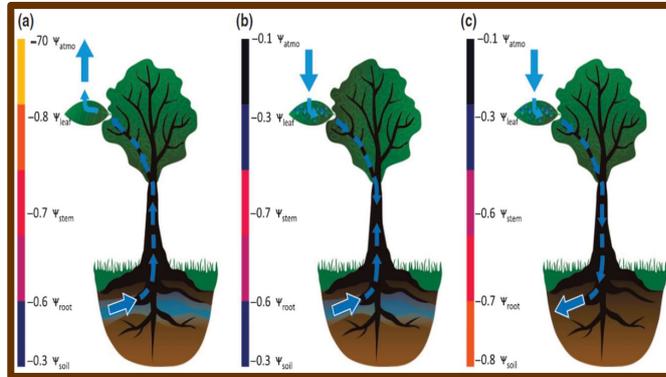




4) Movimento da Água no solo



Potencial Total (ϕT)
Solo Saturado: $\phi T = \phi p + \phi g$

Solo Não Saturado: $\phi T = \phi m + \phi g$

ϕT (potencial total); ϕp (potencial de pressão); ϕm (potencial mátrico); ϕg (potencial gravitacional)

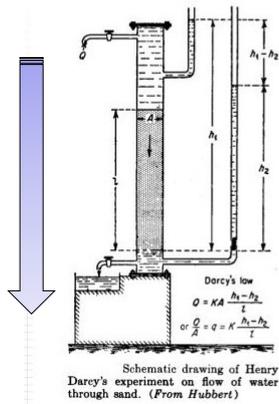
Potencial Total
 $\phi T_1 > \phi T_2$

179



4) Movimento da Água no solo

O experimento de Darcy



Potencial Total
 $\phi T_1 > \phi T_2$

Darcy, Henry, 1856, "Les fontaines publiques de la ville de Dijon".

$$\frac{Q}{A} = K_o \cdot \frac{\Delta \phi T}{\Delta x} \quad \Rightarrow \quad q = -K_o \cdot \frac{\Delta \phi T}{\Delta x}$$

Solo Saturado: $\phi T = \phi p + \phi g$

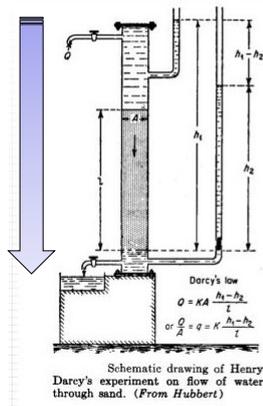
Solo Não Saturado: $\phi T = \phi m + \phi g$

180



4) Movimento da Água no solo

O experimento de Darcy



$Q = \text{Vazão (L}^3 \text{T}^{-1}\text{)}$

$K_0 = \text{Condutividade Hidráulica do solo saturado (L T}^{-1}\text{)}$

$\frac{\Delta\phi T}{\Delta x} = \text{Gradiente Hidráulico}$

$\Delta\phi T = \text{Variação do potencial total (L)}$

$\Delta x = L = \text{Comprimento de solo (L)}$

Darcy, Henry, 1856, "Les fontaines publiques de la ville de Dijon".

$$\frac{Q}{A} = K_0 \cdot \frac{\Delta\phi T}{\Delta x} \quad \Rightarrow \quad q = -K_0 \cdot \frac{\Delta\phi T}{\Delta x}$$

Solo Saturado: $\phi T = \phi p + \phi g$

Solo Não Saturado: $\phi T = \phi m + \phi g$

181



4) Movimento da Água no solo

Potencial Total

$$\phi T_1 > \phi T_2$$

Solo Saturado: $\phi T = \phi p + \phi g$

Solo Não Saturado: $\phi T = \phi m + \phi g$

Vertical: $\Delta\phi T = \phi T_{\text{cima}} - \phi T_{\text{baixo}}$

Horizontal: $\Delta\phi T = \phi T_{\text{direita}} - \phi T_{\text{esquerda}}$

Solo Saturado:

Vertical: $\Delta\phi T = (\phi p_{\text{cima}} + \phi g_{\text{cima}}) - (\phi p_{\text{baixo}} + \phi g_{\text{baixo}})$

Horizontal: $\Delta\phi T = (\phi p_{\text{direita}} + \phi g_{\text{direita}}) - (\phi p_{\text{esquerda}} + \phi g_{\text{esquerda}})$

Solo não saturado:

Vertical: $\Delta\phi T = (\phi m_{\text{cima}} + \phi g_{\text{cima}}) - (\phi m_{\text{baixo}} + \phi g_{\text{baixo}})$

Horizontal: $\Delta\phi T = (\phi m_{\text{direita}} + \phi g_{\text{direita}}) - (\phi m_{\text{esquerda}} + \phi g_{\text{esquerda}})$

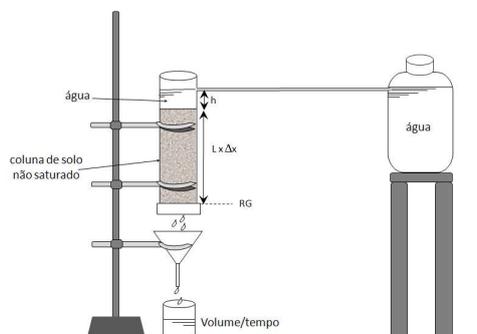
ϕT (potencial total); ϕp (potencial de pressão); ϕm (potencial mátrico); ϕg (potencial gravitacional)

182



4) Movimento da Água no solo

Condutividade Hidráulica (Solo Saturado e não saturado)
Permeâmetro de Carga Variável



$$K_o = \frac{Q \cdot L}{A \cdot (L + h)}$$

184

- 1) Determine o valor médio de K_o para os dados coletados de um permeâmetro de carga constante.

ϕ coluna = 5 cm (diâmetro da coluna)
L solo = 20 cm
h = 1 cm

$$K_o = \frac{Q \cdot L}{A \cdot (L + h)}$$

	Volume (mL)	Tempo (min)	Q (cm ³ /min)
	50	1,2	
	51	1,25	
	52	1,3	
Média			

Resposta: $k_o = 1,18$ m/h

- 2) Determine o valor de K_o para os dados coletados de um permeâmetro de carga variável.

h1 = 80 cm
h2 = 46 cm
 $\phi a = 1$ cm (diâmetro de "a" do funil)
 $\phi A = 5$ cm (diâmetro de "A" da coluna)
 $\Delta t = 20$ s
L solo = 20 cm

$$K_o = \frac{\text{Ln}\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \cdot a \cdot L}{A \cdot \Delta t}$$

Resposta: $k_o = 0,792$ m/h

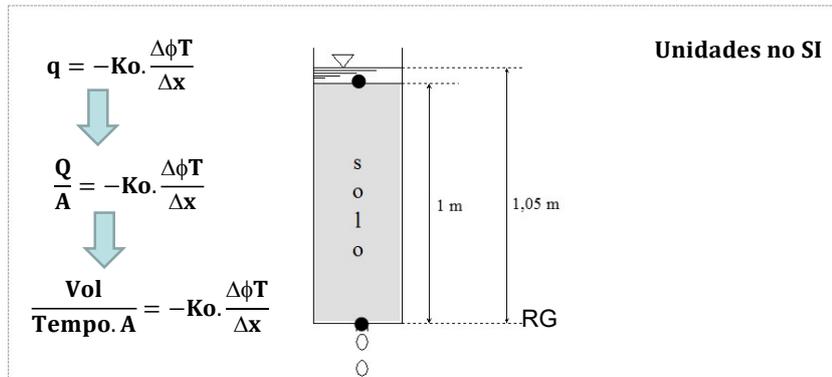
187



4) Movimento da Água no solo

- 2) Sendo $K_o = 100 \text{ mm/h}$ e a área de $0,01 \text{ m}^2$, pergunta-se: Quanto tempo é necessário para se ter 200 mL de solução passando através da coluna abaixo ?

(Resposta = 0,19 h ou 11,4 minutos)



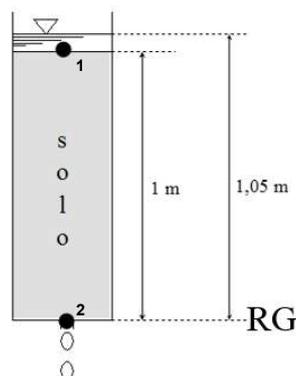
Solo Saturado (vertical):
 $\Delta\phi T = (\phi p_{\text{cima}} + \phi g_{\text{cima}}) - (\phi p_{\text{baixo}} + \phi g_{\text{baixo}})$

$$\Delta\phi T = (0,05 + 1) - (0 + 0)$$

188



4) Movimento da Água no solo



$K_o = 100 \text{ mm/h}$

Área = $0,01 \text{ m}^2$

Volume = 200 mL

Tempo = ??

