot 9,8 \cdot (2650 - 1000)} = 27829 \text{ s ou } 7,73 \text{ h}$$

**Exemplo 3.3** – Na solução do exemplo anterior mediu-se a concentração de sólidos suspensos (camada de 0,10 m) por meio de densímetro, obtendo-se  $C_{(\text{silte} + \text{argila})} = 30 \text{ g L}^{-1}$  e  $C_{(\text{argila})} = 18 \text{ g L}^{-1}$ , nos instantes 4,64 minutos e 7,73 h, respectivamente. Qual é a classe textural do solo, sabendo-se que 50 g de solo foram dispersas em 1 litro de água?

A concentração inicial  $C_0 = 50 \text{ g L}^{-1}$  (areia + silte + argila), desta forma:

$$\text{Areia} = \frac{C_{(\text{areia} + \text{silte} + \text{argila})} - C_{(\text{silte} + \text{argila})}}{C_{(\text{areia} + \text{silte} + \text{argila})}} \cdot 100 = \frac{50 - 30}{50} \cdot 100 = 40\%$$

$$\text{Silte} = \frac{C_{(\text{silte} + \text{argila})} - C_{(\text{argila})}}{C_{(\text{areia} + \text{silte} + \text{argila})}} \cdot 100 = \frac{30 - 18}{50} \cdot 100 = 24\%$$

$$\text{Argila} = \frac{C_{(\text{argila})}}{C_{(\text{areia} + \text{silte} + \text{argila})}} \cdot 100 = \frac{18}{50} \cdot 100 = 36\%$$

Conforme o triângulo de classificação textural (Figura 3.2b), o solo em estudo pertence à classe “franco argilosa”.



## 2.1 Textura do solo (granulometria)

c) Distribuição das partículas em solos típicos (**Figura 3.3**);

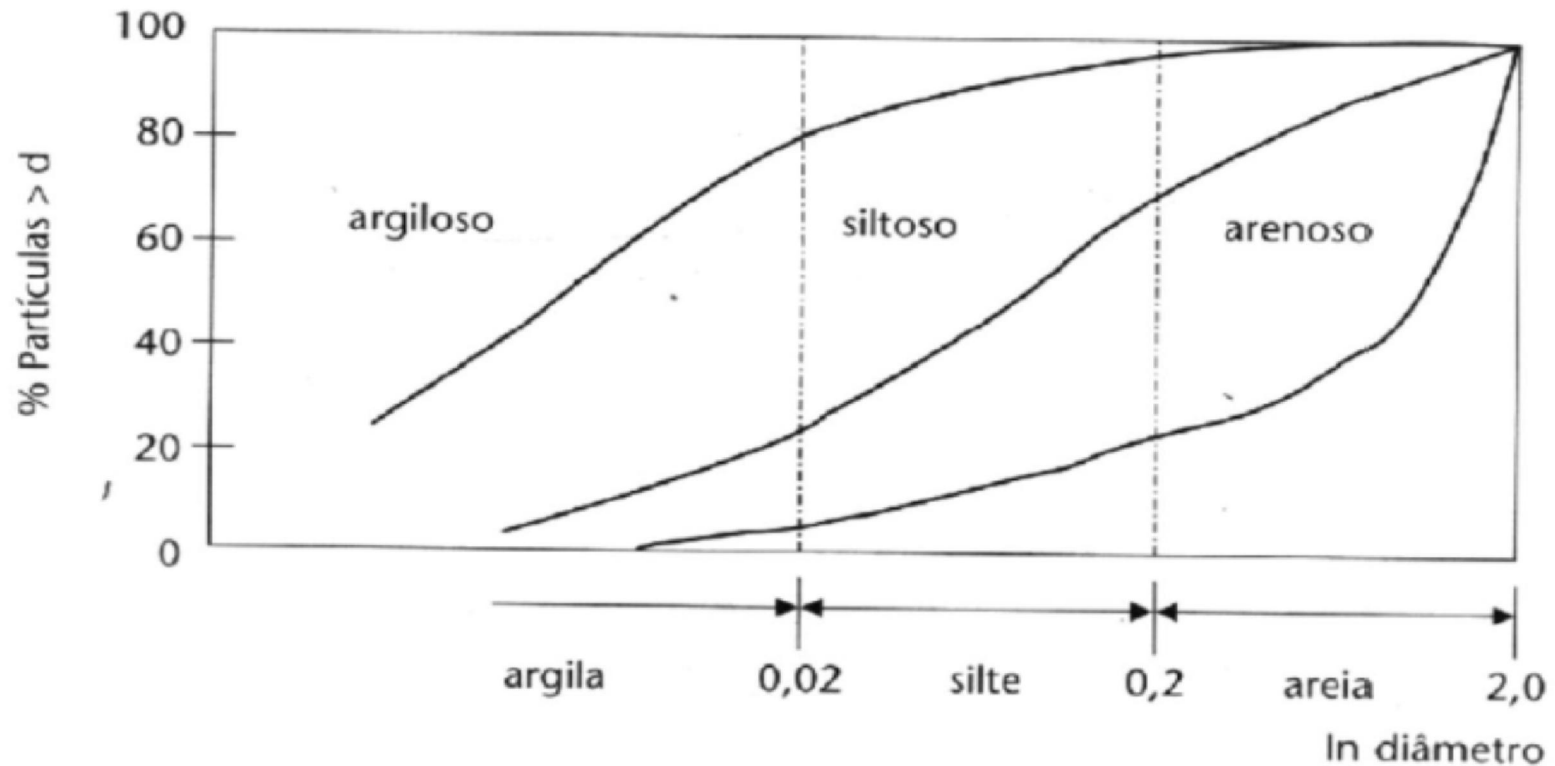


Figura 3.3 – Distribuição das partículas em três solos típicos: argiloso, siltoso e arenoso.

