

Solo → sistema constituído por um sistema de canais onde circula água e ar. Importante para o armazenamento de água e nutrientes

Espaço poroso - Morfologia  
- Volume ( dos vazios em relação ao volume aparente, determina a capacidade de armz. Água)

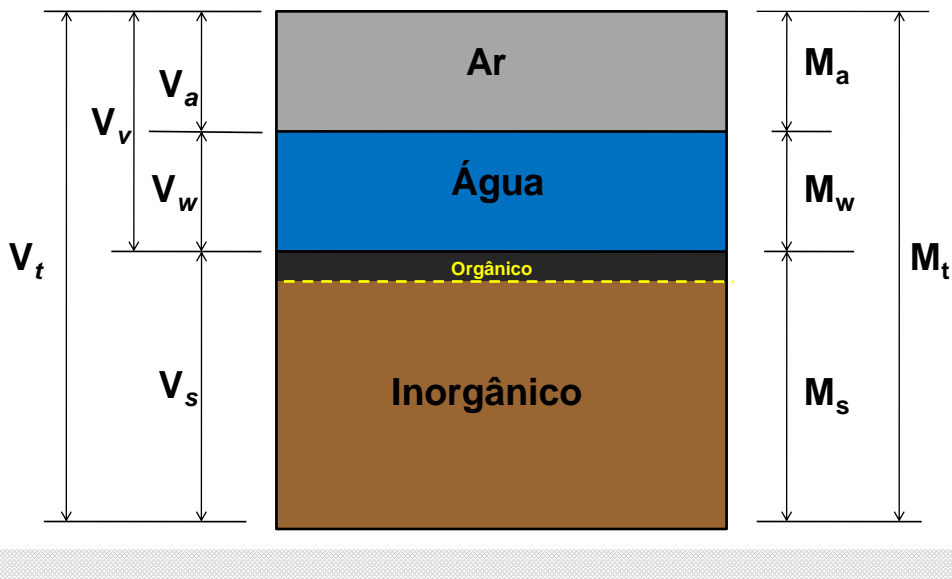
Micro-poros → Armz. de água no solo

Macro-poros → Movimento de água no solo



<http://espumasintetica.blogspot.com/>

## Relações Massa / Volume entre os componentes da matriz

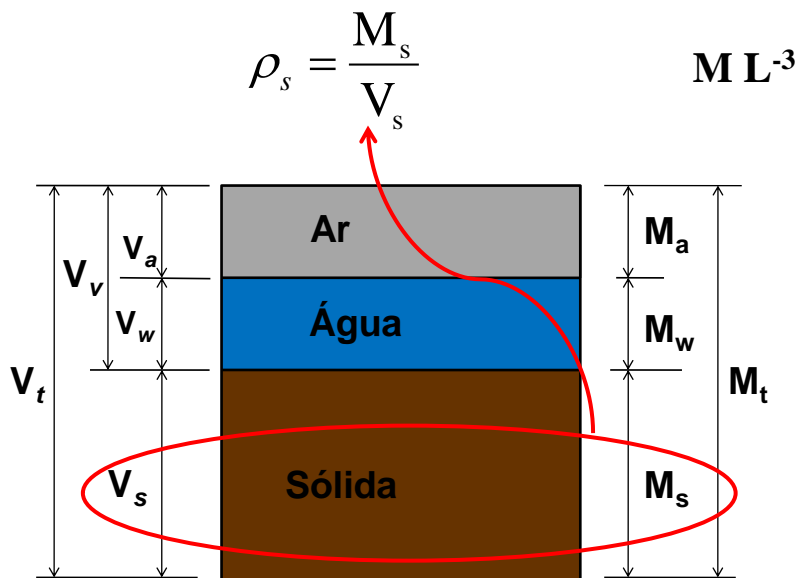
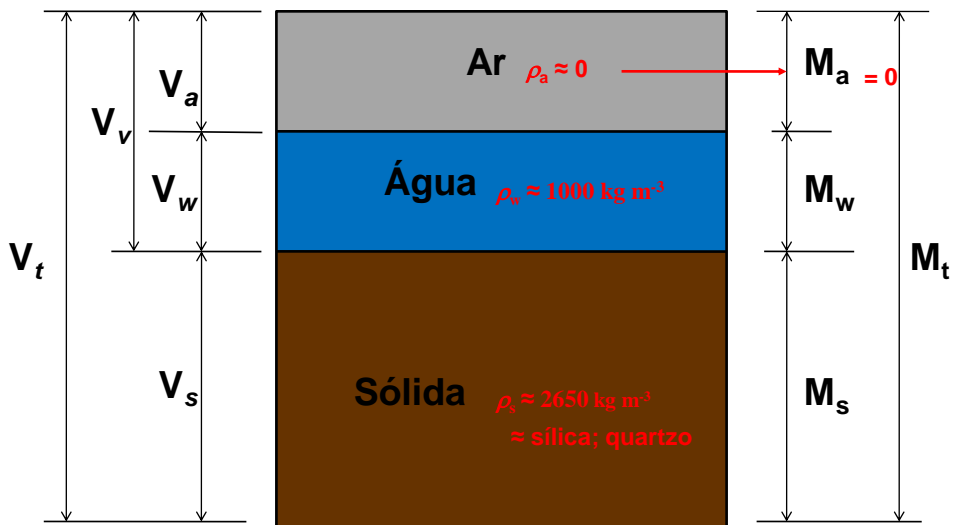


