

4) Movimento da Água no solo

Exercícios

1) Coletou-se uma amostra de solo com volume de 150 cm³ cuja massa úmida é de 258 g e cuja massa seca é de 206 g. Qual sua umidade na base em massa e de volume? Qual a densidade do solo? Qual a densidade de partículas (V_s=78,03 cm³)? Quantos mm de água estão armazenados, com esse solo nessas condições, a uma profundidade de 30 cm.

$$U = \frac{ma}{ms} \quad \theta = \frac{Va}{V} \quad d = \frac{ms}{V} \quad ds = \frac{ms}{Vs}$$

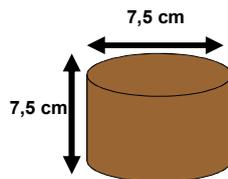
$$h = \theta \cdot \Delta z$$

Respostas:
U = 0,252 g g⁻¹,
θ = 0,347 cm³ cm⁻³
d = 1,373 g cm⁻³
dp = 2,64 g cm⁻³
h = 104,1 mm



4) Movimento da Água no solo

2) Coletou-se uma amostra de solo à profundidade de 60 cm, com anel volumétrico de diâmetro e altura 7,5 cm. O peso úmido do solo foi 560 g e após 48 horas em estufa a 105 °C, seu peso permaneceu constante e igual a 458 g. Qual a densidade do solo? Qual sua umidade na base em massa e em volume? Qual a porosidade do solo? (considere $d_s = 2,65 \text{ g cm}^{-3}$)



Respostas:

$V = 331,27 \text{ cm}^3$,
 $d = 1,38 \text{ g cm}^{-3}$,
 $U = 0,223 \text{ g g}^{-1}$,
 $\theta = 0,308 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$
 $\alpha = 47,92\%$



4) Movimento da Água no solo

Exercícios

5) Dada uma extensão de solo de 10 ha, considerada homogênea quanto à densidade global e à umidade, até aos 30 cm de profundidade, qual a massa de solo seco em toneladas existente na camada 0-30 cm de profundidade? A umidade do solo é de $0,2 \text{ g g}^{-1}$ e sua densidade é de $1,7 \text{ g cm}^{-3}$. Quantos litros de água estão retidos na mesma camada de solo?



Respostas:

$m_s = 51.000 \text{ ton}$
 $V = 10.200.000 \text{ L/10 ha}$



4) Movimento da Água no solo

Exercícios

6) Um cilindro de solo de 0,1 m de diâmetro e 0,12 m de altura tem uma massa de 1,7 Kg, dos quais 0,26 Kg são água. Assumindo que o valor da densidade da água $\rho_a = 1000 \text{ Kg m}^{-3}$ e o da densidade dos sólidos $\rho_s = 2650 \text{ Kg m}^{-3}$, calcular:

- Umidade % massa
- umidade % volume
- altura da água
- densidade do solo
- porosidade

Respostas:

$U = 18,05\%$, $\theta = 27,6\%$, $h = 33,12 \text{ mm}$ $d_s = 1527,88 \text{ kg m}^{-3}$, $\alpha = 42,34\%$



4) Movimento da Água no solo

Exercícios

7) Coletaram-se 220 Kg de solo úmido. O valor da umidade do solo foi de $0,18 \text{ Kg Kg}^{-1}$. Calcular o valor da massa de sólidos e o da massa de água.

Respostas:

$m_s = 186,44 \text{ kg}$ e $m_a = 33,56 \text{ kg}$



4) Movimento da Água no solo

Exercícios

8) Um solo de 0,8 m de profundidade tem um valor uniforme de $\theta = 0,13 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Calcular quanta água deve ser adicionada ao solo para trazer o valor de sua umidade volumétrica a $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Respostas:
 $h = 136 \text{ mm}$

9) Um pesquisador necessita de exatamente 0,1 Kg de um solo seco, e dispõe de uma amostra de solo úmido com $\theta = 0,250 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e densidade de 1200 Kg m^{-3} . Quanto solo úmido deve pesar para obter a massa de solo seco desejada?