## 2.2 Estrutura do solo

- Conceito de estrutura do solo: Qualitativo (sem método prático)
  - Agregados: forma; tamanho; grau de desenvolvimento e estabilidade

## 2.3 Relação massa-volume do solo

- Matriz do solo: argila, silte e areia
  - Argila: efeito no solo
  - Silte e areia: efeito no solo

### a) Frações de massa e volume de um solo (Figura 3.4):

$$m_T = m_S + m_L + m_G$$

Sendo:  $m_T$  – massa total da amostra de solo (kg);  $m_S$  – massa das partículas sólidas (kg);  $m_L$  – massa da solução do solo (kg), considerada como massa de água;  $m_G$  – massa de gás ou ar do solo (kg).

$$V_T = V_S + V_L + V_G$$

Sendo:  $V_T$  – volume total da amostra de solo ( $\text{m}^{-3}$ );  $V_S$  – volume ocupado pelas partículas sólidas ( $\text{m}^{-3}$ );  $V_L$  – volume ocupado pela solução do solo ( $\text{m}^{-3}$ );  $V_G$  – volume dos gases ( $\text{m}^{-3}$ )

– Poros ou vazios do solo:

$$V_V = V_L + V_G$$

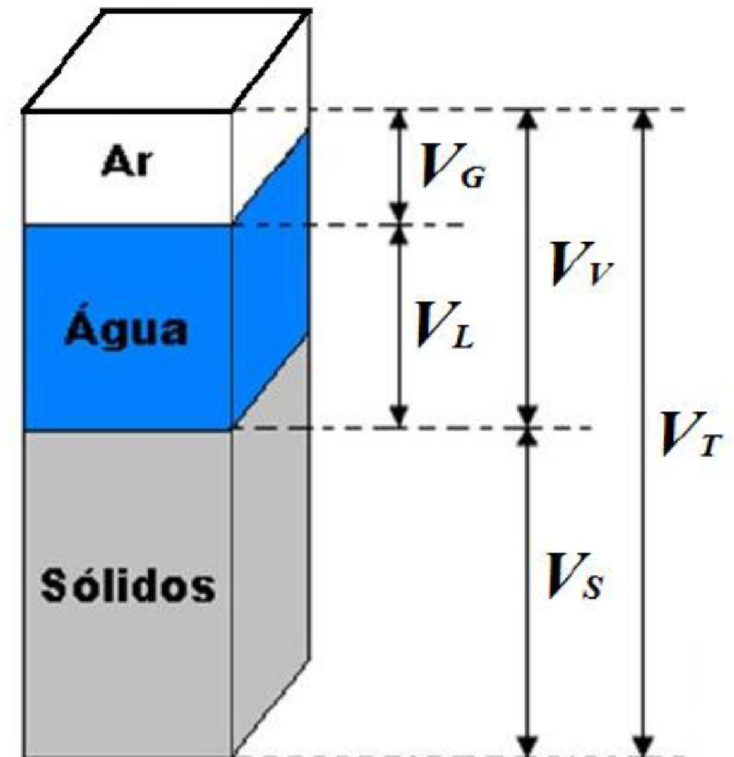


Figura 3.4 – Frações de volume de um solo.

## 2.3 Relação massa-volume do solo

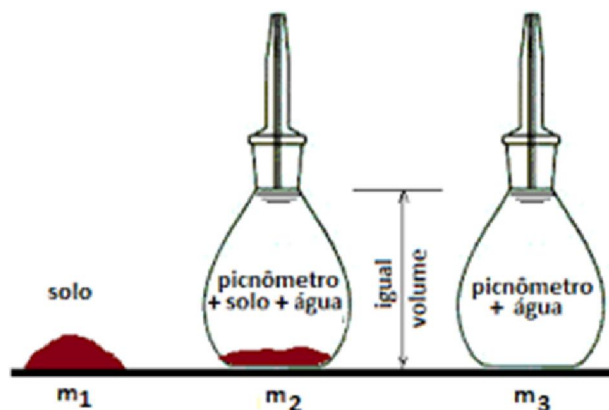
### b) Massa específica das partículas do solo (ou densidade de partículas, densidade real)

$$\rho_P = \frac{m_S}{V_S}$$

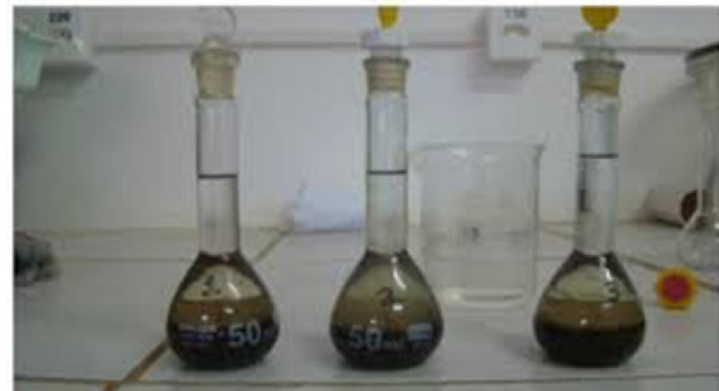
Sendo:  $\rho_P$  – massa específica das partículas do solo ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $m_S$  – massa de solo seco em estufa (kg);  $V_S$  – volume das partículas do solo ( $\text{m}^{-3}$ ).

#### ➤ Determinação:

- Método do picnômetro



- Método do balão volumétrico



#### ➤ Valor médio: $2650 \text{ kg m}^{-3}$

## 2.3 Relação massa-volume do solo

### c) Massa específica do solo (ou densidade do solo, densidade aparente, densidade

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_T}$$

Sendo:  $\rho_s$  – massa específica do solo ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $m_s$  – massa de solo seco em estufa (kg);  $V_T$  – volume total ou natural do solo ( $\text{m}^{-3}$ ).

- Permite medir o grau de compactação de um solo
- Determinação: Método do anel volumétrico, Cilindro de Uhland, Método do torrão e parafina
- Valor médio: 1.400 a 1.800  $\text{kg m}^{-3}$  para solos arenosos; 900 a 1.600  $\text{kg m}^{-3}$  para solos argilosos (tendo intervalo de variação maior)

➤ Método do anel volumétrico



➤ Cilindro de Uhland



## 2.3 Relação massa-volume do solo

### d) Porosidade total do solo (ou VTP - volume total de poros)

$$\alpha = \frac{V_V}{V_T} = \frac{V_T - V_S}{V_T} \cdot 100$$

Como  $V_S = m_S / \rho_P$  e  $V_T = m_S / \rho_S$ , tem-se que:

$$\alpha = \frac{V_V}{V_T} = \frac{V_T - V_S}{V_T} \cdot 100 = \left( \frac{V_T}{V_T} - \frac{V_S}{V_T} \right) \cdot 100 = \left( 1 - \frac{m_S \cdot \rho_S}{\rho_P \cdot m_S} \right) \cdot 100 = \left( 1 - \frac{\rho_S}{\rho_P} \right) \cdot 100$$

Sendo:  $\alpha$  – porosidade total do solo (%);  $V_V$  – volume de vazios ou poros do solo ( $\text{m}^{-3}$ );  $V_S$  – volume das partículas do solo ( $\text{m}^{-3}$ );  $V_T$  – volume total ou natural do solo ( $\text{m}^{-3}$ ).

