



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 4 – A água em equilíbrio no solo

Prof. Jorge Luiz Moretti de Souza

E-mail: jmoretti@ufpr.br

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

Objetivo da Unidade didática

Identificar e caracterizar as principais variáveis, propriedades e atributos envolvendo a relação água-solo-planta-atmosfera, necessários ao entendimento de como ocorre o equilíbrio da água no solo.

UNIDADE 4 – A ÁGUA EM EQUILÍBRIO NO SOLO

1 POTENCIAL TOTAL DA ÁGUA NO SISTEMA SOLO-PLANTA

- O potencial da água no sistema solo-água (ψ) é a capacidade do mesmo de executar certo trabalho, em relação à algum estado de referência (ψ_o).

$$\Delta\psi = \int_{\psi_o}^{\psi_i} d\psi = \psi \Big|_{\psi_o}^{\psi_i}$$

$$\Delta\psi = \psi_i - \psi_o = \psi_i - 0 = \psi_i$$

$$\psi_i = \underbrace{\int_{T_o}^{T_i} -s dT}_{\psi_T} + \underbrace{\int_{P_o}^{P_i} v dP}_{\psi_P} + \underbrace{\int_0^z g dz}_{\psi_g} + \underbrace{\int_{n_o}^{n_i} \mu_a dn_a}_{\psi_{os}} + \underbrace{\int_{\theta_s}^{\theta_i} \omega d\theta}_{\psi_m}$$

$$\psi_i = \psi_T + \psi_P + \psi_g + \psi_{os} + \psi_m$$

Sendo: $\Delta\psi$ – diferença de potencial entre dois sistemas; ψ_i – potencial total da água no sistema solo no estado i ; ψ_o – potencial total da água no sistema de referência, ou estado padrão, em que a água encontra-se nas condições normais de temperatura, pressão, livre de sais minerais e solutos, interface líquido-gás-planta, situado em dado referencial de posição; ψ_T – potencial térmico; ψ_P – potencial de pressão; ψ_g – potencial gravitacional; ψ_{os} – potencial osmótico; ψ_m – potencial matricial.

1.1 Componentes do potencial total

a) Potencial térmico (ψ_T)

b) Demais componentes do potencial total da água ψ_i no estado i

- Potencial de pressão (ψ_p)
- Potencial gravitacional (ψ_g)
- Potencial osmótico (ψ_{os})
- Potencial matricial (ψ_m)

1.2 Unidade de medida dos potenciais

- Energia por unidade de massa (J Kg^{-1});
- Energia por unidade de volume (Pa ou N m^{-2}); e,
- Energia por unidade de peso (m).

Exemplo 4.1 – A pressão de 1 atm corresponde à coluna de 10,33 m de água ou 760 mm de mercúrio.

Exemplo 4.2 – Sabe-se que 0,01 kg de água se encontram em um ponto no solo, distante 10 cm do referencial de posição. Determine: *i)* Qual é a sua energia potencial? *ii)* Qual é a sua energia por unidade de massa, volume e peso?

– Energia potencial (E):

$$E = m \cdot g \cdot h \quad \rightarrow \quad E = 0,01 \text{ kg} \cdot 9,8 \text{ m s}^{-2} \cdot 0,1 \text{ m} = 0,0098 \text{ J}$$

– Energia por unidade de massa:

$$\frac{E}{m} = \frac{m \cdot g \cdot h}{m} = g \cdot h \quad \rightarrow \quad E = 9,8 \text{ m s}^{-2} \cdot 0,1 \text{ m} = 0,98 \text{ J kg}^{-1}$$

– Energia por unidade de volume:

$$\frac{E}{V} = \frac{m \cdot g \cdot h}{V}$$

Como $\rho = m / V$

$$E = \rho_{\text{água}} \cdot g \cdot h \quad \rightarrow \quad E = 1000 \text{ kg m}^{-3} \cdot 9,8 \text{ m s}^{-2} \cdot 0,1 \text{ m} = 980 \text{ Pa}$$

– Energia por unidade de peso:

$$\frac{E}{m \cdot g} = \frac{m \cdot g \cdot h}{m \cdot g} = h \quad \rightarrow \quad E = 0,1 \text{ m ou } 10 \text{ cm}$$

2 DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES DO POTENCIAL TOTAL (ψ)

2.1 Componente de pressão (ψ_p) do potencial total

$$\psi_P = \int_{P_o}^{P_i} v \, dP$$

$$\psi_P(A) = \int_{P_o}^{P_i} v \, dP = v \cdot \int_{P_o}^{P_A} dP = v \cdot (P)_{P_o}^{P_A} = v \cdot (P_A - P_o)$$

Como a pressão P_o do padrão é tomada como nula ($P_o = 0$),

$$\psi_p = v \cdot P_A$$

Como o valor do volume específico da água $v = 1 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$, tem-se:

$$\psi_p = v \cdot P_A = 1 \cdot P_A = P_A = m \cdot g \cdot h$$

Exemplo 4.3 – Determinar o potencial de pressão (ψ_p) nos pontos A e B (Figura 4.1), em um recipiente contendo solo saturado com água.

- O $\psi_p(A) = 0$, pois está na superfície do solo, submetido à pressão atmosférica;
- O $\psi_p(B)$ encontra-se no solo saturado e a pressão hidrostática da água se transmite através dos poros do solo (material poroso rígido), assim:

$$\frac{\text{Energia}}{\text{Massa}} : \psi_p(B) = g \cdot h_B = 9,8 \cdot 0,05 = 0,49 \text{ J kg}^{-1}$$

$$\frac{\text{Energia}}{\text{Volume}} : \psi_p(B) = \rho_{\text{água}} \cdot g \cdot h_B = 1000 \cdot 9,8 \cdot 0,05 = 490 \text{ Pa ou } 0,49 \text{ kPa}$$

$$\frac{\text{Energia}}{\text{Peso}} : \psi_p(B) = h_B = 5 = 0,05 \text{ m ou } 5 \text{ cm H}_2\text{O}$$

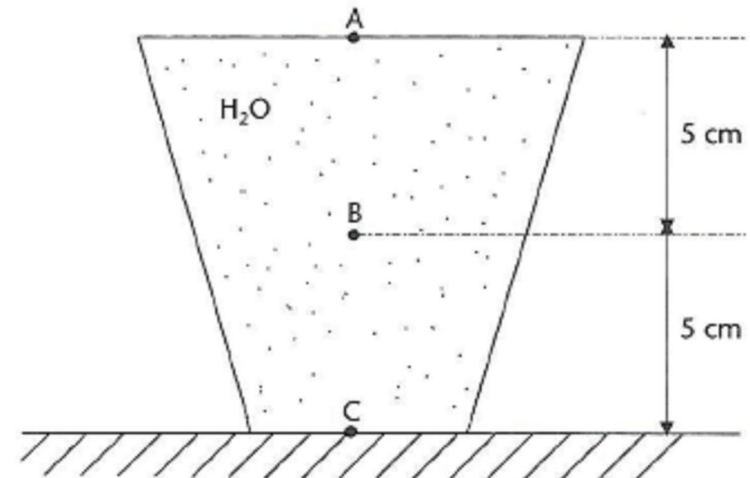


Figura 4.1 – Recipiente contendo solo saturado em água.

2.2 Componente gravitacional (ψ_g) do potencial total

- O ψ_g está sempre presente, sendo a própria energia potencial do campo gravitacional ($m \cdot g \cdot z$)

$$\frac{\text{Energia}}{\text{Massa}}: \psi_g = \int_0^z \frac{m \cdot g}{m} dz = g \cdot \int_0^z dz = g \cdot (z - 0) = g \cdot z, \text{ em J kg}^{-1}$$

$$\frac{\text{Energia}}{\text{Volume}}: \psi_g = \int_0^z \frac{m \cdot g}{V} dz = \int_0^z (\rho_{\text{água}} \cdot g) dz = (\rho_{\text{água}} \cdot g) \cdot (z - 0) = \rho_{\text{água}} \cdot g \cdot z, \text{ em Pa}$$

$$\frac{\text{Energia}}{\text{Peso}}: \psi_g = \int_0^z \frac{m \cdot g}{m \cdot g} dz = (z - 0) = z, \text{ em m}$$

- A importância ψ_g para o ψ depende dos demais potenciais:
- Solo saturado ou próximo a saturação: ψ_g tem maior peso no potencial total ψ ;
 - Solo mais seco: ψ_g perde importância para o potencial matricial (ψ_m).