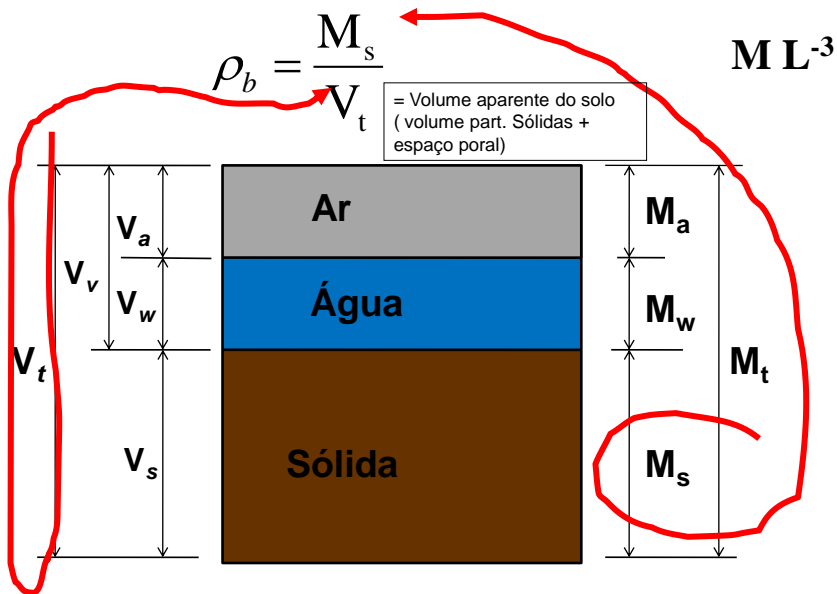
$$\text{Massa volúmica} = \frac{\text{Massa}}{\text{Volume}}$$

$$\rho_w \approx 1000 \text{ kg m}^{-3} = 1,0 \text{ g cm}^{-3}$$

$$\rho_s \approx 2650 \text{ kg m}^{-3} = 2,65 \text{ g cm}^{-3}$$

↑  
SI





Densidade real do solo;  $D_R = \frac{M_s}{V_s \times \rho_w}$   $L^0 M^0 T^0$

$\downarrow$   
 Volume real do solo

Massa volúmica água  
 =  $1g/cm^3$  a  $4^\circ C$



Massa do solo seco a 105 °C durante 24 h

Densidade aparente do solo;  $D_{ap} = \frac{M_s}{V_t \times \rho_w}$   $L^0 M^0 T^0$

Se  $\rho_a = 1 \text{ g/cm}^3$  a 4°C

$D_{ap} = \rho_{ap \text{ solo}}$



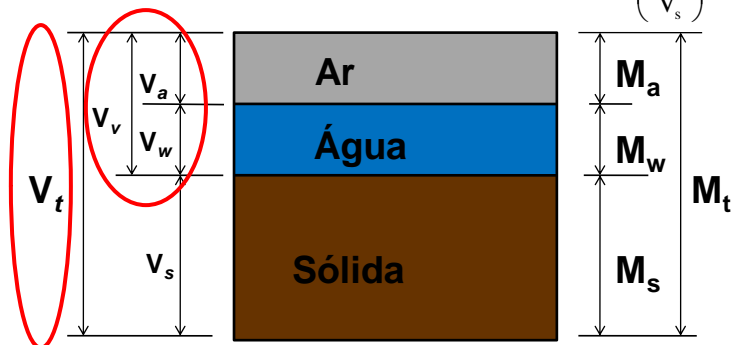
Porosidade;  $P = \frac{V_v (\text{vol. espaço. poral})}{V_t} \times 100 (\%)$   $L^0 M^0 T^0$

$P = \frac{V_a + V_w}{V_t} \rightarrow P = \frac{V_t - V_s}{V_t}$

$P = \left( 1 - \frac{D_{ap}}{D_r} \right) \times 100 (\%)$

(30 - 60%)

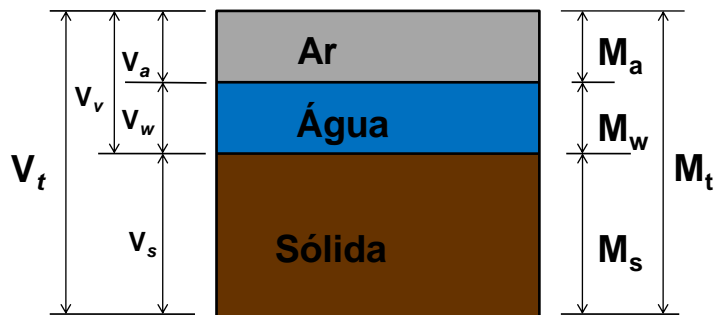
$1 - \frac{\left( \frac{M_s}{V_t} \right)}{\left( \frac{M_s}{V_s} \right)} = 1 - \frac{M_s V_s}{M_s V_t}$



• **Humidade volúmica;**

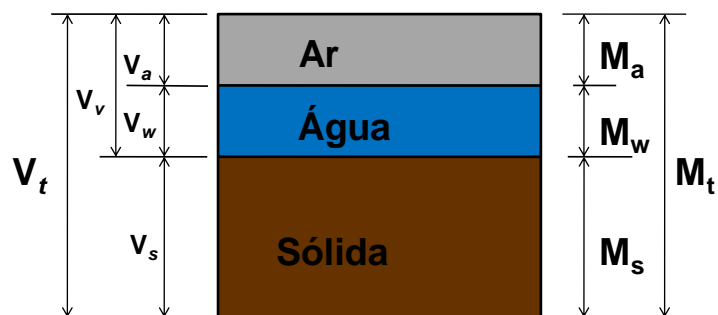
$$\theta_v = \frac{V_w}{V_t} \times 100(\%) = \frac{V_w}{V_s + V_v} \times 100(\%) \quad \text{ou } (\text{cm}^3 / \text{cm}^3) \text{ ou } (\text{m}^3 / \text{m}^3)$$