A porosidade do solo é afetada pela compactação do solo. Assim, quanto maior  $\rho_S$  menor será  $\alpha$  (Tabela 3.2).

## d) Porosidade total do solo (ou VTP - volume total de poros)

Tabela 3.2. Massa específica do solo ( $\rho_s$ ), massa específica das partículas ( $\rho_p$ ) e porosidade total ( $\alpha$ ) para três tipos de solos.

Tipo de solo	$\rho_s$ (kg m <sup>-3</sup> )	$\rho_p$ (kg m <sup>-3</sup> )	$\alpha$ (%)
Argiloso	1200	2600	53,8
Nitroso	1000	2700	62,9
Latossolo	1100	2700	59,2

Exemplo 3.4 – Determine a massa específica das partículas ( $\rho_p$ ) e do solo ( $\rho_s$ ), e a porosidade total ( $\alpha$ ) de um torrão de solo, sabendo que:  $m_s = 0,335$  kg,  $V_s = 0,000126$  m<sup>3</sup> e  $V_T = 0,000255$  m<sup>3</sup>.

$$\rho_p = \frac{m_s}{V_s} = \frac{0,335}{0,000126} = 2658,7 \text{ kg m}^{-3}$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_T} = \frac{0,335}{0,000255} = 1313,7 \text{ kg m}^{-3}$$

$$\alpha = \frac{V_v}{V_T} = \frac{V_T - V_s}{V_T} \cdot 100 = \frac{0,000255 - 0,000126}{0,000255} \cdot 100 = 50,6\% \text{ da amostra pode ser}$$

ocupado por ar e água.

**Exemplo 3.5** – Determine a porosidade total a partir de um modelo que considere  $n^3$  esferas iguais de raio  $r$ , arranjadas no sistema cúbico, em uma caixa cúbica de lado  $L = 2nr$  (Figura 3.5).

– Volume de uma esfera:  $\frac{4\pi}{3} \cdot r^3$

– Volume das esferas dentro do sistema cúbico:  $n^3 \cdot \frac{4\pi}{3} \cdot r^3$

– Volume da caixa:  $L^3 = (2nr)^3$

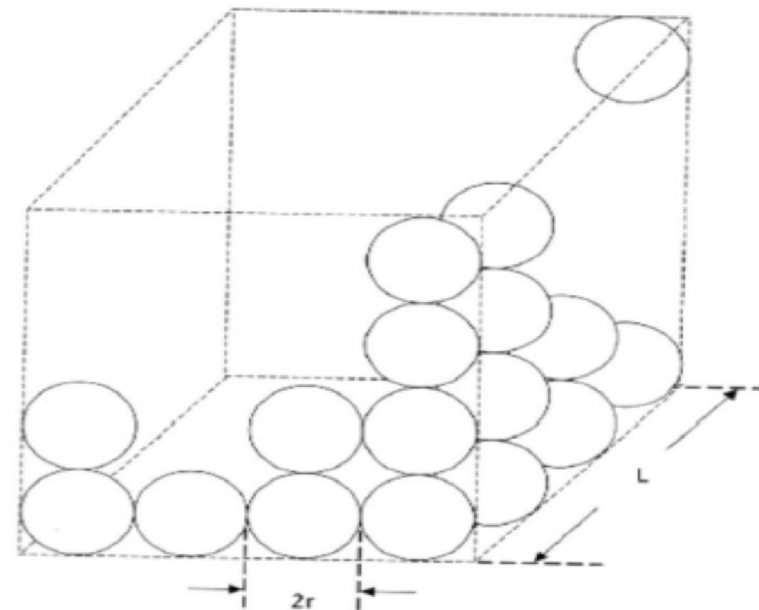
– Cálculo da porosidade:

$$\alpha = \frac{V_V}{V_T} = \frac{V_T - V_S}{V_T} \cdot 100 = \left( \frac{V_T}{V_T} - \frac{V_S}{V_T} \right) \cdot 100$$

$$\alpha = \left( 1 - \frac{V_S}{V_T} \right) \cdot 100 = \left( 1 - \frac{n^3 \frac{4\pi}{3} r^3}{(2nr)^3} \right) \cdot 100$$

$$\alpha = \left( 1 - \frac{4\pi n^3 r^3}{3(8n^3 r^3)} \right) \cdot 100 = \left( 1 - \frac{1}{6}\pi \right)$$

$$\alpha = 0,4764 \text{ ou } 47,64\%$$



**Figura 3.5** – Modelo com  $n^3$  esferas.

O modelo mostra que a porosidade é independente do número de esferas ( $n$ ) colocadas dentro da caixa, desde que se respeite o arranjo cúbico. Desta forma, verifica-se que:

– Para uma única esfera na caixa, tem-se:  $\alpha = 47,64\%$ ;

– Para um litro de  $n$  bolinhas de mesmo tamanho tem-se:  $\alpha = 47,64\%$ .



**Exemplo 3.6** – Determine a porosidade total de três tipos de solos que apresentem as seguintes condições: *i*) bem fofo, com  $\rho_S = 925 \text{ kg m}^{-3}$ ; *ii*) normal, com  $\rho_S = 1325 \text{ kg m}^{-3}$ ; *iii*) bem compactado, com  $\rho_S = 1725 \text{ kg m}^{-3}$ . A  $\rho_P = 2650 \text{ kg m}^{-3}$ .

– Solo fofo: 
$$\alpha = \left(1 - \frac{\rho_S}{\rho_P}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{925}{2650}\right) \cdot 100 = 65,09\%$$

– Solo normal: 
$$\alpha = \left(1 - \frac{\rho_S}{\rho_P}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{1325}{2650}\right) \cdot 100 = 50\%$$

– Solo compactado: 
$$\alpha = \left(1 - \frac{\rho_S}{\rho_P}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{1725}{2650}\right) \cdot 100 = 34,91\%$$

Os valores extremos de porosidade ficam em torno de 34,91% (bem fofo) a 65,09% (bem compactado).

### 3 FRAÇÃO LÍQUIDA DO SOLO

- Solução aquosa de sais minerais e substâncias orgânicas

#### 3.1 Concentração da solução do solo (**Tabela 3.3**)

Tabela 3.3. Composição da solução dos solos.