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{\text{Vol}}{A \cdot \text{tempo}}$$

$$\frac{\text{Vol}}{A \cdot \text{tempo}} = -K_o \cdot \frac{\Delta\phi T}{\Delta x}$$

Solo Saturado (vertical):

$$\Delta\phi T = (\phi p_{\text{cima}} + \phi g_{\text{cima}}) - (\phi p_{\text{baixo}} + \phi g_{\text{baixo}})$$

$$\Delta\phi T = (0,05 + 1) - (0 + 0)$$

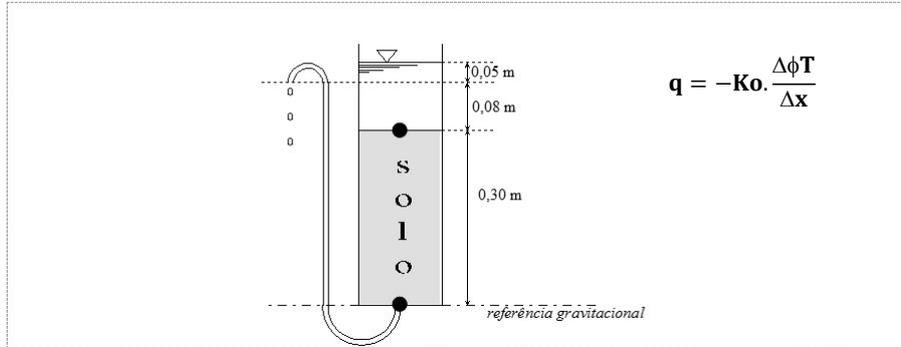
Resposta = 0,19 horas ou 11,4 minutos

189



4) Movimento da Água no solo

- 1) No arranjo a seguir, quanto vale a densidade de fluxo de água se o valor da condutividade hidráulica é 0,014 mm/s? (Resposta: -0,023 mm/s)



$$q = -K_o \cdot \frac{\Delta\phi T}{\Delta x}$$

Solo Saturado (vertical):

$$\Delta\phi T = (\phi p_{\text{cima}} + \phi g_{\text{cima}}) - (\phi p_{\text{baixo}} + \phi g_{\text{baixo}})$$

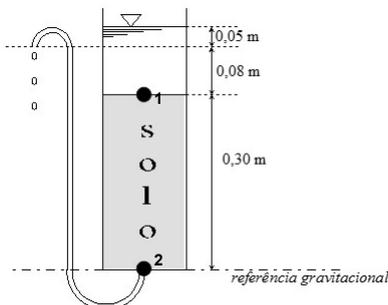
$$\Delta\phi T = ((0,05+0,08) + 0,3) - ((0,30+0,08) + 0)$$

Resposta = -2,33.10⁻³ mm s⁻¹

190



4) Movimento da Água no solo



$$K_o = 0,014 \text{ mm/s}$$

$$q = ??$$

$$q = -K_o \cdot \frac{\Delta\phi T}{\Delta x}$$

$$\Delta\phi T = \phi T_{\text{cima}} - \phi T_{\text{baixo}} = (\phi g_1 + \phi p_1) - (\phi g_2 + \phi p_2)$$

191



4) Movimento da Água no solo

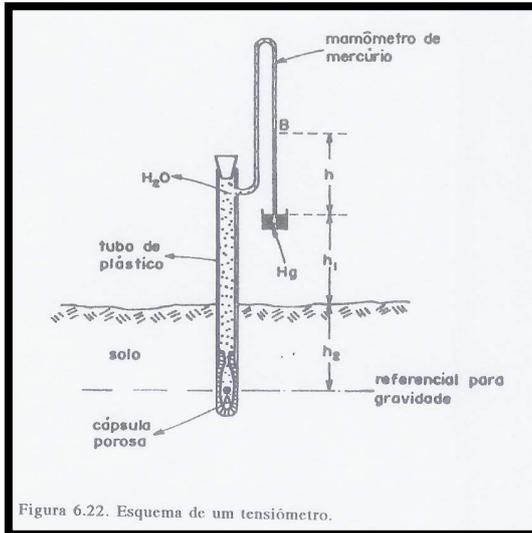


Figura 6.22. Esquema de um tensiômetro.