• **Humidade Ponderal;**  $\theta_p = \frac{M_w}{M_s} \times 100(\%) \text{ ou } (\text{g/g})$



**Grau de Saturação;**  $S = \frac{V_w}{V_a + V_w} = \frac{\theta_v}{P}$

**$L^0 M^0 T^0$**   
 Ou \*100 (%)  
 Solo Seco → ?  
 Solo Húmido → ?



Água no solo (maneiras de exprimir):



• Humidade ponderal

$$\theta_p = \frac{\overset{\text{Massa água}}{M_w}}{M_s} \times 100 (\%) \text{ ou } (\text{g/g})$$

• Humidade volúmica

$$\theta_v = \frac{\overset{\text{Volume água}}{V_w}}{V_t} \times 100 (\%) \text{ ou } (\text{cm}^3 / \text{cm}^3) \text{ ou } (\text{m}^3 / \text{m}^3)$$

$$\theta_v = \theta_p \times D_{ap}$$

• Altura equivalente

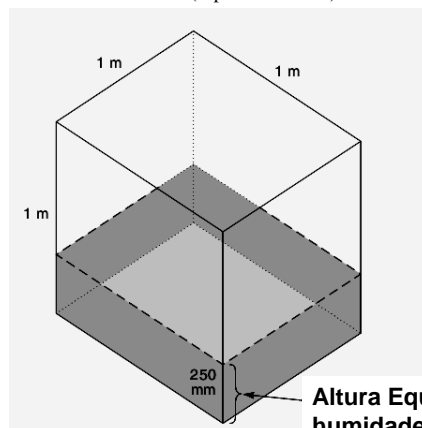
$$\theta_h = \theta_v \times Z$$

$$\theta_{h(mm)} = \theta_{v(\%)} \times Z_{(m)} \times 10$$

$$\theta_{h(mm)} = \theta_{v(decimal)} \times Z_{(m)} \times 1000$$

$$\theta_v = 0,25 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \Leftrightarrow \text{?????????????? STOP}$$

$$\theta_v = \frac{0,25 \text{ m} \times 1 \text{ m}^2 \text{ (superfície de água)}}{1 \text{ m} \times 1 \text{ m}^2 \text{ (superfície de solo)}}$$



Altura Equivalente para uma humidade volúmica de 0,25 m³/m³)

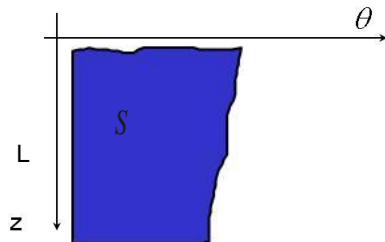
$$\text{se } Z = 1 \text{ m} \rightarrow \theta_{h(mm)} = \theta_{v(dec.)} \times 1000$$

$$\text{se } Z \neq 1 \text{ m} \rightarrow \theta_{h(mm)} = \theta_{v(dec.)} \times Z_{(m)} \times 1000$$



## Perfil de humidade do solo em profundidade

- Teor de humidade varia com o tempo e profundidade



• Armazenamento de água

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

• Teor de humidade medio

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_i \cdot \Delta z_i}{\sum_{i=1}^n \Delta z_i}$$

Espessura do solo

## MEASUREMENT OF SOIL WETNESS

### Gravimetric

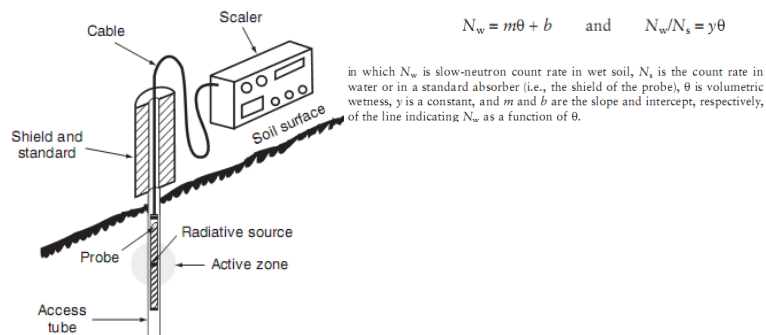
$$\theta_p = \frac{(\text{wet weight}) - (\text{dry weight})}{\text{dry weight}} = \frac{\text{weight loss in drying}}{\text{weight of dried sample}}$$



$$\theta_p = \frac{M_w}{M_s} \times 100 (\%) \text{ ou } (g/g)$$



## Neutron Scattering



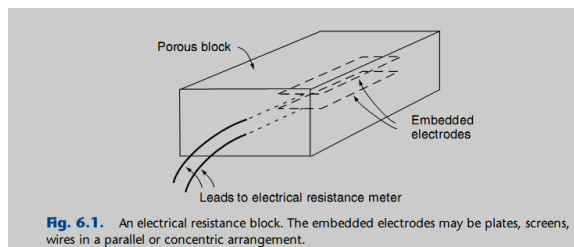
**Fig. 6.2.** Components of a portable neutron soil-moisture meter, including a probe (with a source of fast neutrons and a detector of slow neutrons) lowered from a shield containing hydrogenous material (e.g., paraffin, polyethylene) into the soil via an access tube. A scaler-rate meter is shown alongside the probe. Recent models incorporate the scaler into the shield body, and the integrated unit is lightweight for easy portability.

É um método indirecto de determinação do teor em água do solo, medindo a quantidade de hidrogénio existente no solo. É um método prático usado na medição da água volumétrica do solo. O uso deste método envolve a medição da perda de energia sofrida no solo por neutrões de elevada energia emitidos a partir de uma fonte radioactiva.