Nutriente	----- Concentração (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ) -----	
	Todos os solos	Solos ácidos
N	0,16 – 55	12,1
P	0,0001 – 1	0,007
K	0,2 – 10	0,7
Mg	0,7 – 100	1,9
Ca	0,5 – 38	3,4
S	0,1 – 150	0,5
Cl	0,2 – 230	1,1
Na	0,4 – 150	1,0

# 3 FRAÇÃO LÍQUIDA DO SOLO

## 3.2 Quantificação da fração líquida (considerando simplesmente a água do solo)

### a) Umidade gravimétrica ( $u$ )

$$u = \frac{m_L}{m_S} = \frac{m_T - m_S}{m_S}$$

Sendo:  $u$  – umidade gravimétrica (adimensional;  $\text{kg kg}^{-1}$ );  $m_L$  – massa da solução do solo (kg), sendo considerada como massa de água;  $m_T$  – massa total da amostra (kg);  $m_S$  – massa de solo seco em estufa (kg).

- Determinação: Método da estufa (padrão); Método do álcool; Método do forno de microondas; Método da frigideira; Método do umidímetro tipo Speedy

## 3.2 Quantificação da fração líquida (considerando simplesmente a água do solo)

### b) Umidade volumétrica ( $\theta$ )

$$\theta = \frac{V_L}{V_T} \quad \rightarrow \quad \text{Como: } \rho_{\text{água}} = \frac{m_L}{V_L}$$

Tem-se que:

$$\theta = \frac{V_L}{V_T} = \frac{m_L}{V_T \cdot \rho_{\text{água}}} = \frac{m_T - m_S}{V_T \cdot \rho_{\text{água}}}$$

Sendo:  $\theta$  – umidade volumétrica (adimensional;  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );  $V_L$  – volume de água na amostra ( $\text{m}^{-3}$ );  $V_T$  – volume total (natural) da amostra ( $\text{m}^{-3}$ );  $m_L$  – massa de água do solo ( $\text{m}^{-3}$ );  $\rho_{\text{água}}$  – massa específica da água ( $\text{kg m}^{-3}$ ), considerada como  $1000 \text{ kg m}^{-3}$ ;  $m_T$  – massa total da amostra (kg);  $m_S$  – massa de solo seco em estufa (kg).

- Determinação: Método do anel volumétrico, mesmo anel utilizados para medir a massa específica do solo
- Unidades:  $u$  ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) e  $\theta$  ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) são adimensionais, mas suas unidades devem ser mantidas para não confundir

## b) Umidade volumétrica ( $\theta$ )

Como o volume total (natural)  $V_T$  é mais difícil de ser medido,  $\theta$  também pode ser determinado da seguinte forma:

$$\theta = \frac{u \cdot \rho_s}{\rho_{\text{água}}}$$

pois,

$$\theta = \frac{m_L}{m_S} \cdot \frac{m_S}{V_T} \cdot \frac{1}{\rho_{\text{água}}} = \frac{m_L}{V_T \cdot \rho_{\text{água}}}, \text{ pois } 1 \text{ kg de H}_2\text{O} = \frac{1}{1000} \text{ m}^3 \text{ de H}_2\text{O}$$

Sendo:  $\theta$  – umidade volumétrica (adimensional;  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ );  $u$  – umidade gravimétrica (adimensional;  $\text{kg kg}^{-1}$ );  $\rho_s$  – massa específica do solo ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $\rho_{\text{água}}$  – massa específica da água ( $\text{kg m}^{-3}$ ), considerada como  $1000 \text{ kg m}^{-3}$ .

- A  $\rho_s$  não varia muito com o tempo, sendo um procedimento facilitador

### c) Grau de saturação ( $S$ ):

$$S = \frac{\theta}{\alpha} \cdot 100$$

Sendo:  $S$  – grau de saturação (%);  $\theta$  – umidade volumétrica (adimensional;  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );  $\alpha$  – porosidade total do solo (adimensional;  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ).

O valor de  $S$  varia entre 0 a 1, sendo que:

- Para solo saturado:  $\theta = \alpha \quad \rightarrow S = 100\%$
- Para solo seco:  $\theta = 0 \quad \rightarrow S = 0$

### d) Porosidade livre de água

$$\beta = \alpha - \theta$$

Sendo:  $\beta$  – porosidade livre de água (adimensional;  $\text{m}^3$  de ar  $\text{m}^{-3}$  de solo);  $\theta$  – umidade volumétrica (adimensional;  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );  $\alpha$  – porosidade total do solo (adimensional;  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ).

Assim, tem-se que:

- Para  $\theta = 0$  (solo seco):  $\beta = \alpha$
- Para  $\theta \neq 0$  (solo úmido): uma parcela de  $\alpha$  é ocupada com ar
- Para  $\theta = \theta_s$  (solo saturado):  $\theta = \alpha$  e  $\beta = 0$
- Solo ideal para culturas agrícolas: 50% de fração sólida e 50% de porosidade de aeração ( $\alpha$ ), tendo  $\theta = 0,25 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$  e  $\beta = 0,25 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$

**Exemplo 3.7** – Coletou-se uma amostra de solo com volume de  $150 \text{ cm}^3$ , tendo  $0,258 \text{ kg}$  de massa úmida e  $0,206 \text{ kg}$  de massa seca. Calcule  $\rho_s$ ,  $u$ ,  $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $S$  e  $\beta$ . Considere  $\rho_p = 2650 \text{ kg m}^{-3}$ .

$$\rho_s = \frac{0,206}{0,000150} = 1373,3 \text{ kg m}^{-3}$$

$$u = \frac{0,258 - 0,206}{0,206} = 0,252 \text{ kg kg}^{-1} \quad \text{ou} \quad 25,2\%$$

$$\theta = \frac{m_T - m_s}{V_T \cdot 1000} = \frac{0,258 - 0,206}{0,000150 \cdot 1000} = 0,347 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \quad \text{ou} \quad 34,7\%$$

Ou empregando a expressão:

$$\theta = \frac{u \cdot \rho_s}{1000} = \frac{0,252 \cdot 1373,3}{1000} = 0,347 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$$