Respostas:
 $U = 0,2083 \text{ kg kg}^{-1}$, $ma = 0,02083 \text{ kg}$, $m = 0,12083 \text{ kg}$



4) Movimento da Água no solo

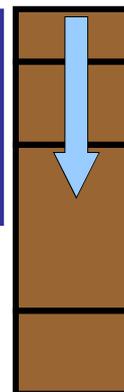
Exercícios

10) O valor da umidade de um solo à capacidade de campo é $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Os valores de sua umidade inicial (% massa) e de sua densidade, variam com a profundidade e são dados na tabela abaixo. Assumindo que o valor da densidade da água é 1000 Kg m^{-3} , calcular o valor da profundidade de penetração de uma chuva de 50 mm.

Incremento de Profundidade (m)	Umidade à base de massa (Kg/Kg)	Densidade do solo (Kg m^{-3})	θ	h
0 - 0,05	0,05	1200		
0,05 - 0,20	0,10	1300		
0,20 - 0,80	0,15	1400		
0,80 - 1,00	0,17	1400		

Respostas:
 $Z = 0,338 \text{ m}$

$$h = (\theta_{cc} - \theta) \cdot \Delta z$$



4) Movimento da Água no solo

Exercícios

Profundidade (m)	U (kg kg ⁻¹)	Massa Específica (kg m ⁻³)	θ (cm ³ cm ⁻³)	h (mm)
0 - 0,05	0,05	1200	0,06	12
0,05 - 0,20	0,10	1300	0,13	25,5
0,20 - 0,80	0,15	1400	0,21	54
0,80 - 1,00	0,17	1400	0,238	12,4

Respostas:
Z = 0,338 m

h = (θ_{cc} - θ).Δz

4) Movimento da Água no solo

Capilaridade (Ângulo de Contato e Tensão Superficial)

Legend: ○ h (0°) □ h (60°) ● h (90°)

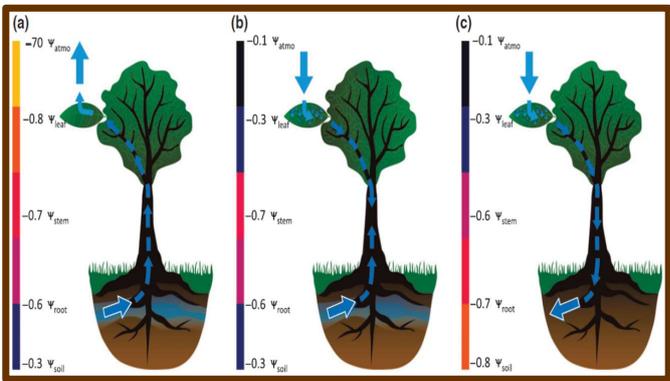
$$h = \frac{2\sigma \cos(\alpha)}{\rho \cdot g \cdot r}$$

Fig. 2.9. The geometric relationship of the radius of curvature R to the radius of the capillary r and the contact angle α.



4) Movimento da Água no solo





Potencial Total (ϕ_T)
Solo Saturado: $\phi_T = \phi_p + \phi_g$

Solo Não Saturado: $\phi_T = \phi_m + \phi_g$

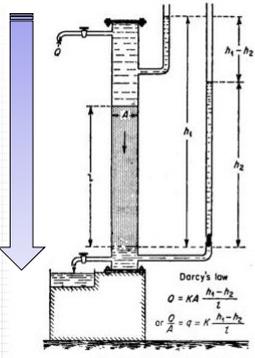
ϕ_T (potencial total); ϕ_p (potencial de pressão); ϕ_m (potencial mátrico); ϕ_g (potencial gravitacional)

Potencial Total
 $\phi_{T_1} > \phi_{T_2}$



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: $\phi_T = \phi_m + \phi_g$

Schematic drawing of Henry Darcy's experiment on flow of water through sand. (From Hubbard)



4) Movimento da Água no solo

Potencial Total

$$\phi_{T_1} > \phi_{T_2}$$

Solo Saturado: $\phi_T = \phi_p + \phi_g$

Vertical: $\Delta\phi_T = \phi_{T_{\text{cima}}} - \phi_{T_{\text{baixo}}}$

Solo Não Saturado: $\phi_T = \phi_m + \phi_g$

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: $\Delta\phi_T = (\phi_{m_{\text{cima}}} + \phi_{g_{\text{cima}}}) - (\phi_{m_{\text{baixo}}} + \phi_{g_{\text{baixo}}})$