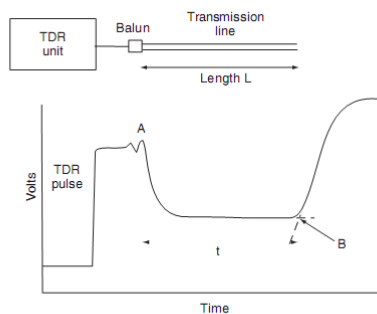
18

## Electrical Resistance

The electrical resistance of a soil body depends not only on its water content, but also on its composition, texture, and soluble-salt concentration. On the other hand, the electrical resistance of porous bodies placed in the soil and left to equilibrate with soil moisture can sometimes be calibrated against soil wetness. Such units (called *electrical resistance blocks*) generally contain a pair of electrodes embedded in a porous material such as gypsum, nylon, or fiber-glass. (See Fig. 6.1.)



### Time-Domain Reflectometry (TDR)



$$\epsilon_r = (ct/2L)^2$$

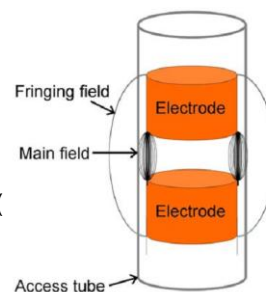
the **dielectric constant** as a function of the soil's volume wetness is only weakly dependent on soil type, bulk density, temperature, or the electrical conductivity of pore water.

**Fig. 6.4.** The essential components of a TDR system (above) and an idealized TDR output trace (obtainable with an oscilloscope) showing how the propagation time is determined. (After Topp and Davis, 1985.)

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.9 \times 10^{-2}\epsilon_r - 5.5 \times 10^{-4}\epsilon_r^2 + 4.3 \times 10^{-6}\epsilon_r^3$$

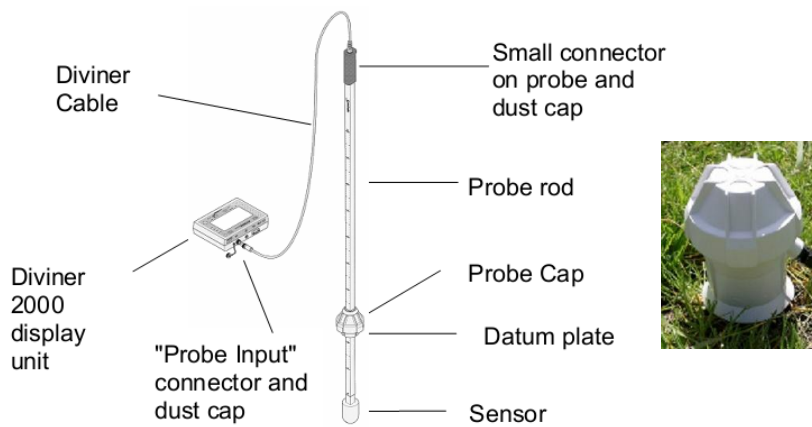
### Método FDR (sondas capacitivas)

- Constituídas por um par de anéis (elétrodos) separados por uma área que não conduz energia elétrica (dielétrico= isolante)
- A matriz solo-água-ar forma o meio dielétrico do capacitor (= condensador) quando o sensor é inserido no tubo de acesso e é aplicado uma campo de alta frequência
- O campo elétrico entendesse através do tubo para o solo
- A frequência das oscilações (MHz) é gravada e depende da **constate dielétrica aparente do solo (Ka)**; i.e., resistência ao fluxo de energia eletrica; **K=1** para ar e **K=80** para a água, Ka varia consoante o conteúdo em água do solo ( e.g., solo seco Ka=3-5)
- Capacitância (**C**)– Qt de carga que é necessária para aumentar a voltagem em 1 Volt entre os dois pares de anéis



$$C = \frac{Q}{V}$$

C → farad (F).  
1 F = 1 Coulomb/Volt.



Components of the Diviner 2000 display unit and probe

A água no solo está sob a acção de três forças:

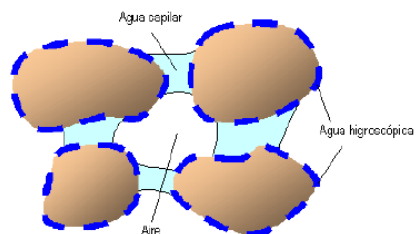
- ☐ Forças de adsorção – higroscópicas;
- ☐ Forças de sucção – capilar;
- ☐ Forças gravitacionais – gravitacional.

Perante estas forças pode-se classificar a água do solo em:

**Água Higroscópica** – água fixada por adsorção nas superfícies dos colóides, não está disponível para as plantas, sofre translocações no estado de vapor;

**Água capilar** – água sujeita a fenómenos de capilaridade, constituindo películas contínuas em torno das partículas terrosas e nos microporos e deslocando-se com preenchimento dos espaços intersticiais (é a água com maior importância para as plantas).