Potencial Mátrico
(Tensiômetro)

$$\phi_m = -12,6 \cdot h + h_1 + h_2$$

Potencial Mátrico
(Tensiômetro)

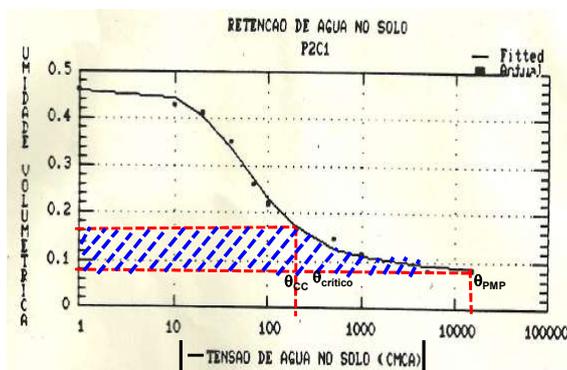
$$\phi_m = -\text{Tensão} + h_1 + h_2$$

196



4) Movimento da Água no solo

Curva de Retenção de Água no Solo



$$\theta_{CC} = 1/3 \text{ atm}$$

$$\theta_{PMP} = 15 \text{ atm}$$

van Genuchten (1980)

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha \cdot |\phi_m|)^n\right]^m}$$

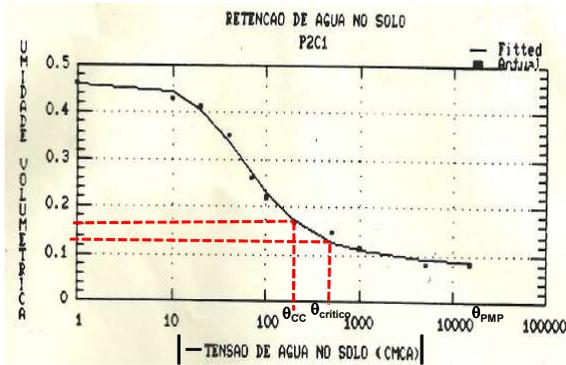
Solo não saturado

197



4) Movimento da Água no solo

Curva de Retenção de Água no Solo



$\theta_{cc} = 1/3 \text{ atm}$
 $\theta_{PMP} = 15 \text{ atm}$

van Genuchten (1980)

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|\phi m|)^n]^m}$$

↑ Negativo ϕm ↑ Solo Seco
 ↑ Em módulo: ↑ Solo Seco
 ↑ Positivo ϕm ↑ Solo Seco

198



4) Movimento da Água no solo

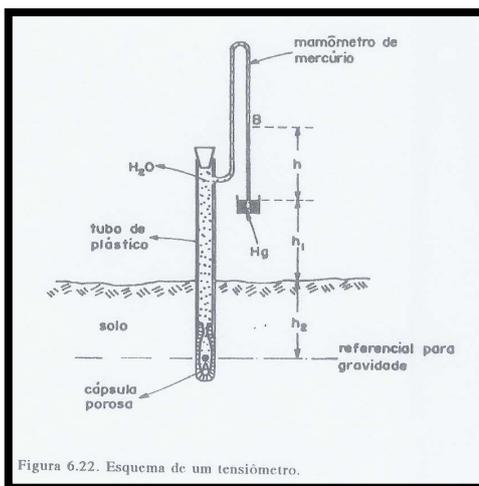
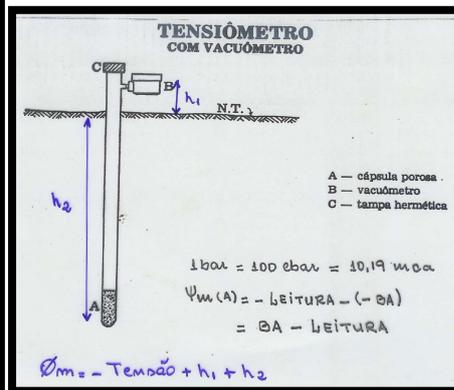


Figura 6.22. Esquema de um tensiômetro.