Exemplo 4.4 – Baseando-se na “energia / peso”, determine os potenciais de pressão dos pontos *A*, *B* e *C* indicados na Figura 4.2.

$$\Psi_p (A) = 10 \text{ cm H}_2\text{O}$$

$$\Psi_p (B) = 10 + 20 = 30 \text{ cm H}_2\text{O}$$

$$\Psi_p (C) = 10 + 20 + 20 = 50 \text{ cm H}_2\text{O}$$

Exemplo 4.5 – Baseando-se na “energia / peso”, determinar o potencial gravitacional (ψ_g) nos pontos *A*, *B* e *C* da Figura 4.2, considerando o plano de referência ($z = 0$) que passa pelo ponto *B*:

$$\Psi_g (A) = + z_A = 20 \text{ cm H}_2\text{O}$$

$$\Psi_g (B) = z_B = 0$$

$$\Psi_g (C) = - z_C = -20 \text{ cm H}_2\text{O}$$

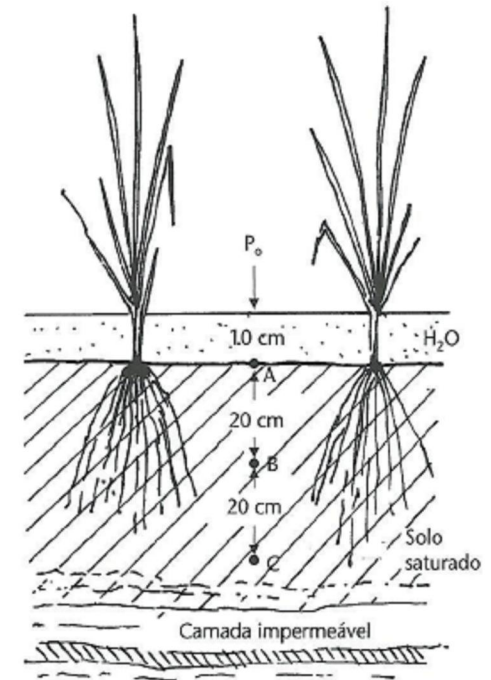


Figura 4.2 – Arroz irrigado no sistema por inundação

Exemplo 4.6 – A partir de uma esponja saturada disposta em uma bandeja, descreva os aspectos importantes sobre o potencial gravitacional, conforme posições 1 a 4 da **Figura 4.3**:

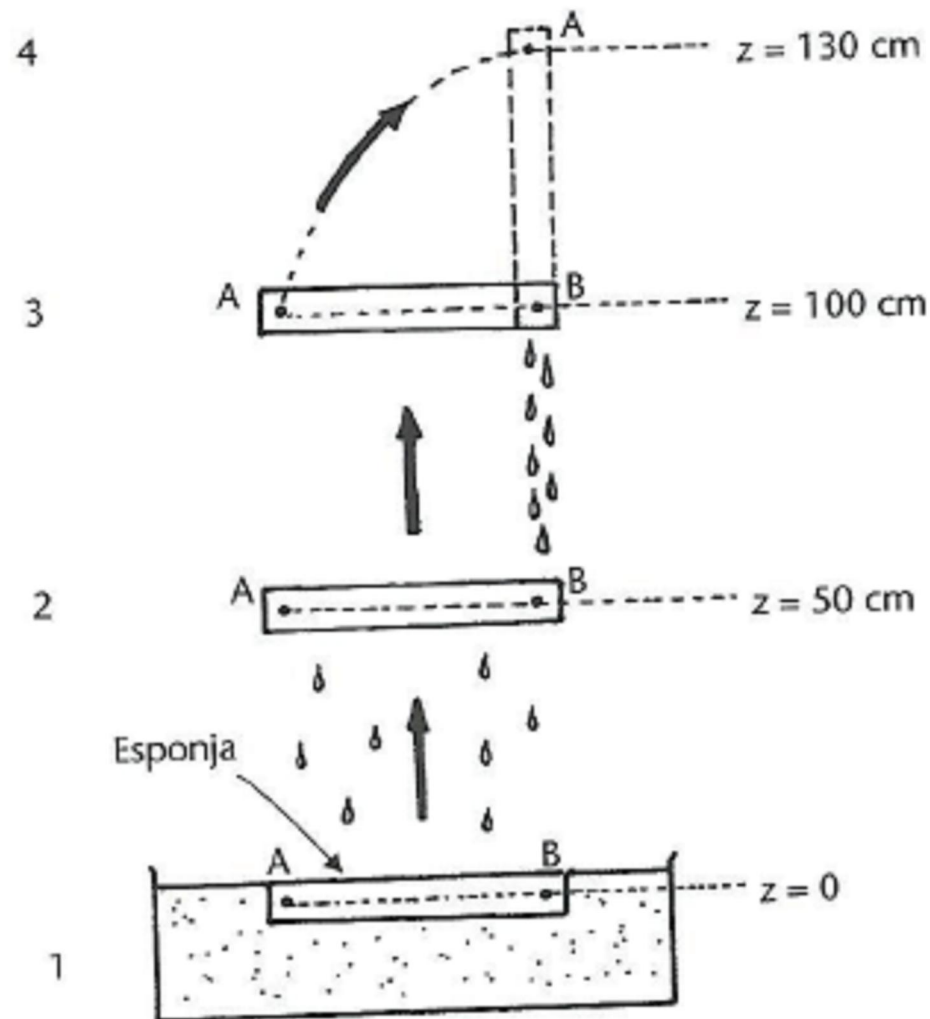


Figura 4.3 – Esponja saturada disposta em diferentes posições.

2.3 Componente osmótica (ψ_{os}) do potencial total

$$d\psi_{os} = \mu_a dn_a$$

Sendo: $d\psi_{os}$ – variação do potencial osmótica da solução; dn_a – variação de moles de água; μ_a – potencial químico da água dada a presença de solutos.

a) Medida do potencial osmótico (ψ_{os})

- Osmômetro (Figura 4.4)

- Inicialmente a solução se encontra sob a atmosférica (P_o);
- Com a passagem da água pela membrana semipermeável a pressão torna-se:

$$P_o + \rho_{\text{solução}} g h$$

Sendo: $\rho_{\text{solução}}$ – massa específica da solução.

- Na condição de equilíbrio,

$$\rho_{\text{solução}} g h$$

é uma medida da pressão osmótica da solução.

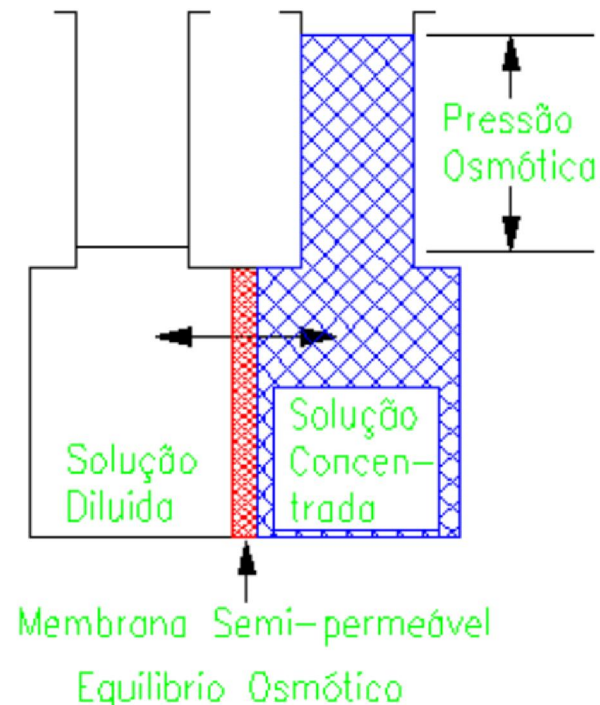


Figura 4.4 – Esquema de um osmômetro

b) Estimativa do potencial osmótico (ψ_{os})

$$\psi_{os} = \int_{n_o}^{n_1} \mu_a \, dn_a = \int_0^{P_{os}} v \, dP = v \cdot (P_{os} - 0) = P_{os} = -R \cdot T \cdot a$$

Sendo: ψ_{os} – potencial osmótico da solução (Pa); n_o – número de moles da água pura no elemento de volume padrão; n_1 – número de moles da solução do solo; v – volume específico da solução do solo (considera-se $v = 1 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$); P_{os} – pressão osmótica da solução do solo (Pa); R – constante universal dos gases ($\text{Pa m}^3 \text{ K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$), sendo aproximadamente igual $8,314472 \text{ Pa m}^3 \text{ K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$; T – temperatura absoluta (K); a – atividade da solução, que no caso de soluções diluídas pode ser substituída pela concentração C da solução (mol m^{-3}).