**Água gravitacional** – água que não é retida pelo solo, deslocando-se apenas nos macroporos sob acção da gravidade, em geral esta água não é utilizada pelas plantas



## Potencial da água no solo

A grandeza Energia (unidade Joule no SI) pode ser classificada de diversas formas

....(ex.)  $\approx 0$  Energia cinética ( =  $\frac{1}{2} m v^2$ )

## Energia potencial

Para a descrição do estado energético Água no solo, pode-se expressar:

$$\frac{E}{M} = \frac{M \cdot L^2 \cdot T^{-2}}{M} = L^2 \cdot T^{-2} \quad (\text{joule/kg})$$

$$\frac{E}{V} = \frac{M \cdot L^2 \cdot T^{-2}}{L^3} = M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2} \quad \frac{J}{m^3} = \frac{N \cdot m}{m^3} = \frac{N}{m^2} = \text{Pa (pressão)}$$

$$\frac{E}{P} = \frac{M \cdot L^2 \cdot T^{-2}}{M \cdot L \cdot T^{-2}} = L \quad \frac{J}{N} = \frac{N \cdot m}{N} = m \text{ (distância, altura)} \quad \text{(Carga Hidráulica)}$$

## Componentes

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Total} & & \text{Gravitacional} & & & & \text{Osmótico} \\ \downarrow & & \downarrow & & & & \downarrow \\ \psi_t & = & \psi_g & + & \psi_P & + & \psi_m & + & \psi_o \\ & & & & \uparrow & & \uparrow & & \\ & & & & \text{Pressão} & & \text{Mátrico} & & \end{array}$$

Trabalho necessário para transferir virtualmente, num campo de forças, a quantidade unitária de água de um ponto de referencia So para o ponto S

## $\psi_g$ - Potencial Gravitacional

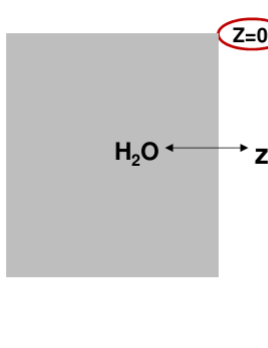


Diagram illustrating the gravitational potential  $\psi_g$  in a water column. A vertical axis  $z$  is shown, with the origin  $z=0$  at the top surface of the water. The axis points downwards, indicating that  $z$  increases in the downward direction.

$$\psi_g = \frac{m \times g \times (-z)}{V} = -\rho \times g \times z$$

$$\psi_g = \frac{m \times g \times (-z)}{m} = -g \times z$$

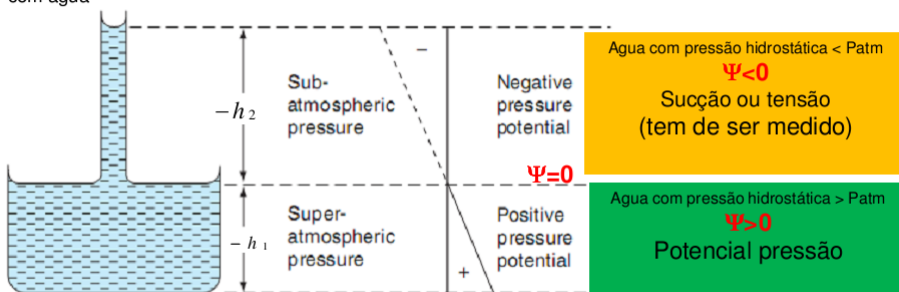
$$\psi_g = \frac{m \times g \times (-z)}{m \times g} = -z$$

eixo 0Z orienta-se positivamente para baixo

O potencial gravitacional num ponto qualquer é determinado pela sua distância a um referencial (sup.do solo como origem / **Referencial**)

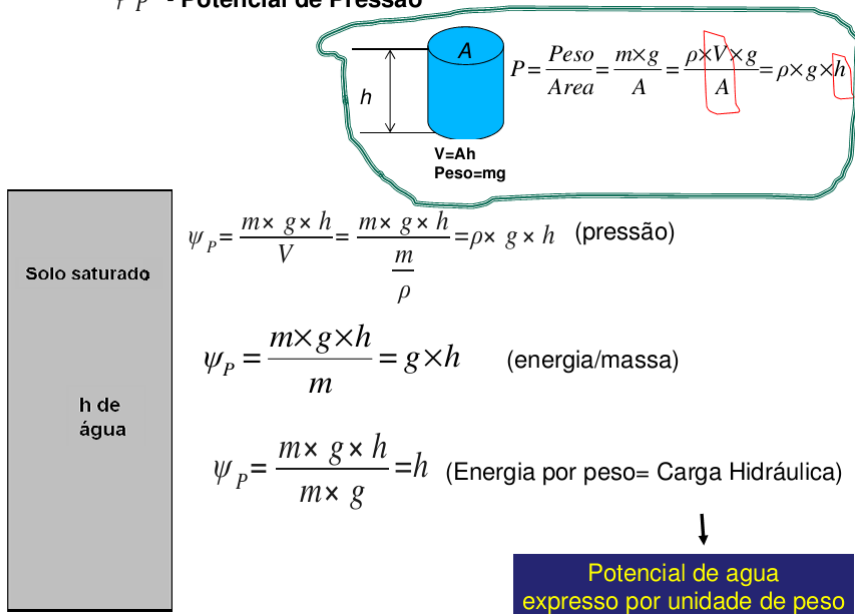
## $\psi_p$ - Potencial de Pressão

Coluna capilar do solo introduzida numa tina com água

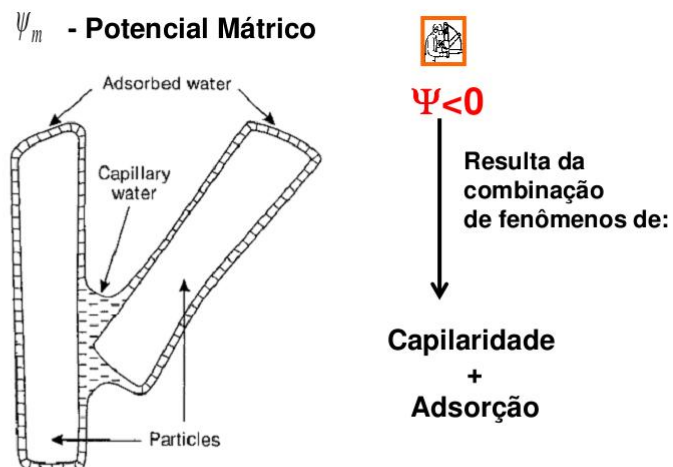


Potencial de sucção / mátrico e o Potencial pressão são mutuamente exclusivos

$\psi_P$  - Potencial de Pressão



$\psi_m$  - Potencial Mátrico



**Fig. 6.7.** Water in an unsaturated soil is subject to capillarity and adsorption, which combine to produce a "negative" matric potential, or a matric suction.