199



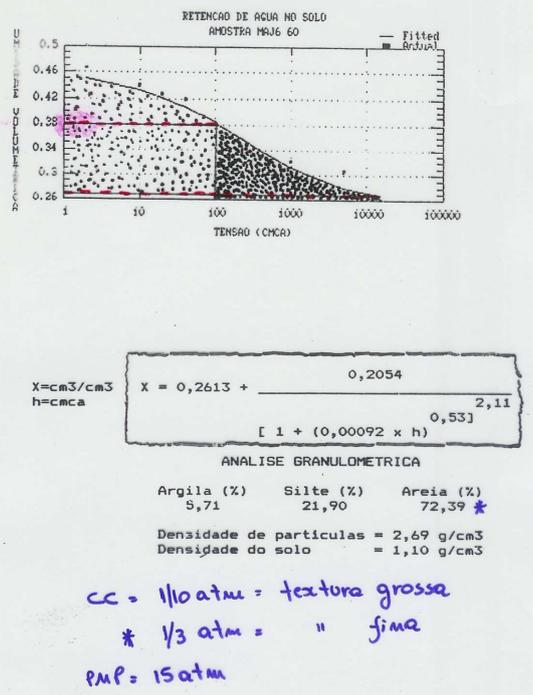
4) Movimento da Água no solo

Solo não saturado

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot |\phi_m|)^n]^m}$$

$\theta_{CC} = 1/3 \text{ atm}$

$\theta_{PMP} = 15 \text{ atm}$



200



4) Movimento da Água no solo

Exercícios:

- 1) Diante do esquema montado em campo, utilizando-se tensiômetro, pergunta-se qual o valor do potencial mátrico no ponto (a)?

$\phi_m = -12,6 \cdot h + h_1 + h_2$

Resposta: -409,98 cm ou -409,98 cca

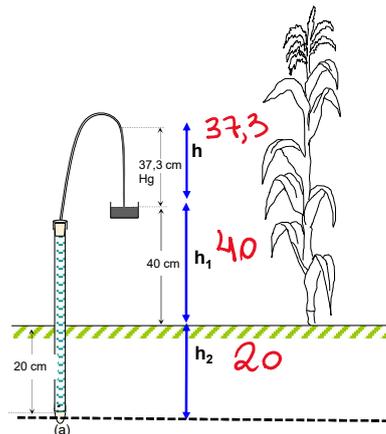
- 2) Se fôssemos utilizar um tensiômetro, qual seria o valor da tensão (T) lida no aparelho, em kPa, relativo ao valor acima de ϕ_m ?

$-409,98 = -T + 40 + 20$

$\phi_m = -T + h_1 + h_2$

$T = 0$

Resposta: 469,98 cm ou 46,099 kPa



Sabendo-se que: 101325 Pa = 10,33 m ou 10,33 cca

$101,325 \text{ kPa} \rightarrow 1033 \text{ cm}$
 $20 \text{ kPa} \rightarrow 200 \text{ cm}$

201



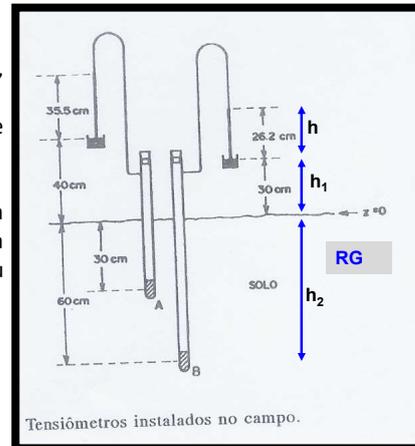
4) Movimento da Água no solo

Exercícios:

- 1) Diante do esquema montado em campo, utilizando-se tensiômetros, pergunta-se:
 - a) Qual o valor do potencial mátrico nos pontos A e B?
 - b) Qual o ponto com maior umidade do solo?
 - c) Verifique se está ocorrendo movimento de água entre os pontos A e B e caso esteja ocorrendo na direção vertical, qual o sentido (ascendente ou descendente)?