Exemplo 4.7 – Determinar o potencial osmótico ψ_{os} das soluções diluídas de: *i*) Sacarose ($C = 10^3 \text{ mol m}^{-3}$); e, *ii*) Cloreto de cálcio ($C = 30 \text{ mol m}^{-3}$), ambas na temperatura de 27°C .

– Para a sacarose:

$$\begin{aligned} \psi_{os} &= 8,314472 \text{ Pa m}^3 \text{ K}^{-1} \cdot (27 + 273) \text{ K} \cdot 10^3 \text{ mol m}^{-3} = -2,4943 \cdot 10^6 \text{ Pa} \\ &\text{ou } -2,4943 \cdot 10^6 \text{ Pa} / 101325 = -24,62 \text{ atm} \quad \text{ou } -246,2 \text{ m.c.a} \end{aligned}$$

– Cloreto de cálcio:

$$\begin{aligned} \psi_{os} &= 8,314472 \text{ Pa m}^3 \text{ K}^{-1} \cdot (27 + 273) \text{ K} \cdot 30 \text{ mol m}^{-3} = -7,483 \cdot 10^4 \text{ Pa} \\ &\text{ou } -7,483 \cdot 10^4 \text{ Pa} / 101325 = -0,738 \text{ atm} \quad \text{ou } 7,38 \text{ m.c.a} \end{aligned}$$

2.4 Componente matricial (ψ_m) do potencial total

$$\psi_m = \int_{\theta_s}^{\theta_i} \omega d\theta$$

2.4.1 Capilaridade e adsorção

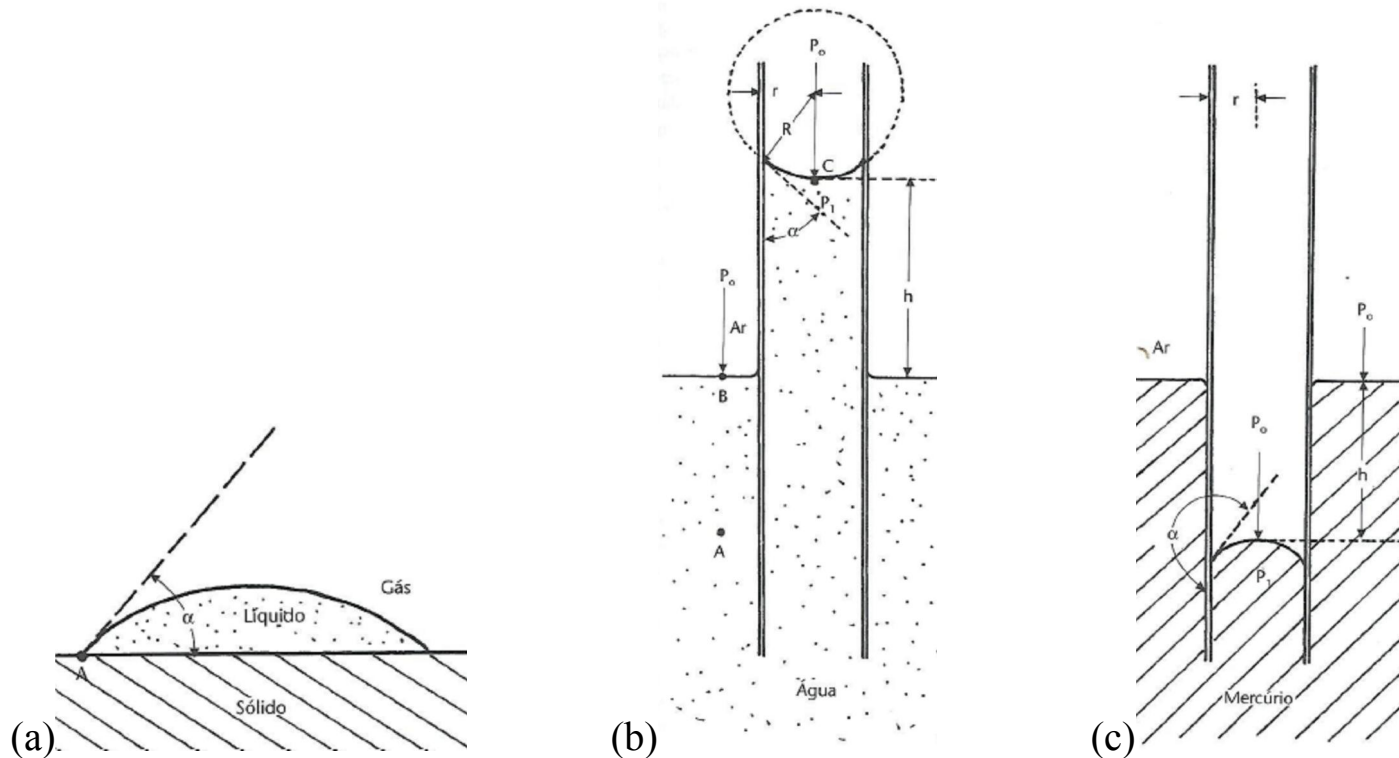


Figura 4.5 – (a) Ângulo de contato entre interfaces líquido-sólido-gás; (b) Capilar imerso em água; e, (c) Capilar imerso em mercúrio.

2.4.1 Capilaridade e adsorção

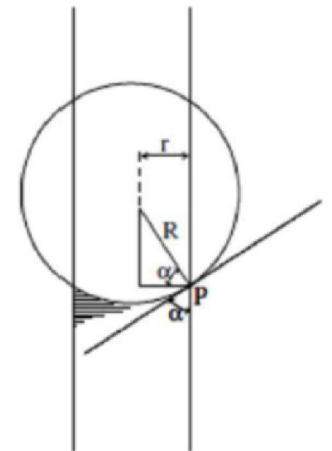
$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \alpha}{\rho \cdot g \cdot r}$$

Sendo: h – altura da ascensão capilar do líquido no menisco dentro do tubo capilar (m); σ – tensão superficial do líquido (N m^{-1}); α – ângulo de contato (graus; varia de 0° a 90° ; Figura 4.6); ρ – massa específica do líquido (kg m^{-3}); g – aceleração da gravidade (m s^{-2}); r – raio do tubo capilar (m).

Exemplo 4.8 – Um capilar de raio $r = 0,1 \text{ mm}$ é inserido em uma superfície plana de água. Qual a altura atingida pela água dentro do tubo? A água encontra-se a 30°C ($\sigma_{\text{água}} = 0,0711 \text{ kg s}^{-2}$, $\rho_{\text{água}} = 1,0003 \text{ g cm}^{-3}$) e o ângulo de contato (α) com o material do tubo capilar tem 5° .