## $\psi_m$ - Potencial Mátrico

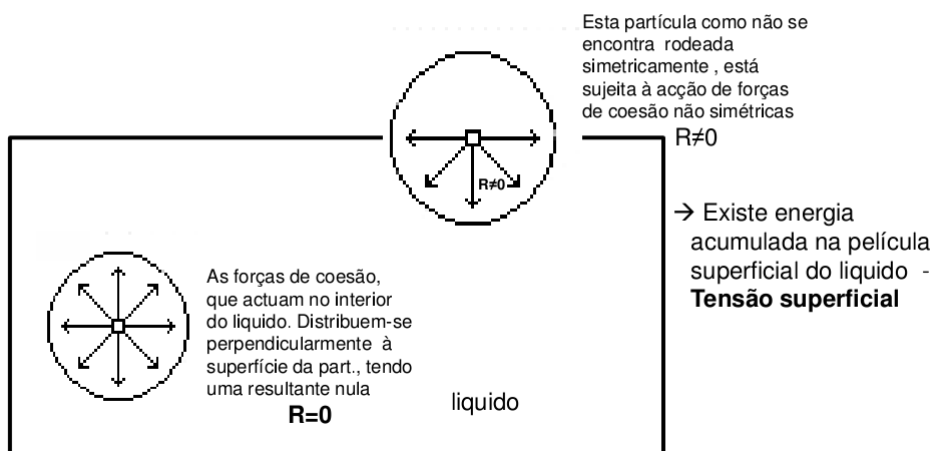
-É o resultado da acção das forças de ligação entre a fase sólida e a água

→ Adsorção directa das moléculas de água

→ Forças electrostáticas entre os iões na solução do solo e as partículas sólidas

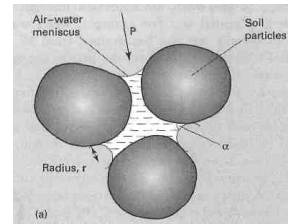
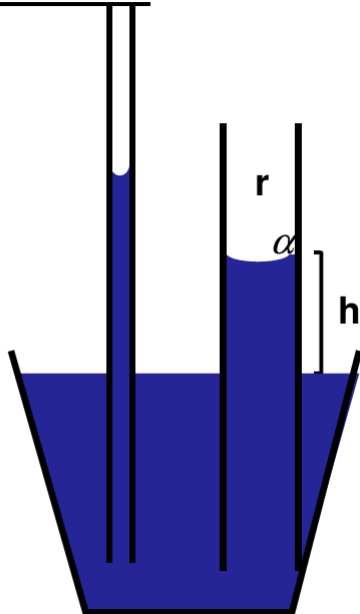
→ Forças de ligação capilar, resultante da tensão superficial, interface líquido-sólido – ar

## Tensão superficial ( $\sigma$ )





## Capilaridade



$$h = \frac{2\sigma \cos \alpha}{(\rho_w - \rho_{ar}) g r}$$

$\approx 0$

$\psi_o$  - Potencial Osmótico

$\approx 0$  (devido às baixas concentrações das soluções do solo - solos não salinos)

$$\psi_o = -RTC_s$$

$R$  - Constante do gás

$C_s$  - concentração de sais

Therefore, it is common to characterize the state of soil water in terms of the total potential head, the gravitational potential head, and the pressure potential head, which are usually expressible in meters. Accordingly, instead of

$$\psi_t = \psi_g + \psi_p + \psi_m + \psi_o \approx 0$$

$$H = h - z \quad (\text{Energia por peso} \Leftrightarrow \text{Carga Hidráulica})$$

h  
 Não saturado < 0 (–)  
 Nível freático = 0  
 Saturado > 0 (+)

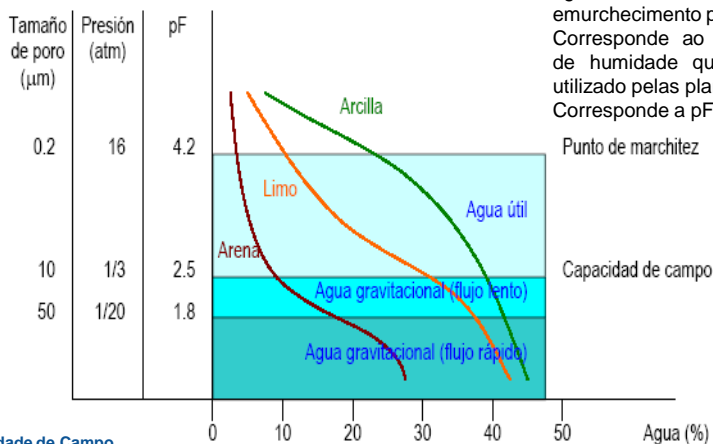
{ }



36

#### Coefficiente de Emurchecimento

Ponto a partir do qual, as plantas não conseguem retirar água do solo, e atingem o emurchecimento permanente. Corresponde ao limite inferior de humidade que pode ser utilizado pelas plantas. Corresponde a pF 4,2.