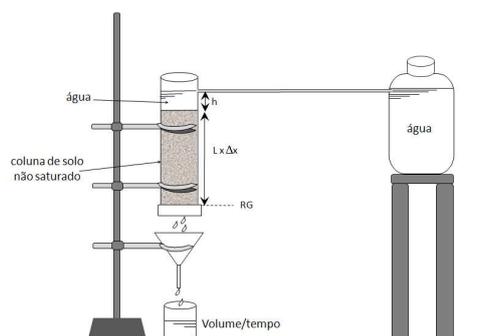
Horizontal: $\Delta\phi_T = (\phi_{m_{\text{direita}}} + \phi_{g_{\text{direita}}}) - (\phi_{m_{\text{esquerda}}} + \phi_{g_{\text{esquerda}}})$

ϕ_T (potencial total); ϕ_p (potencial de pressão); ϕ_m (potencial mátrico); ϕ_g (potencial gravitacional)



4) Movimento da Água no solo

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

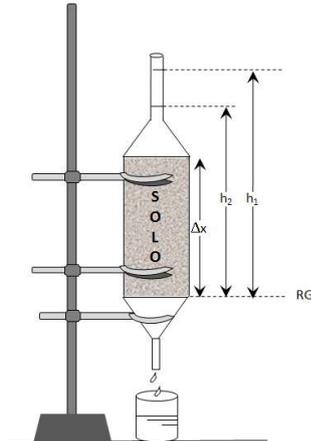


$$K_o = \frac{Q \cdot L}{A \cdot (L + h)}$$



4) Movimento da Água no solo

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



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

- 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

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

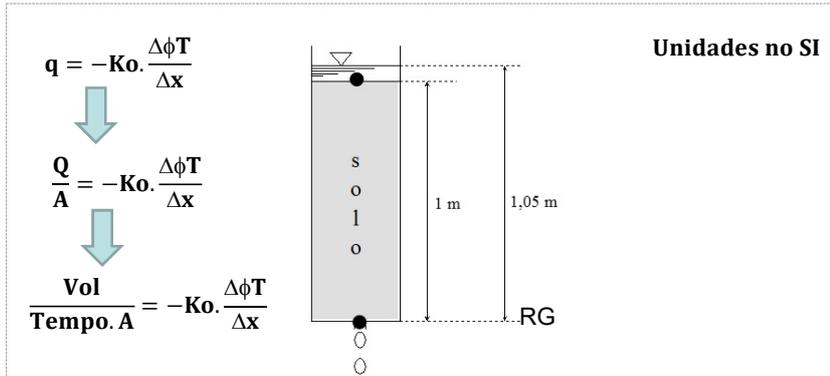
Resposta: $k_o = 0,792$ m/h



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 = $0,19 \text{ h}$ ou $11,4 \text{ minutos}$)



Solo Saturado (vertical):

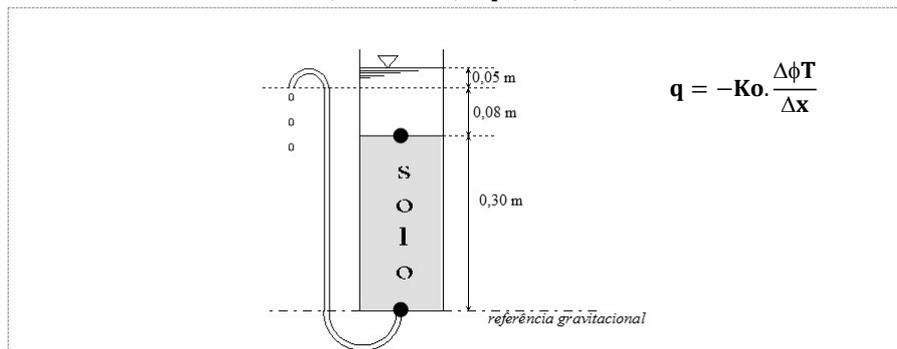
$$\Delta\phi T = (\phi p_{\text{cima}} + \phi g_{\text{cima}}) - (\phi p_{\text{baixo}} + \phi g_{\text{baixo}})$$

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



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 $0,014 \text{ mm/s}$? (Resposta: $-0,023 \text{ mm/s}$)



Solo Saturado (vertical):