$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \alpha}{\rho \cdot g \cdot r} = \frac{2 \cdot 0,0711 \cdot \cos 5}{1003 \cdot 9,81 \cdot 10^{-4}} = 0,1439 \text{ m ou } 14,4 \text{ cm}$$

- Considerando $r = 0,01 \text{ mm}$ $\rightarrow h = 144 \text{ cm}$
- Considerando $r = 0,001 \text{ mm}$ $\rightarrow h = 1440 \text{ cm}$



2.4.1 Capilaridade e adsorção

Exemplo 4.9 – Para um torrão de solo saturado em água, aplica-se sobre ele a pressão P de 0,3 atm. Considerando o solo constituído de capilares de raio r , após o equilíbrio: *i*) Em quais poros a água foi retirada? e, *ii*) Quais poros continuam com água? Dados: $T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\sigma_{\text{água}} = 0,0711\text{ kg s}^{-2}$, $\rho_{\text{água}} = 1,0003\text{ g cm}^{-3}$) e $\alpha = 5^{\circ}$.

$$P = \rho \cdot g \cdot h = 0,3\text{ atm}$$

Tem-se que: $1\text{ atm} = 10,33\text{ m.c.a}$

Logo, a pressão por unidade de peso será,

$$h = 0,3 \cdot 10,33\text{ m.c.a} = 3,099\text{ m}$$

$$r = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \alpha}{\rho \cdot g \cdot h} = \frac{2 \cdot 0,0711 \cdot \cos 5}{1003 \cdot 9,81 \cdot 3,099} = 4,6 \cdot 10^{-6}\text{ m} \quad \text{ou} \quad 4,6 \cdot 10^{-4}\text{ cm}$$

Obs.: Potencial matricial (ψ_m):

- Solos secos e saturados;
- Solos argilosos e arenosos.

2.4.2 Curva característica da água no solo (CCAS) ou curva de retenção (CRAS)

$$\psi_m \text{ vs } \theta$$

➤ Principais aspectos a serem evidenciados:

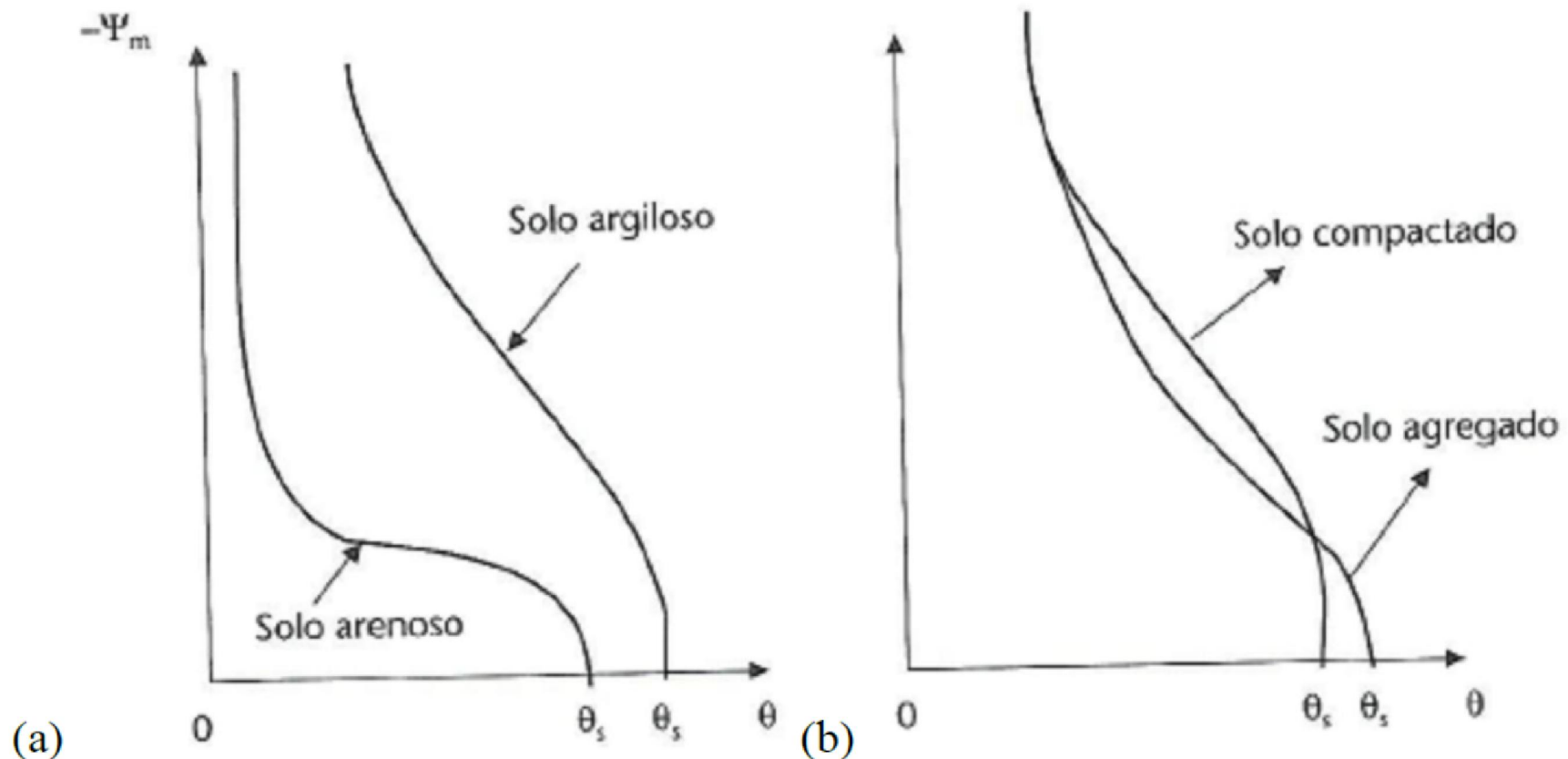


Figura 4.7 – Curva de retenção de água para solos: (a) argiloso e arenoso; e, (b) compactado e agregado.

2.4.2.1 Histerese

- Determinação da CCAS:
 - Por “secamento”
 - Por “molhamento”

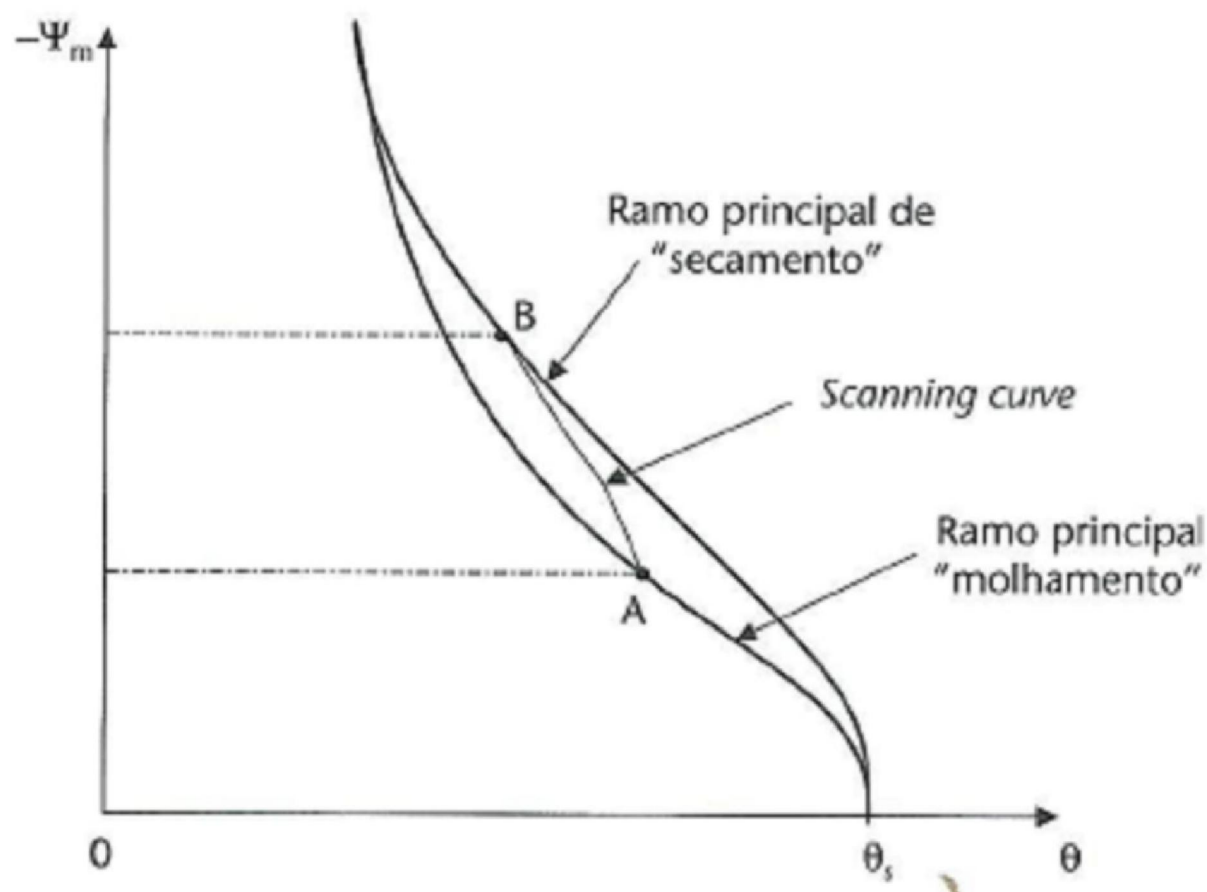


Figura 4.8 – Histerese da curva de retenção da água no solo.