#### Capacidade de Campo

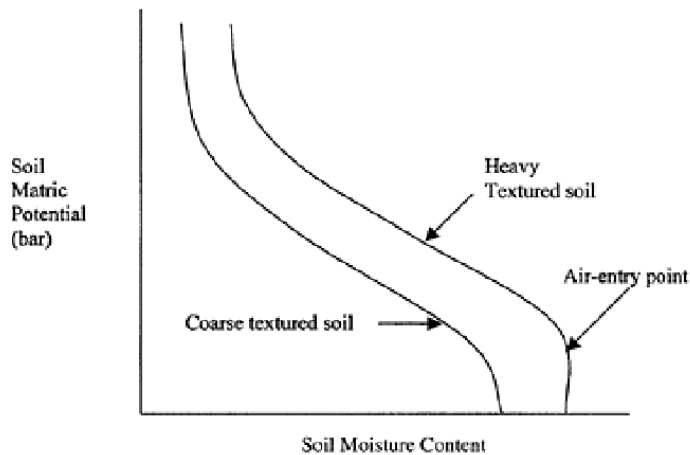
Corresponde ao teor de humidade que um solo retém quando, depois de ter cessado o movimento gravitacional, o movimento de água capilar decresce continuamente.

É o limite superior de retenção de água pelo solo que é utilizado pelas plantas.

Corresponde a pF 2,54

### Curvas características do solo

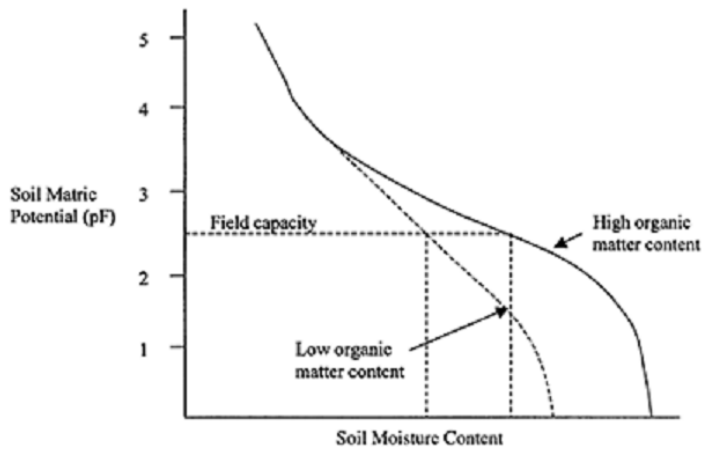
The fundamental relationship between soil's moisture content ( $\theta$ ) and soil-matric potential ( $\Phi_m$ ) is called "soil moisture characteristics," "soil moisture characteristic curve," or "pF curve."



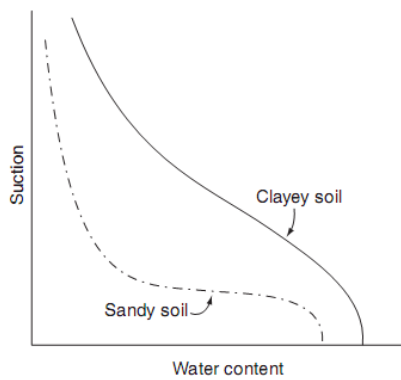
**TABLE 11.5** Soil Moisture Characteristic for Two Soils of Contrasting Texture

Soil wetness	Soil matric potential			Volumetric wetness ( $\theta$ )	
	cm of H <sub>2</sub> O	pF	Log .base 10 da tensão capilar em cm de c.a .	Heavy-textured	Light-textured
Saturated	1	0		0.60	0.40
Wet	10	1	Free Water	0.60	0.38
	50	1.7	↕	0.55	0.35
	100	2		0.50	0.25
	330	2.5	Field Moisture Capacity	0.45	0.18
Moist	1000	3	↕	0.40	0.15
	10,000	4		0.35	0.12
	15,000	4.2	Permanent Wilting Point	0.20	0.07
	30,000	4.47	↕	0.15	0.02
Dry	100,000	5	Residual water	0.10	0.005
	1,000,000	6		0.06	0
	10,000,000	7	Bonded water	0.05	0

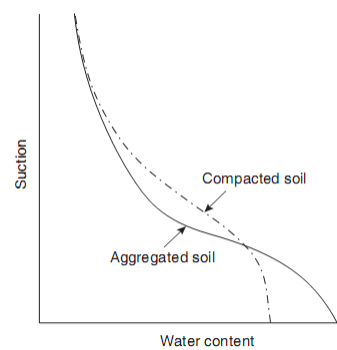
1 atm = 101 325 Pa = 1,01325 bar ≈ 1,033 atm = 1 033 cm c.a. → pF ≈ 3



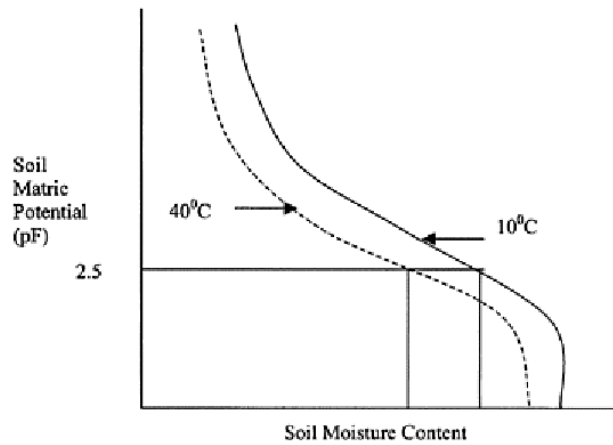
**FIGURE 11.6** The pF curve of soils of similar texture but with high and low organic matter content.