Como  $u$  e  $\theta$  não são iguais é importante manter as unidades, para que elas possam ser diferenciadas

$$\alpha = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_p} = 1 - \frac{1373,3}{2650} = 0,482 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \quad \text{ou} \quad 48,2\%$$

$$S = \frac{\theta}{\alpha} = \frac{0,347}{0,482} = 0,72 \quad \text{ou} \quad 72\%$$

$$\beta = \alpha - \theta = 0,482 - 0,347 = 0,135 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \quad \text{ou} \quad 13,5\%$$

## 3.3 Armazenamento da água no solo

➤ Unidade de medida: mm, pela praticidade ([Exemplo 3.8](#))

### 3.3.1 Cálculo da água armazenada no solo

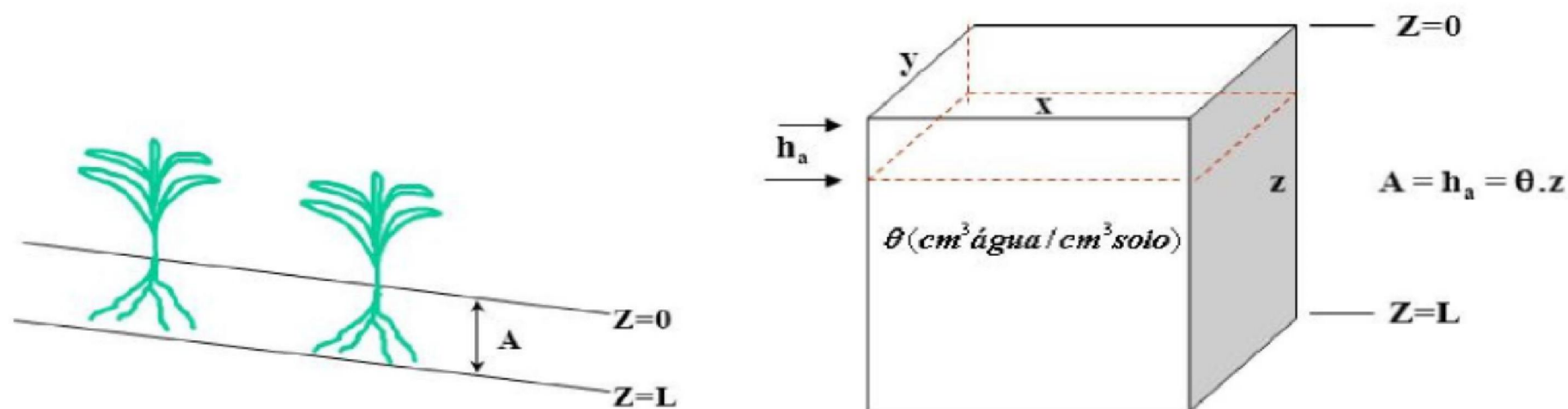


Figura 3.6 – Água armazenada no perfil de solo.

Logo, assumindo que a unidade do solo  $\theta$  não varie na horizontal, mas apresente variação na vertical, em camadas unitárias  $z_i$ , tem-se:

$$A_L = \sum_{i=1}^n \theta_i \cdot \Delta z_i = z \cdot \sum_{i=1}^n \theta_i$$

Sendo:  $A_L$  – armazenamento da água no perfil de solo até a camada  $L$  ou  $z$  (mm);  $\theta_i$  –  $i$ -ésima unidade volumétrica do solo (adimensional);  $\Delta z_i$  –  $i$ -ésima camada unitária (m).

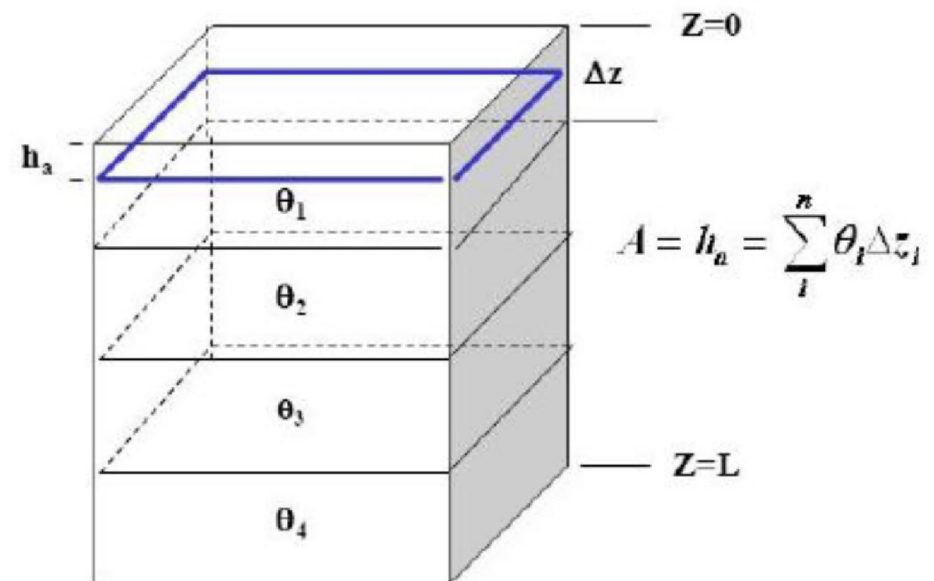


**Exemplo 3.8** – Se chove 300 L em 1 m<sup>2</sup> no ano, tem-se  $h = 300 \text{ L m}^{-2} = 300 \text{ mm}$ . Desta forma, para uma superfície unitária  $h = V$  (volume), o que é bastante interessante de se trabalhar.

**Exemplo 3.9** – Conforme os dados disposto na Tabela 3.4, determine o armazenamento da água no solo na camada 0,0-0,4 m (Figura 3.7).

**Tabela 3.4.** Dados de umidade de um perfil de solo

Camada $z_i$ (m)	Umidade volumétrica $\theta_i \text{ (m}^3 \text{ m}^{-3}\text{)}$
0,0-0,1	0,090
0,1-0,2	0,112
0,2-0,3	0,134
0,3-0,4	0,154
0,4-0,5	0,172
0,5-0,6	0,195
0,6-0,7	0,246
0,7-0,8	0,281
0,8-0,9	0,326
0,9-1,0	0,378



**Figura 3.7** – Armazenamento de água no perfil de solo com umidade heterogênea.

$$A_L = (0,09 + 0,112 + 0,134 + 0,154) \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \cdot 0,1 \text{ m}$$

$$A_L = 0,49 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \cdot 0,1 \text{ m} = 0,049 \text{ m} \text{ ou } 49 \text{ mm}$$

### 3.3.1 Cálculo da água armazenada no solo

- Armazenamento considerando o solo com infinitas camadas

$$A_L = \int_0^L \theta \cdot dz$$

Sendo:  $A_L$  – armazenamento da água no perfil de solo na camada 0-L (mm);  
 $\theta$  – unidade volumétrica do solo (adimensional);  $dz$  – incremento infinitesimal da da camada de solo.