2.4.2.2 Medidas do potencial da água no solo para determinação da CCAS

a) Funil de placa porosa ou mesa de tensão

b) Câmeras de pressão

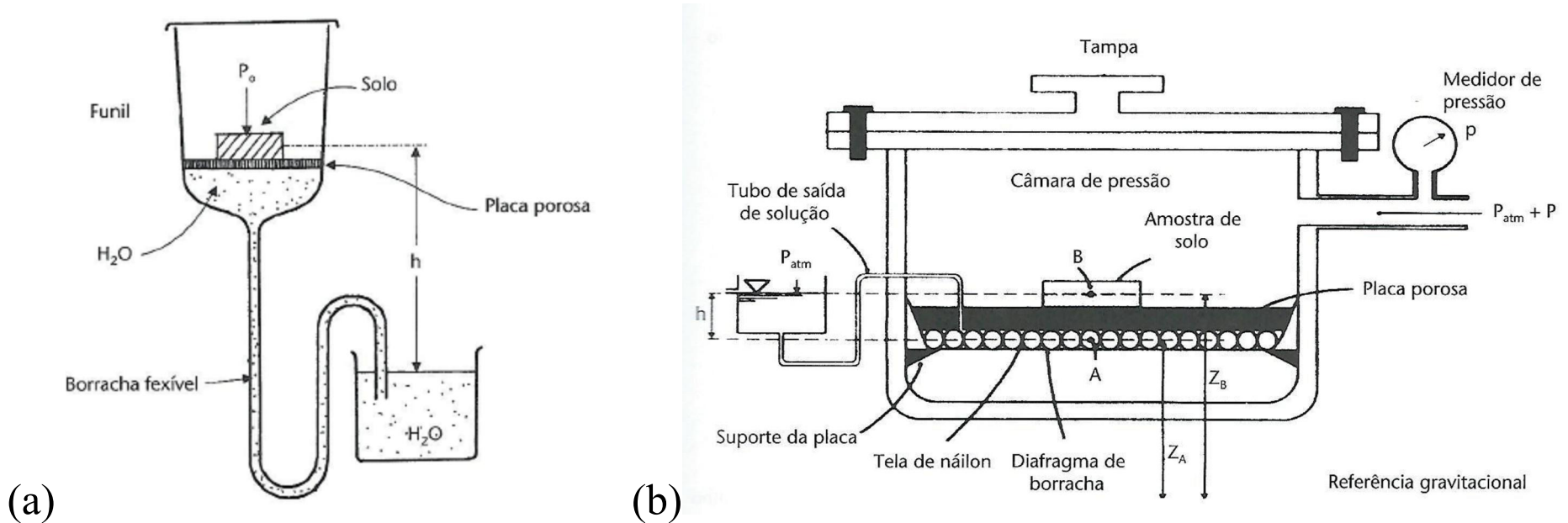


Figura 4.9 – a) Funil de placa porosa; b) Câmera de pressão com placa porosa.

2.4.2.3 Modelos de ajuste para a CCAS

➤ Modelo de Van Genuchten (1980)

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha \cdot \psi_m|^n]^m} \quad \text{Tendo a restrição } m = 1 - \frac{1}{n}$$

Sendo: θ – umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_r – umidade residual ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_s – umidade de saturação ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); ψ_m – potencial matricial (hPa); α – parâmetro empírico de ajuste da curva de retenção (hPa^{-1}); n e m – parâmetros empíricos da função de Van Genuchten.

Exemplo 4.10 – No estudo realizado em área cultivada com pinus os parâmetros da equação de Van Genuchten foram determinados, sendo: $\alpha = 0,293 \text{ hPa}^{-1}$; $n = 1,106$; $m = 0,096$; $\theta_r = 0,010$. Determine a umidade volumétrica do solo θ para $\psi_m = -7500 \text{ hPa}$.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha \cdot \psi_m|^n]^m} = 0,010 + \frac{0,541 - 0,010}{[1 + |0,293 \cdot (-7500)|^{1,106}]^{0,096}} = 0,2446 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$$

3 DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL TOTAL DA ÁGUA

a) Potencial total da água no solo: $\psi = \psi_p + \psi_g + \psi_{os} + \psi_m$

- Solo saturado, imerso em água

$$\psi = \psi_p + \psi_g$$

- Solo não saturado

$$\psi = \psi_m + \psi_g$$

b) Potencial total da água na planta: $\psi = \psi_p + \psi_g + \psi_{os} + \psi_m$

- Água no vacúolo

$$\psi = \psi_p + \psi_{os}$$

- Células de tecido tenro da planta (Exemplo: folha)

$$\psi = \psi_p + \psi_{os}$$

- Em tecido vegetal fibroso, lenhoso ou aglomerado da planta

$$\psi = \psi_m + \psi_{os}$$

3 DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL TOTAL DA ÁGUA

c) Potencial total na atmosfera e outras situações:

$$\psi = \psi_p + \psi_g + \psi_{os} + \psi_m$$

- **Na atmosfera**

$$\psi = \psi_p$$

- **Passagem da água do solo para a planta**

- Solo inundado (Exemplo: arroz inundado)

$$\psi = \psi_g + \psi_p + \psi_{os}$$

- Solo aerado (Exemplo: arroz de sequeiro)

$$\psi = \psi_g + \psi_m + \psi_{os}$$

4 EXEMPLOS DE SISTEMAS ENVOLVENDO A ÁGUA EM EQUILÍBRIO

Exemplo 4.11 – A água se encontra em equilíbrio na Figura 4.10. Assim, o ψ deve ser o mesmo em qualquer ponto do corpo. Encontre o ψ nos pontos A , B e C , considerando:

i) Plano de referência gravitacional em A :

$$\psi = \psi_P + \psi_g$$

$$\psi(A) = 0 + 0 = 0 \text{ cm H}_2\text{O}$$

$$\psi(B) = +5 - 5 = 0 \text{ cm H}_2\text{O}$$

$$\psi(C) = +10 - 10 = 0 \text{ cm H}_2\text{O}$$

ii) Plano de referência gravitacional em C :

$$\psi(A) = 0 + 10 = 10 \text{ cm H}_2\text{O}$$

$$\psi(B) = 5 + 5 = 10 \text{ cm H}_2\text{O}$$

$$\psi(C) = 10 + 0 = 10 \text{ cm H}_2\text{O}$$

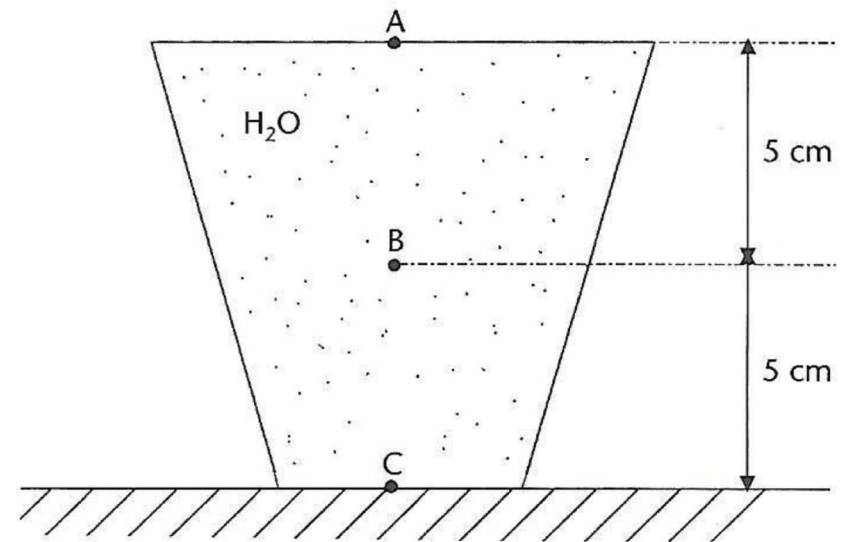


Figura 4.10 – Água em equilíbrio dentro do recipiente.