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

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

$$\text{Resposta} = -2,33 \cdot 10^{-3} \text{ mm s}^{-1}$$



4) Movimento da Água no solo

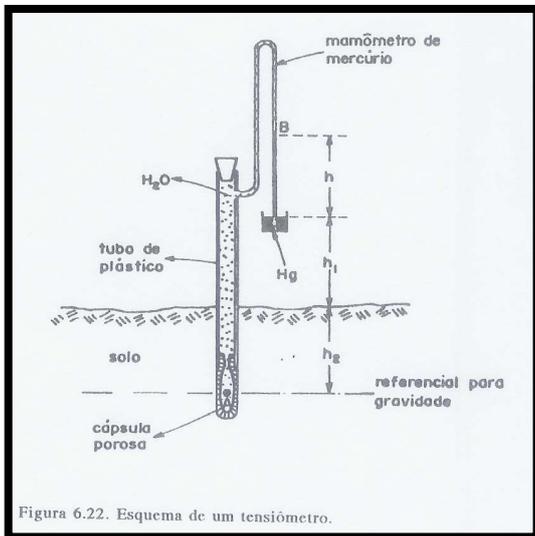


Figura 6.22. Esquema de um tensiômetro.

Potencial Mátrico
(Tensiômetro)

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

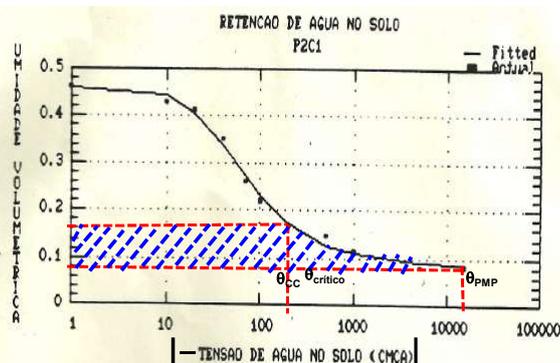
Potencial Mátrico
(Tensímetro)

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



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)

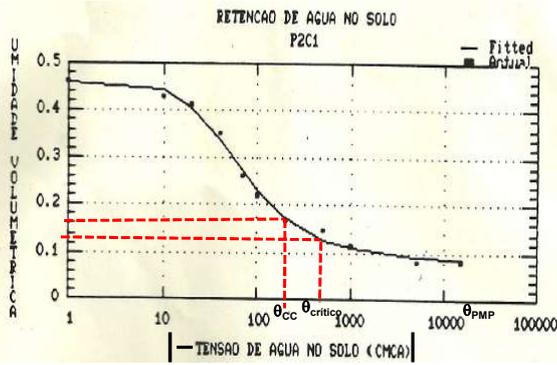
$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha \cdot |\phi_m|)^n\right]^m}$$

Solo não saturado



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)

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

↑ Negativo ϕm ↑ Solo Seco
 ↑ Positivo ϕm ↑ Solo Seco

Em módulo:



4) Movimento da Água no solo

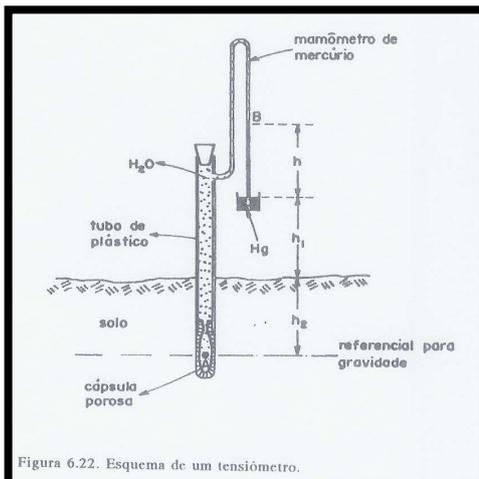
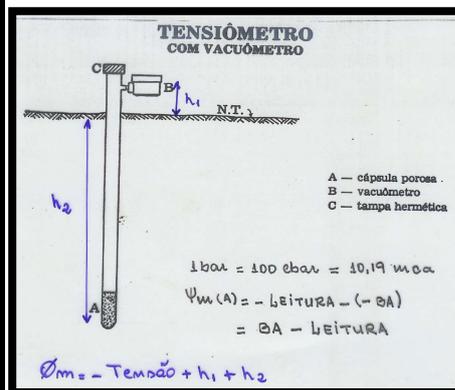


Figura 6.22. Esquema de um tensiômetro.