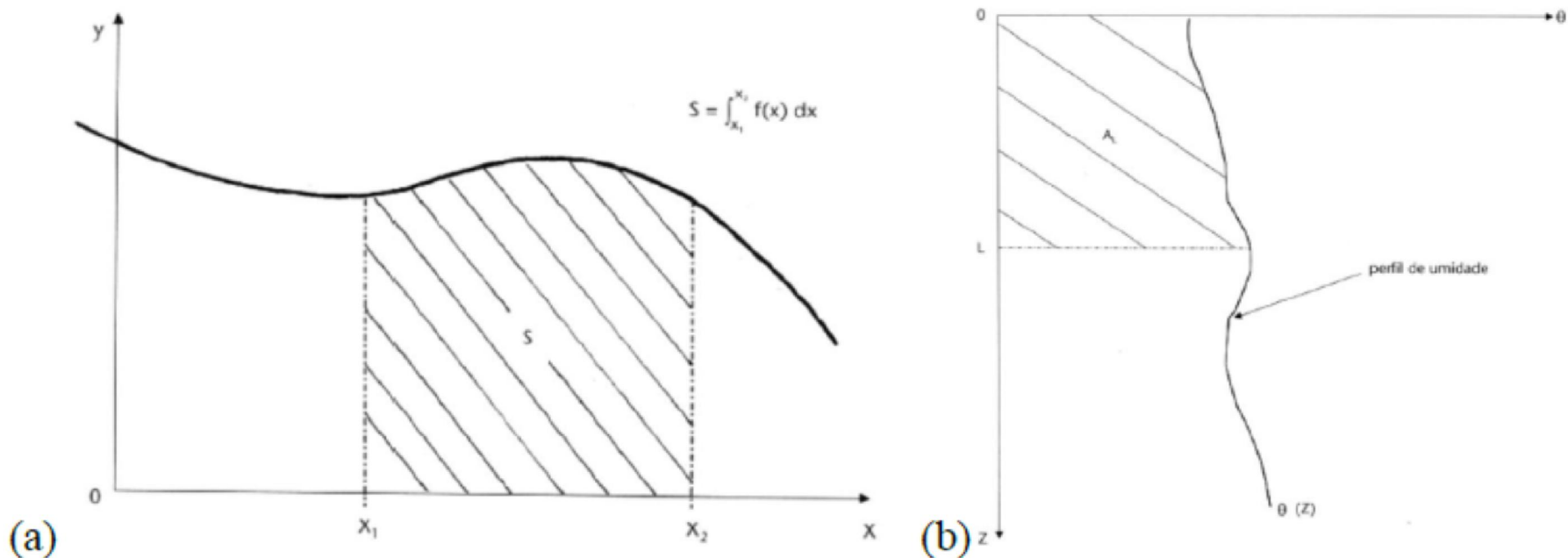


Figura 3.8 – (a) Representação cartesiana da integral definida no primeiro quadrante; e, (b) Representação cartesiana do armazenamento no quarto quadrante (facilita a visualização da umidade no perfil do solo)

### 3.3.1 Cálculo da água armazenada no solo

- Praticamente uma função  $\theta(z)$  não pode ser obtida (variação no  $t$ )
- Aproximação pelo somatório de retângulos

$$A_L = \theta_1 \cdot \Delta z + \theta_2 \cdot \Delta z + \dots + \theta_n \cdot \Delta z$$

$$A_L = (\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n) \cdot \Delta z$$

$$A_L = (\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n) \cdot \Delta z \cdot \frac{n}{n} =$$

$$\left( \frac{\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n}{n} \right) \cdot n \cdot \Delta z = \bar{\theta} \cdot L$$

- Para uma camada

$$A_{(L_2-L_1)} = \int_{L_1}^{L_2} \theta \cdot dz = \bar{\theta} \cdot (L_2 - L_1)$$

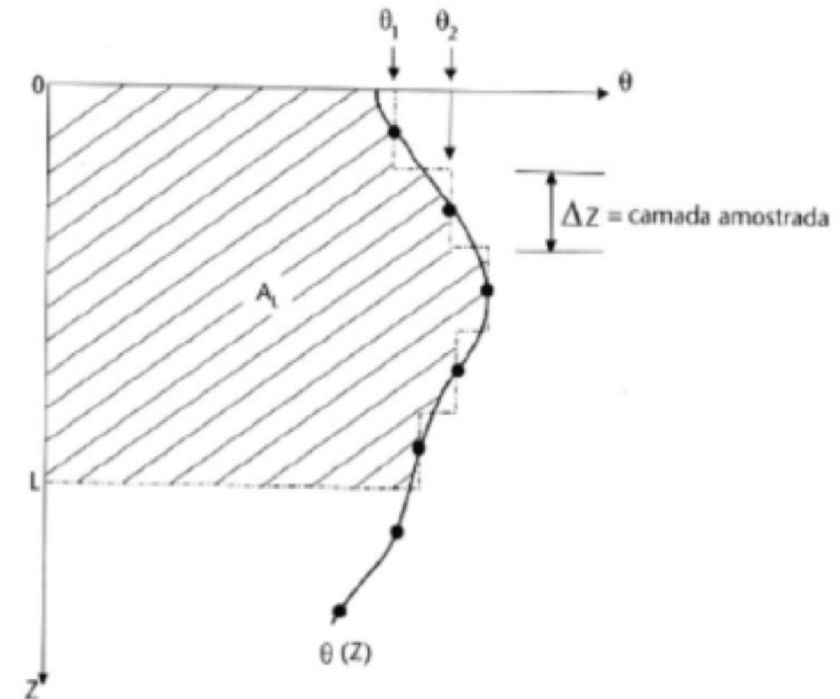


Figura 3.9 – Determinação do armazenamento com a regra da soma dos retângulos.

Sendo:  $A_L$  – armazenamento da água no perfil de solo na camada 0-L (mm);  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$  – umidades volumétrica do solo nas camadas (adimensional);  $\Delta z$  – espessura das camadas (mm);  $n$  – número de camadas (decimal);  $\bar{\theta}$  – umidade volumétrica média da camada 0-L (adimensional);  $L$  – espessura da camada (m).