Exemplo 4.12 – Considerando o recipiente da **Figura 4.11**, contendo 5 cm de solo no fundo, qual será a distribuição dos potenciais nos pontos *A*, *B* e *C*?

Obs.: Consideração sobre o sistema.

i) Plano de referência gravitacional em *A*:

$$\psi = \psi_P + \psi_g$$

$$\psi(A) = 0 + 0 = 0 \text{ cm H}_2\text{O}$$

$$\psi(B) = +5 - 5 = 0 \text{ cm H}_2\text{O}$$

$$\psi(C) = +10 - 10 = 0 \text{ cm H}_2\text{O}$$

ii) Plano de referência gravitacional em *C*:

$$\psi(A) = 0 + 10 = 10 \text{ cm H}_2\text{O}$$

$$\psi(B) = 5 + 5 = 10 \text{ cm H}_2\text{O}$$

$$\psi(C) = 10 + 0 = 10 \text{ cm H}_2\text{O}$$

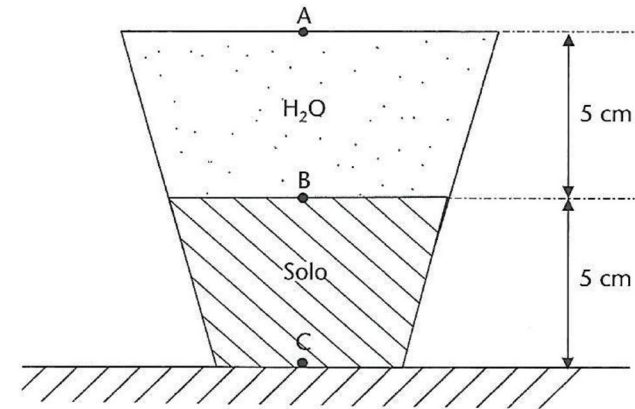


Figura 4.11 – Água em equilíbrio dentro do recipiente contendo água e solo.

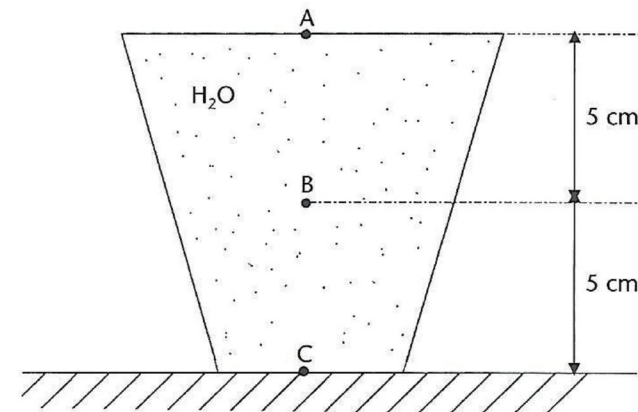


Figura 4.10 – Água em equilíbrio dentro do recipiente.

Exemplo 4.13 – Após fazer um pequeno furo no ponto C das Figuras 4.10 ou 4.11, a água não vai mais se encontrar em equilíbrio, pois fluirá pelo orifício. O ψ não é o mesmo em qualquer ponto do corpo. Encontre o ψ nos pontos A e C , considerando: *i*) Plano de referência gravitacional em C .

$$\psi(A) = \psi_P + \psi_g = 0 + 10 = 10 \text{ cm H}_2\text{O}$$

$$\psi(C) = \psi_P + \psi_g = 0 + 0 = 0 \text{ cm H}_2\text{O}$$

Como $\psi(A)$ é maior que $\psi(C)$ a água se movimentará do ponto A para o ponto C .

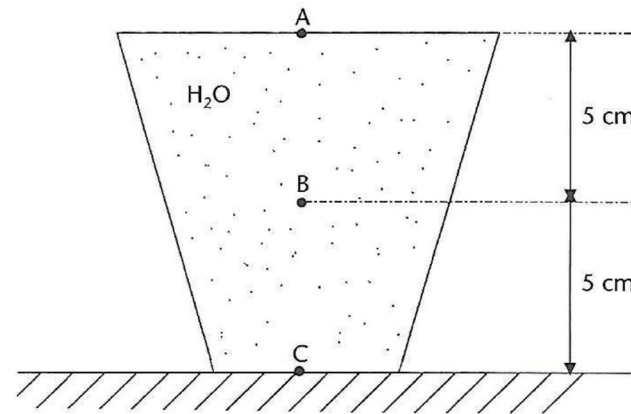


Figura 4.10 – Água em equilíbrio dentro do recipiente.

Exemplo 4.14 – Um tecido vegetal com células apresenta $\psi_P = +5$ atm (turgor celular), e $\psi_{os} = -7$ atm (concentração salina do vacúolo da célula). Determine o potencial da célula.

$$\psi_{\text{célula}} = \psi_P + \psi_{os} = 5 - 7 = -2 \text{ atm ou } -20 \text{ m.c.a. ou } -2000 \text{ cm H}_2\text{O}$$

i) Considerando que o mesmo tecido vegetal é jogado em um recipiente contendo água em equilíbrio (**Figura 4.10**). O que ocorrerá?

- O ψ no copo pode ser igual a 0 ou 10 cm H₂O (dependendo da referência). Considerando $\psi = 0$, a água penetrará no tecido, procurando o potencial menor;
- As células possuem membranas semipermeáveis. Após certo tempo ocorre equilíbrio “célula e água no copo”:

$$\psi_P = \psi_{os} \quad \text{e} \quad \psi_{\text{célula}} = \psi_{\text{água no copo}} = 0$$

Exemplo 4.15 – Conforme o sistema indicado na **Figura 4.12**, contendo uma coluna de solo dentro de um cilindro de plástico acrílico, com fundo aberto para a passagem de água, que está totalmente imersa em frasco de água. Realize o estudo do ψ nas seguintes situações:

i) Solo imerso, estando as torneiras 1 e 2 fechadas. Obs.: Utilize o ponto *B* como referência gravitacional:

$$\psi(A) = \psi_P + \psi_g = 5 + 30 = 35 \text{ cm H}_2\text{O}$$

$$\psi(B) = \psi_P + \psi_g = 35 + 0 = 35 \text{ cm H}_2\text{O}$$

ii) A torneira 2 é aberta e a água no recipiente baixa até o nível *B*.

$$\psi(A) = \psi_m + \psi_g = -30 + 30 = 0 \text{ cm H}_2\text{O}$$

$$\psi(B) = \psi_m + \psi_g = 0 + 0 = 0 \text{ cm H}_2\text{O}$$

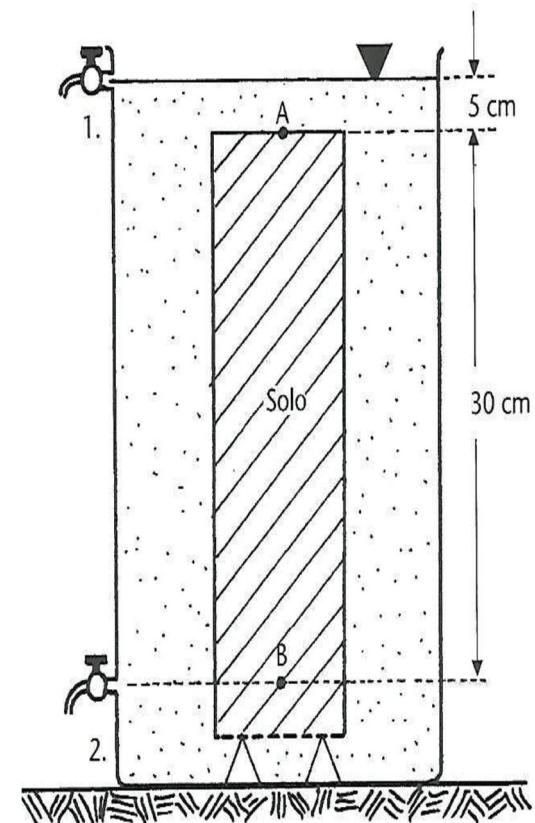
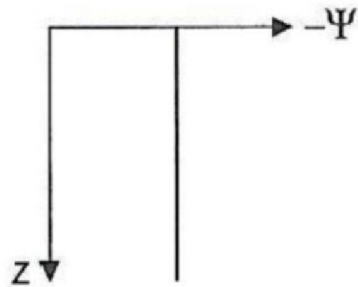


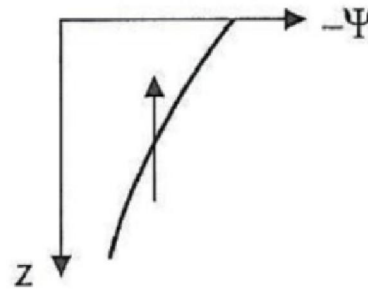
Figura 4.12 – Coluna de solo imersa em água.