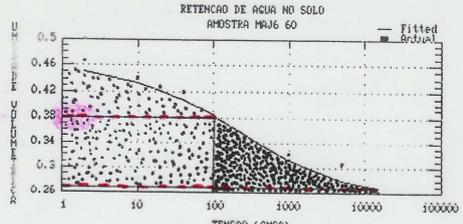
4) Movimento da Água no solo

Solo não saturado

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

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

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



RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO
AMOSTRA PAJ6 60

$X = \text{cm}^3/\text{cm}^3$
 $h = \text{cmca}$

$$X = 0,2613 + \frac{0,2054}{[1 + (0,00092 \times h)^{2,11}]^{0,53}}$$

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
5,71	21,90	72,39 *

Densidade de partículas = 2,69 g/cm³
Densidade do solo = 1,10 g/cm³

cc = 1/10 atm = textura grossa
** 1/3 atm = " fina*
PMP = 15 atm

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)?

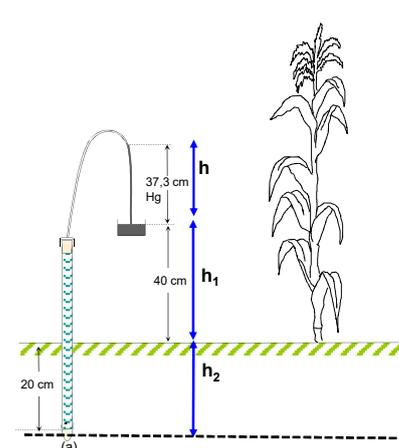
$$\phi_m = -12,6 \cdot h + h_1 + h_2$$

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

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

$$\phi_m = -T + h_1 + h_2$$

Resposta: 469,98 cm ou 46,099 kPa



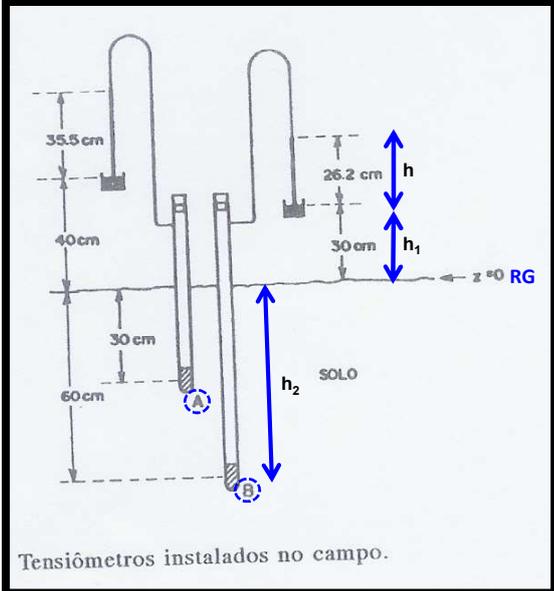
Sabendo-se que: 101325 Pa = 10,33 m ou 10,33 mca

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

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

$\phi_T = \phi_g + \phi_m$





Tensiômetros instalados no campo.

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



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

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) $\phi m_a = -38,2 \text{ cm}$, $\phi m_b = -22,1 \text{ cm}$, $\phi m_c = -6 \text{ cm}$

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

4) Movimento da Água no solo

Respostas:

a) $\phi m_a = -38,2 \text{ cm}$, $\phi m_b = -22,1 \text{ cm}$, $\phi m_c = -6 \text{ cm}$

PONTO C MAIS ÚMIDO

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

MOVIMENTO DE A para C



4) Movimento da Água no solo

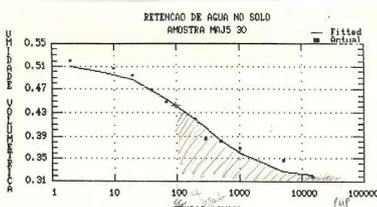
Exercícios:

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



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

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



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

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

Respostas:

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

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

$y(x) = \dots$

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	$\theta \text{ (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)}$		
	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

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

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

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

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

$$n = 0,61$$

$$m = 2,58$$

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

$$y(x) = \dots$$