$$\phi_m = -12,6 \cdot h + h_1 + h_2$$

$$\phi_T = \phi_g + \phi_m$$



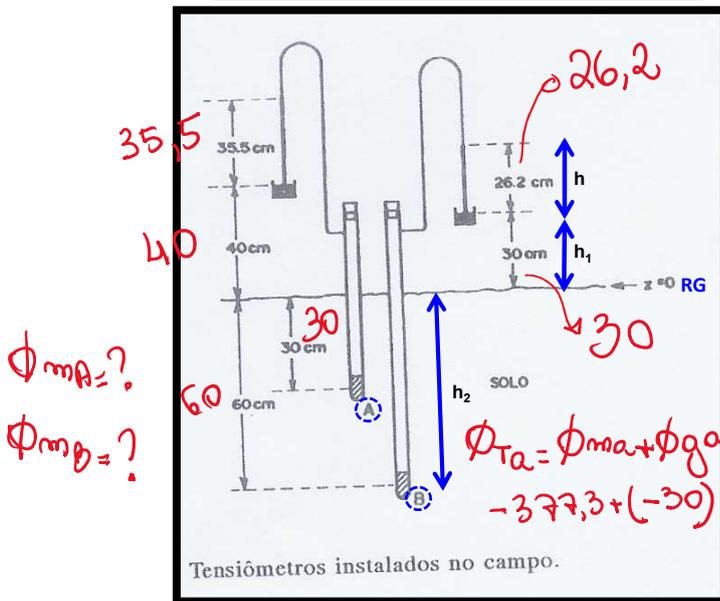
$$\Delta\phi_T = \phi_{T_a} - \phi_{T_b} = (\phi_{g_a} + \phi_{m_a}) - (\phi_{g_b} + \phi_{m_b})$$

202

$$\phi_m = -12,6 \cdot h + h_1 + h_2$$

$$\Delta\phi_T = \phi_{T_a} - \phi_{T_b} = (\phi_{g_a} + \phi_{m_a}) - (\phi_{g_b} + \phi_{m_b})$$

$$\phi_T = \phi_g + \phi_m$$



- a) Qual o valor do potencial mátrico nos pontos A e B?
- b) Qual o ponto com maior umidade do solo?
- c) Verifique se está ocorrendo movimento de água entre os pontos A e B e caso esteja ocorrendo na direção vertical, qual o sentido (ascendente ou descendente)?

Respostas:

- $\phi_{ma} = -377,3 \text{ cm}$
- $\phi_{mb} = -240,12 \text{ cm}$
- $\phi_{Ta} = -407,3 \text{ cm e}$
- $\phi_{Tb} = -300,12 \text{ cm}$

203

**4) Movimento da Água no solo**

Respostas:

a) $\phi_{ma} = -377,3 \text{ cm}$ e $\phi_{mb} = -240,12 \text{ cm}$

b) $\phi_{Ta} = -407,3 \text{ cm}$ e $\phi_{Tb} = -300,12 \text{ cm}$

204

**4) Movimento da Água no solo**

Respostas:

a) $\phi_{ma} = -377,3 \text{ cm}$ e $\phi_{mb} = -240,12 \text{ cm}$

PONTO B mais ÚMIDO

b) $\phi_{Ta} = -407,3 \text{ cm}$ e $\phi_{Tb} = -300,12 \text{ cm}$

MOVIMENTO DE B para A

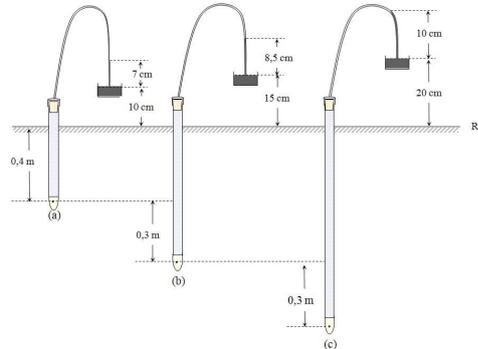
205



4) Movimento da Água no solo

Exercícios:

- 1) Diante do esquema montado em campo, utilizando-se tensiômetros, pergunta-se:
 - a) Qual o valor do potencial mátrico nos pontos (a), (b) e (c)?
 - b) Qual o ponto com maior umidade do solo?
 - c) Verifique se está ocorrendo movimento de água entre os pontos (a), (b) e (c) e caso esteja, na direção vertical, qual o sentido?



206

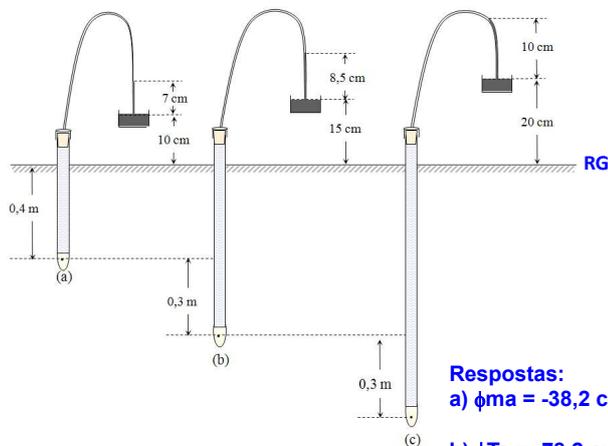


4) Movimento da Água no solo

Exercícios:

$$\phi_m = -12,6 \cdot h + h_1 + h_2 \quad \phi T = \phi g + \phi m$$

$$\Delta \phi T = \phi T_a - \phi T_b = (\phi g_a + \phi m_a) - (\phi g_b + \phi m_b)$$