Exemplo 4.16 – Exemplo 4.16 – Realize a representação gráfica da distribuição do potencial total da água no solo, nas seguintes situações (**Figura 4.13**):

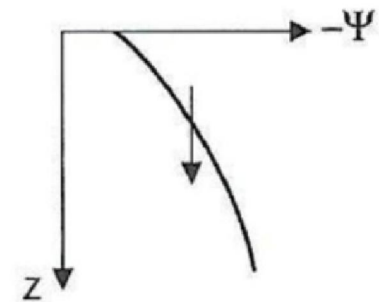
i) Água do solo em equilíbrio



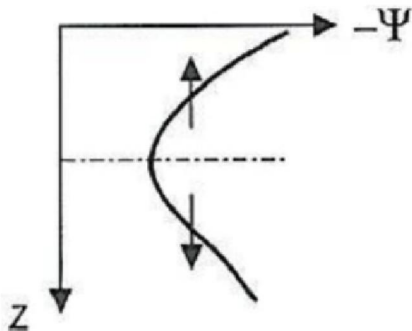
ii) Perfil com água em movimento ascendente



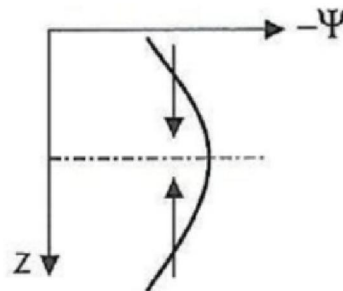
iii) Perfil com água em movimento descendente



iv) Movimento em ambos os sentidos



v) Movimento em ambos os sentidos



vi) Movimento misto

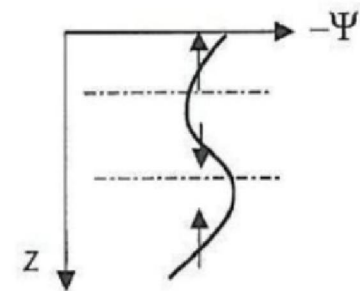


Figura 4.13 – Distribuição do potencial total da água no solo para diversas situações.

Exemplo 4.17 – Para a cultura de milho foram coletadas amostras de solo em diversas profundidades. As relações θ vs ψ_m encontra-se na **Tabela 4.1**:

- i) Disponha os valores em um gráfico:
- ii) Discuta os resultados obtidos:

Tabela 4.1. Valores de umidade volumétrica do solo (θ) e potenciais da água verificados para a cultura de milho, em um determinado dia.

Profundidade (cm)	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	ψ_m	ψ_g ($\text{cm H}_2\text{O}$)	ψ
0 – 10	0,256	-490	-5	-495
10 – 20	0,295	-350	-15	-365
20 – 30	0,321	-313	-25	-338
30 – 40	0,336	-281	-35	-316
40 – 50	0,345	-210	-45	-255
50 – 60	0,351	-180	-55	-235
60 – 70	0,338	-270	-65	-335
70 – 80	0,330	-295	-75	-370
80 – 90	0,315	-320	-85	-405
90 – 100	0,313	-326	-95	-421

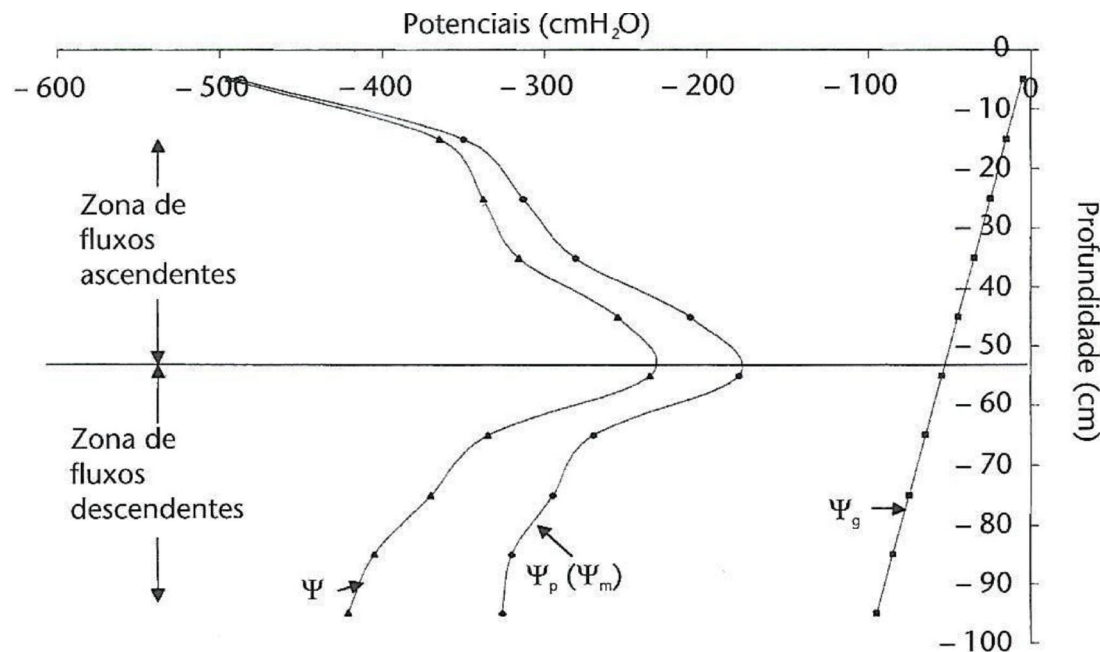


Figura 4.14 – Distribuição dos potenciais da água no solo em diferentes camadas, em dado instante.

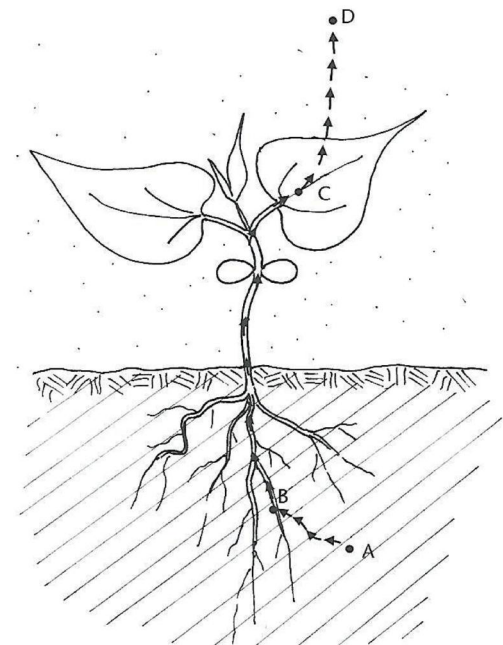


Figura 4.15 – Movimento da água no sistema S-P-A, em condições ótimas de desenvolvimento.

5 MEDIDA DAS COMPONENTES DO POTENCIAL TOTAL EM CAMPO

$$\psi = \psi_g + \psi_m$$

5.1 Tensiômetro

- Aspectos construtivos e funcionais
- Equacionamento de um tensiômetro comum de mercúrio:

$$\psi_m(A) = -13,6 h + h + h_1 + h_2$$

$$\psi_m(A) = -12,6 h + h_1 + h_2$$

Sendo: $\psi_m(A)$ potencial matricial no ponto A (cm H₂O); h – leitura da coluna de mercúrio (cm Hg); h_1 – altura da cuba do manômetro com relação à superfície do solo (cm H₂O); h_2 – profundidade média da cápsula porosa em relação à superfície do solo (cm H₂O); 13,6 – fator que transforma a altura de mercúrio em altura de água ($\rho_{\text{Hg}} = 13,6 \rho_{\text{água}}$).