**Exemplo 3.10** – Para os dados que se encontram dispostos na **Tabela 3.5**, quais sejam, camadas ( $\Delta z_i$ ), massa específica do solo ( $\rho_s$ ) e umidade gravimétrica ( $u$ ), determine: *i*) a umidade volumétrica em cada camada ( $\theta_i$ ); *ii*) o armazenamento em cada camada ( $A_{Li}$ ); *iii*) o armazenamento de água acumulado ao longo do perfil do solo ( $A_{L(0-Li)}$ ); *iv*) identifique o armazenamento de água na camada 0 a 0,45 m; e, *v*) o armazenamento de água na camada 0 a 0,90 m.

**Tabela 3.5.** Dados de  $\rho_s$  e  $u$ , e cálculo do armazenamento da água no solo nas  $i$ -ésimas camadas do perfil do solo.

Camada $\Delta z_i$ (m)	$\rho_{si}$ (kg m <sup>-3</sup> )	$u_i$ (%)	$\theta_i$ (%)	Armazenamento da água do solo		
				----- $A_{Li}$ ----- (m)	(mm)	$A_{L(0-Li)}$ (mm)
0,00 - 0,15	1000	12,3	12,3	0,0185	18,5	18,5
0,15 - 0,30	1050	13,2	13,9	0,0208	20,8	39,2
0,30 - 0,45	1100	13,8	15,2	0,0228	22,8	62,0
0,45 - 0,60	1100	15,2	16,7	0,0251	25,1	87,1
0,60 - 0,75	1150	18,6	21,4	0,0321	32,1	119,2
0,75 - 0,90	1300	16,3	21,2	0,0318	31,8	151,0
0,90 - 1,05	1300	13,7	17,8	0,0267	26,7	177,7
1,05 - 1,20	1250	13,7	17,1	0,0257	25,7	203,4

### 3.3.2 Variação da umidade e armazenamento de água no tempo

$$\theta = \theta(z, t)$$

- Importância: quantificar a evapotranspiração, infiltração, precipitação, irrigação
- Variação do armazenamento entre duas datas

$$\Delta A_L = A_L(t_j) - A_L(t_{j-1}) = [\bar{\theta}(t_j) - \bar{\theta}(t_{j-1})] \cdot L$$

Sendo:  $\Delta A_L$  – variação do armazenamento da camada 0-L, entre os tempos  $t_j$  e  $t_i$  (mm);  
 $A_L(t_i)$  e  $A_L(t_j)$  – armazenamentos da camada 0-L, nos tempo  $t_i$  e  $t_j$ , respectivamente (mm);  
 $\bar{\theta}(t_j)$  e  $\bar{\theta}(t_i)$  – umidades médias da camada 0-L nos instantes  $t_i$  e  $t_j$ , respectivamente (adimensional).

Matematicamente diz-se que  $\theta$  é função de  $t$  e  $z$ :  $\theta = \theta(t, z)$ . A variação de  $\theta$  com  $t$  é denominada derivada parcial de  $\theta$  em relação a  $t$ , mantendo-se  $z$  fixo:

$$\left( \frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_z$$

O conceito exato de derivada parcial pode ser aproximado, para efeito prático, pela relação de variações finitas de  $\theta$  e  $t$ :

$$\left( \frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_z \cong \left( \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \right)_z = \left( \frac{\theta_j - \theta_i}{t_j - t_i} \right)_z$$

Variação da umidade  $\theta_i$  e  $\theta_j$  nos tempos  $t_i$  e  $t_j$ , respectivamente, na mesma camada.

Como se procedeu com  $\theta$ , pode-se fazer para o armazenamento  $A_L$ :

$$\frac{\partial A_L}{\partial t} \cong \frac{\Delta A_L}{\Delta t} = \left( \frac{\bar{\theta}(t_j) - \bar{\theta}(t_i)}{t_j - t_i} \right) \cdot L$$

**Exemplo 3.11** – Determinar a taxa de perda de água para a cultura do milho ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) no período entre 05/01 a 17/01, conforme os dados e especificações dispostos na [Tabela 3.6](#) e [Figura 3.10](#).

**Tabela 3.6.** Dados de umidade e resultado das taxas de perda de água da cultura do milho ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) no período entre 05/01 a 17/01

Camada (m)	Umidade volumétrica ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )				Taxa de variação de $\theta$ no tempo (mm)			Variação do $A_L$ em $f(t, z)$ (mm)		
	5/jan	9/jan	13/jan	17/jan	$\left(\frac{\theta_9 - \theta_5}{9-5}\right)_z$	$\left(\frac{\theta_{13} - \theta_9}{13-9}\right)_z$	$\left(\frac{\theta_{17} - \theta_{13}}{17-13}\right)_z$	$\left(\frac{\theta_9 - \theta_5}{9-5}\right) \cdot z$	$\left(\frac{\theta_{13} - \theta_9}{13-9}\right) \cdot z$	$\left(\frac{\theta_{17} - \theta_{13}}{17-13}\right) \cdot z$
0-0,20	0,351	0,292	0,249	0,202	-0,0148	-0,0108	-0,0118	-2,9500	-2,1500	-2,3500
0,20-0,40	0,325	0,276	0,232	0,200	-0,0123	-0,0110	-0,0080	-2,4500	-2,2000	-1,6000
0,40-0,60	0,328	0,260	0,226	0,203	-0,0170	-0,0085	-0,0058	-3,4000	-1,7000	-1,1500
0,60-0,80	0,315	0,296	0,275	0,266	-0,0048	-0,0052	-0,0023	-0,9500	-1,0500	-0,4500
0,80-1,00	0,316	0,316	0,315	0,314	0,0000	-0,0003	-0,0003	0,0000	-0,0500	-0,0500
Soma	—	—	—	—	—	—	—	-9,7500	-7,1500	-5,6000