Respostas:

a) $\phi_{ma} = -38,2 \text{ cm}$, $\phi_{mb} = -22,1 \text{ cm}$, $\phi_{mc} = -6 \text{ cm}$

b) $\phi T_a = -78,2 \text{ cm}$, $\phi T_b = -92,1 \text{ cm}$, $\phi T_c = -106 \text{ cm}$

207



4) Movimento da Água no solo

Respostas:

a) $\phi_{ma} = -38,2 \text{ cm}$, $\phi_{mb} = -22,1 \text{ cm}$, $\phi_{mc} = -6 \text{ cm}$

PONTO C MAIS ÚMIDO

b) $\phi_{Ta} = -78,2 \text{ cm}$, $\phi_{Tb} = -92,1 \text{ cm}$, $\phi_{Tc} = -106 \text{ cm}$

MOVIMENTO DE A para C

208



4) Movimento da Água no solo

Exercícios:

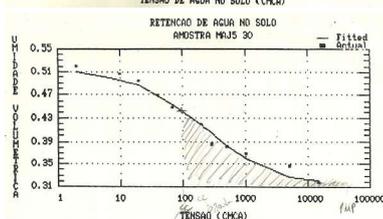
- 1) Utilizando os valores abaixo de potencial mátrico (ϕ_m), calcule os valores de umidade do solo (θ), para os 2 tipos de solo e para cada ϕ_m :

$\phi_{ma} = -38,2 \text{ cm}$, $\phi_{mb} = -22,1 \text{ cm}$, $\phi_{mc} = -6 \text{ cm}$



$\theta_r = 0,0828 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$
 $\theta_s = 0,4617 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$
 $\alpha = 0,03102 \text{ cm}^{-1}$
 $n = 1,7761$
 $m = 0,44$

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha|\phi_m|)^n\right]^m}$$



$\theta_r = 0,3188 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$
 $\theta_s = 0,5203 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$
 $\alpha = 0,00077 \text{ cm}^{-1}$
 $n = 0,61$
 $m = 2,58$

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha|\phi_m|)^n\right]^m}$$

Respostas:

Solos	$\theta \text{ (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)}$		
	ϕ_{ma} -38,2 cm	ϕ_{mb} -22,1 cm	ϕ_{mc} -6 cm
Arenoso	0,3428	0,3987	0,4535
Argiloso	0,4704	0,4827	0,5019

210

$$\theta[\phi m] = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \cdot |\phi m|)^n]^m}$$

$$y(x) = \dots$$

ARENOSO

$$\theta_r = 0,0828 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$$

$$\theta_s = 0,4617 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$$

$$\alpha = 0,03102 \text{ cm}^{-1}$$

$$n = 1,7761$$

$$m = 0,44$$

ARGILOSO

$$\theta_r = 0,3188 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$$

$$\theta_s = 0,5203 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$$

$$\alpha = 0,00077 \text{ cm}^{-1}$$

$$n = 0,61$$

$$m = 2,58$$

Solos	θ (cm ³ cm ⁻³)		
	ϕ_{ma}	ϕ_{mb}	ϕ_{mc}
	-38,2 cm	-22,1 cm	-6 cm
Arenoso	0,3428	0,3987	0,4535
Argiloso	0,4704	0,4827	0,5019

211

ARENOSO

$$\theta_r = 0,0828 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$$

$$\theta_s = 0,4617 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$$

$$\alpha = 0,03102 \text{ cm}^{-1}$$

$$n = 1,7761$$

$$m = 0,44$$

ARGILOSO

$$\theta_r = 0,3188 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$$

$$\theta_s = 0,5203 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$$

$$\alpha = 0,00077 \text{ cm}^{-1}$$

$$n = 0,61$$

$$m = 2,58$$

$$\theta[\phi m] = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \cdot |\phi m|)^n]^m}$$

$$y(x) = \dots$$

212