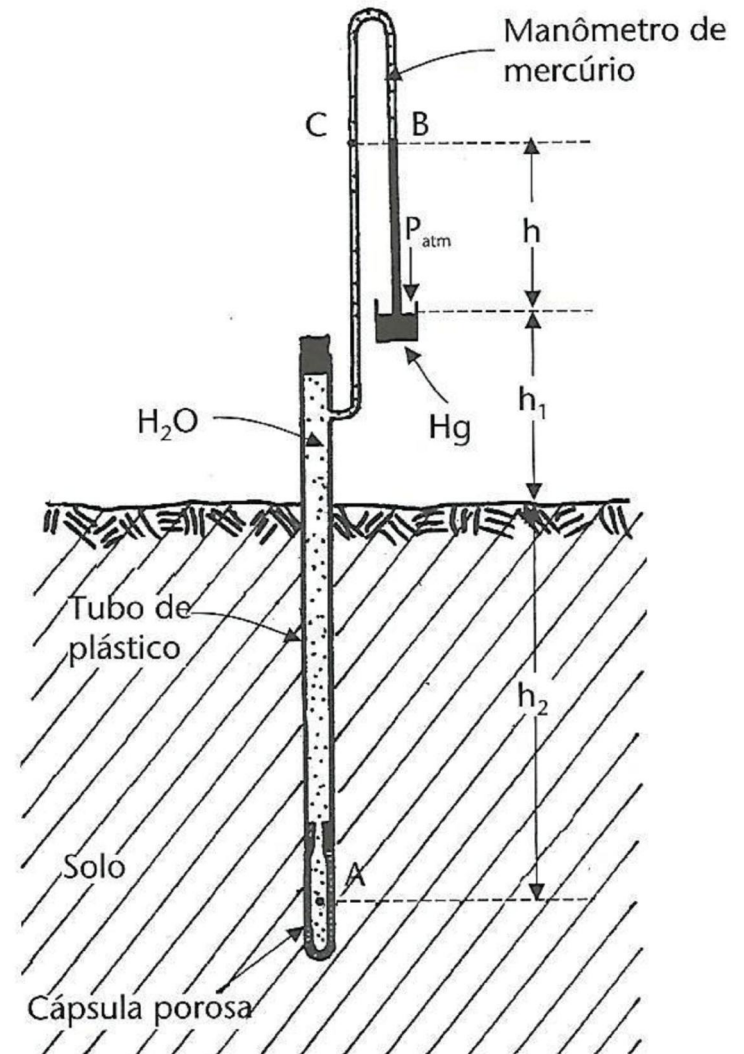


Figura 4.16 – Esquema de um tensiômetro de mercúrio.

Exemplo 4.18 – Para os dois tensiômetros em equilíbrio que se encontram apresentados na **Figura 4.17**, determine para os pontos A e B:

i) Os potenciais matriciais $\psi_m(A)$ e $\psi_m(B)$:

$$\begin{aligned}\psi_m(A) &= -12,6 \cdot 35,5 + 40 + 30 \\ &= -377,3 \text{ cm H}_2\text{O} \text{ ou } -36,5 \text{ kPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\psi_m(B) &= -12,6 \cdot 26,2 + 30 + 60 \\ &= -240,1 \text{ cm H}_2\text{O} \text{ ou } -23,2 \text{ kPa}\end{aligned}$$

ii) Os potenciais gravitacionais $\psi_g(A)$ e $\psi_g(B)$:

$$\psi_g(A) = -30 \text{ cm H}_2\text{O}$$

$$\psi_g(B) = -60 \text{ cm H}_2\text{O}$$

iii) Os potenciais totais ψ_A e ψ_B :

$$\begin{aligned}\psi_A &= \psi_m(A) + \psi_g(A) = -377,3 - 30 \\ &= -407,3 \text{ cm H}_2\text{O}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\psi_B &= \psi_m(B) + \psi_g(B) = -240,1 - 60 \\ &= -300,1 \text{ cm H}_2\text{O}\end{aligned}$$

iv) Verifique se está ocorrendo movimento da água no solo:

- Como $\psi_A < \psi_B$, existe movimento de água no solo, de forma ascendente do ponto B para o ponto A no perfil considerado.

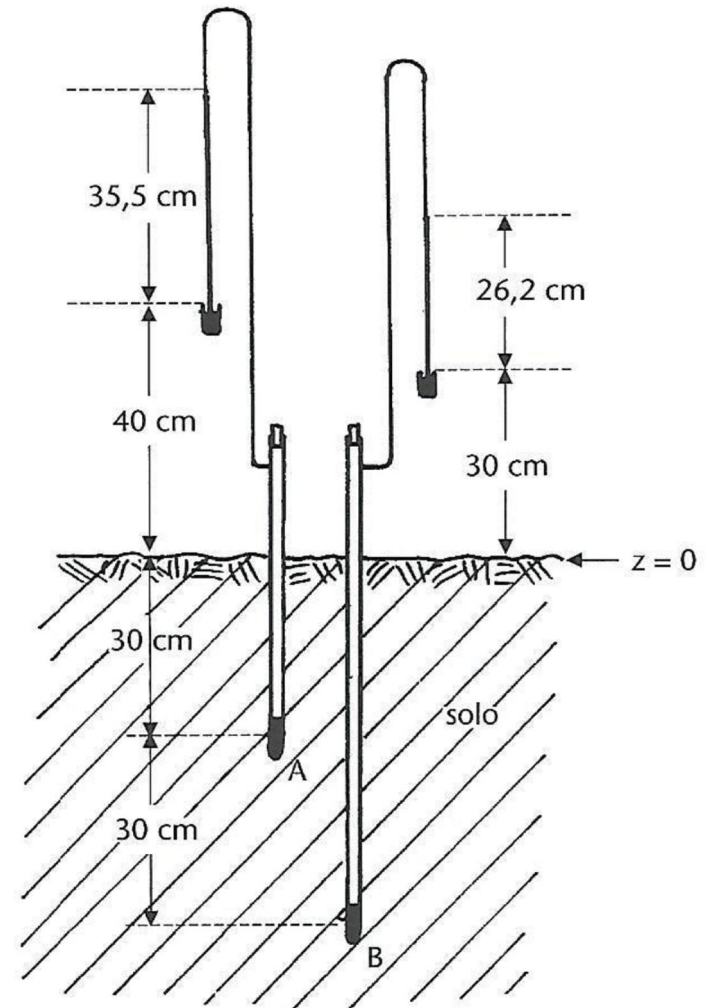


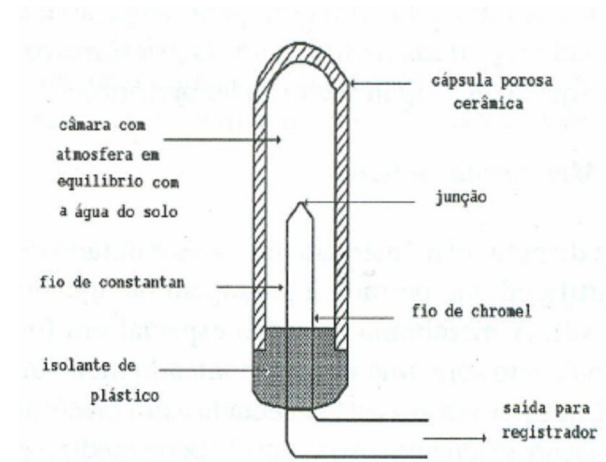
Figura 4.17 – Tensiômetros A e B instalados no campo.

5 MEDIDA DAS COMPONENTES DO POTENCIAL TOTAL EM CAMPO

$$\psi = \psi_g + \psi_m$$

5.2 Blocos de resistência elétrica

5.3 Psicrômetro-termopar



5.4 Determinação do potencial de Pressão

5 REFERÊNCIAS

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