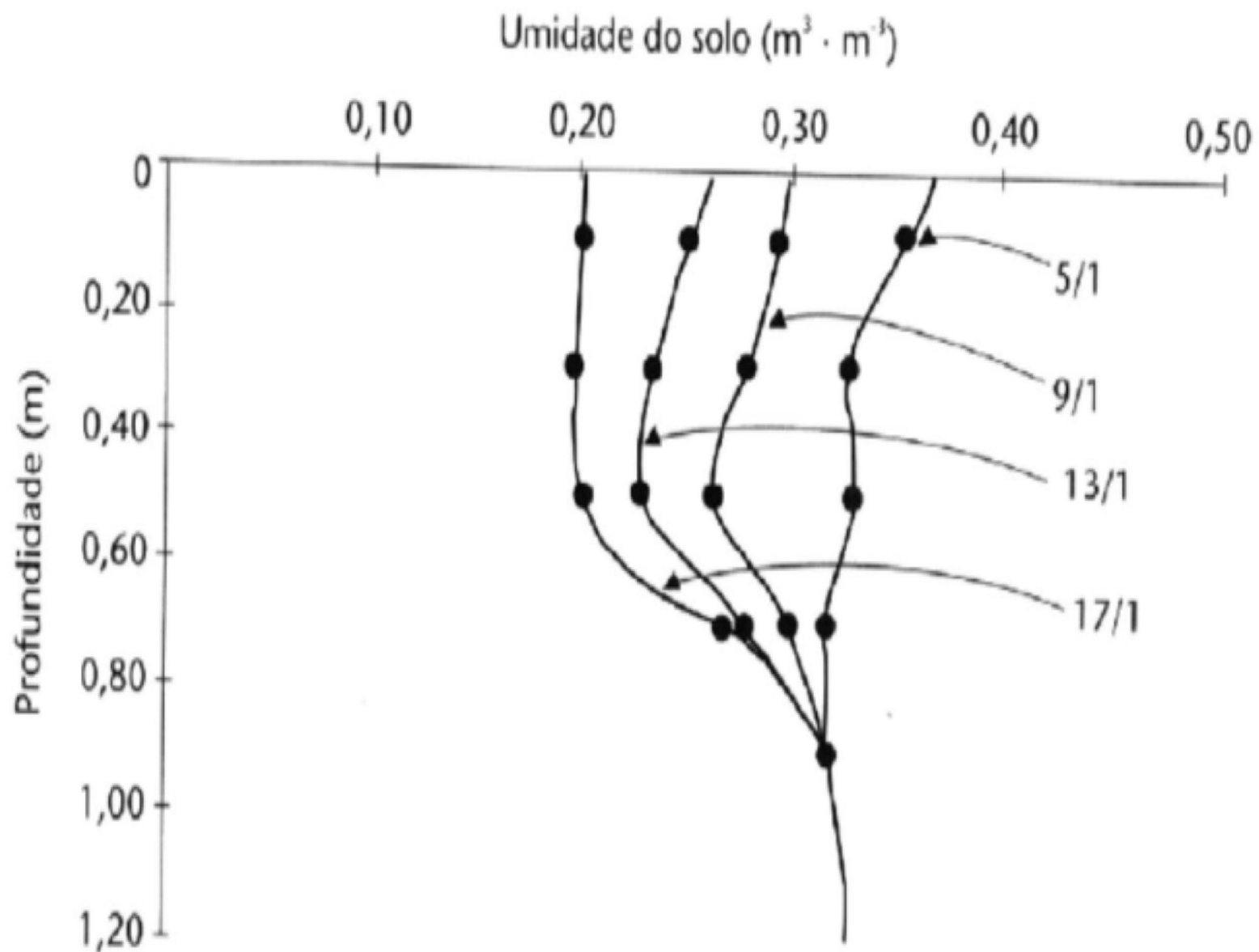


Figura 3.10 – Perfis de umidade no solo nos dias 01/jan., 9/jan., 13/jan. e 17/jan.



– Variação do armazenamento ou total de água retirada do perfil contendo uma cultura, até a camada de 1,0 m, no período entre 5 e 17 de janeiro:

$$\Delta A_{L.(5-17 \text{ dias})} = \left( \frac{\theta_9 - \theta_5}{9 - 5} \right) \cdot z \cdot 4 \text{ dias} + \left( \frac{\theta_{13} - \theta_9}{13 - 9} \right) \cdot z \cdot 4 \text{ dias} + \left( \frac{\theta_{17} - \theta_{13}}{17 - 13} \right) \cdot z \cdot 4 \text{ dias}$$

$$\begin{aligned} \Delta A_{L.(5-17 \text{ dias})} &= (-9,75 \text{ mm dia}^{-1} \cdot 4 \text{ dias}) + (-7,15 \text{ mm dia}^{-1} \cdot 4 \text{ dias}) + (-5,6 \text{ mm dia}^{-1} \cdot 4 \text{ dias}) \\ &= -90,2 \text{ mm (Obs.: O sinal negativo significa que a água foi retirada do solo)} \end{aligned}$$

– A perda média diária de água até a camada de 1,0 m, no período entre 5 e 17 de janeiro:

$$\left( \frac{\Delta A_L}{\Delta t} \right)_{5-17} = \frac{90,2 \text{ mm}}{12 \text{ dias}} = 7,52 \text{ mm dia}^{-1}$$

# 4 PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SOLO

## 4.1 Calor específico do solo

$$c_S = (1 - \alpha) \cdot c_P + \theta \cdot c_A$$

Sendo:  $c_S$  – calor específico do solo ou capacidade térmica por unidade de volume de solo ( $\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$ );  $\alpha$  – porosidade total do solo (adimensional;  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );  $c_P$  – calor específico da fração sólida ( $\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$ );  $\theta$  – umidade volumétrica (adimensional;  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );  $c_A$  – calor específico da água ( $\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$ ).

- Valores médios:
- Solos minerais:  $c_P \cong 0,4 \text{ cal cm}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- Solos orgânicos: fração sólida deve ser separada em mineral ( $c_P = 0,4 \text{ cal cm}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) e orgânica ( $c_O = 0,6 \text{ cal cm}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )

Exemplo 3.12 – Um solo mineral com  $\alpha = 49\%$  e  $u = 13\%$  possui  $\rho_s = 1,3 \text{ g cm}^{-3}$ . Determine seu calor específico.

$$c_s = (1 - \alpha) \cdot c_p + \theta \cdot c_A = 0,4 (1 - 0,49) + 0,13 \cdot 1,3 = 0,373 \text{ cal cm}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

## **BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA**

KIRKHAM, M. B. Principles of soil and plant water relations. California: Library of

Congress Cataloging-in-Publication Data, 2005. 484p.

LIBARDI, P. L. Dinâmica da água no solo. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005. 329p.

REICHARDT, K. A água em sistemas agrícolas. São Paulo: Manole, 1986. 188p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. Barueri: Manole, 2012. 500 p.

FIM