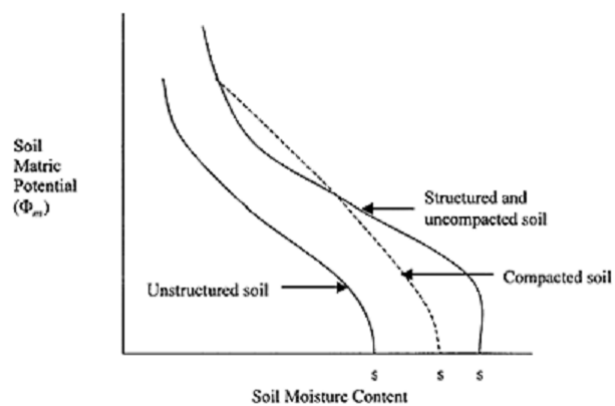
The effect of texture on soil-water retention.



The effect of soil structure on soil-water retention.

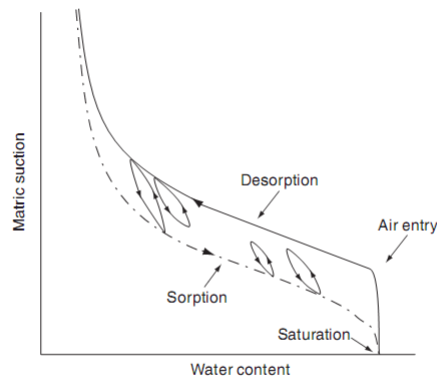


**FIGURE 11.7** Soil moisture retention decreases with an increase in room temperature.



**FIGURE 11.8** Effect of soil structure on pF curves.

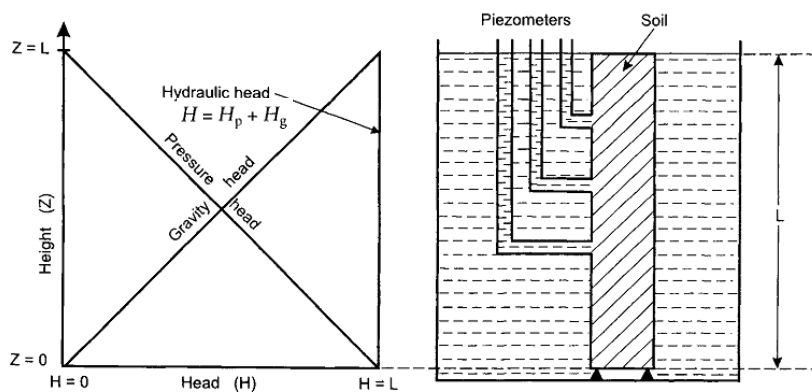
## SOIL-MOISTURE HYSTERESIS



Para o mesmo solo podemos ter vários valores de  $h(\theta)$ , consoante o solo se encontra sujeito a humedecimento ou secagem ...

**Fig. 6.10.** Suction vs. water content curves in sorption and desorption. The intermediate loops are scanning curves, representing complete or partial transitions between the main branches.

## GRAVITATIONAL, PRESSURE, AND TOTAL HYDRAULIC HEADS

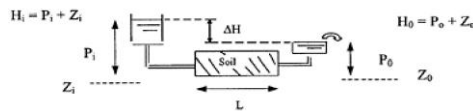


**Fig. 7.4.** Distribution of pressure, gravity, and total hydraulic heads in a vertical column immersed in water, at equilibrium.

# PRINCIPLES OF WATER MOVEMENT

Darcy's Law

$$\Delta H = \frac{H_i - H_o}{L}$$



where  $H_i$  and  $H_o$  are the hydraulic head maintained at inlet and outlet of the soil matrix, respectively, and  $L$  is the length of flow or soil matrix. If volume of water flowing through the soil matrix is  $V$  ( $L^3$ ) in time  $t$  (T), then the volumetric flow rate ( $Q/t$ ,  $L^3T^{-1}$ ) across the column is  $V/t$ .

FIGURE 12.2 Flow across the cylindrical system.

$$Q = \frac{V}{t} \quad \text{or} \quad Q \propto \frac{A(H_i - H_o)}{L}$$

Gradiente de carga hidráulica – é a diferença da carga hidráulica por unidade de distancia → força motor para o movimento

$$Q = K_s \frac{A(H_i - H_o)}{L}$$

( $K_s$ ) proportionality constant in known as "saturated hydraulic conductivity ( $LT^{-1}$ )"

$$\frac{Q}{A} = K_s \frac{\Delta H}{L}$$

$$q = K_s \frac{\Delta H}{L} \quad \left[ LT^{-1} = K_s \frac{L}{L} = K_s \right]$$

$q$  is the flow per unit cross sectional area per unit time ( $LT^{-1}$ ), and is called flux flux density.

$$q = -K(\theta) \frac{\Delta H}{L} \left[ \frac{L}{T} = \frac{L}{T} \cdot \frac{L}{L} \right]$$

Significa que o movimento se processa no sentido decrescente

$K(\theta)$  is the unsaturated hydraulic conductivity of the porous medium.

$$\psi_t = \psi_g + \psi_P + \psi_m + \tilde{\psi}_o^0$$

$H = h - z$  (Energia por peso  $\Leftrightarrow$  Carga Hidraulica )

$$h \begin{cases} \text{Não saturado} < 0 (-) \\ \text{Nível freático} = 0 \\ \text{Saturado} > 0 (+) \end{cases}$$

## MEASUREMENT OF SOIL-MOISTURE POTENTIAL

The tensiometer is an instrument designed to provide a continuous indication of the soil's *matric suction* (also called *soil-moisture tension*) *in situ*.

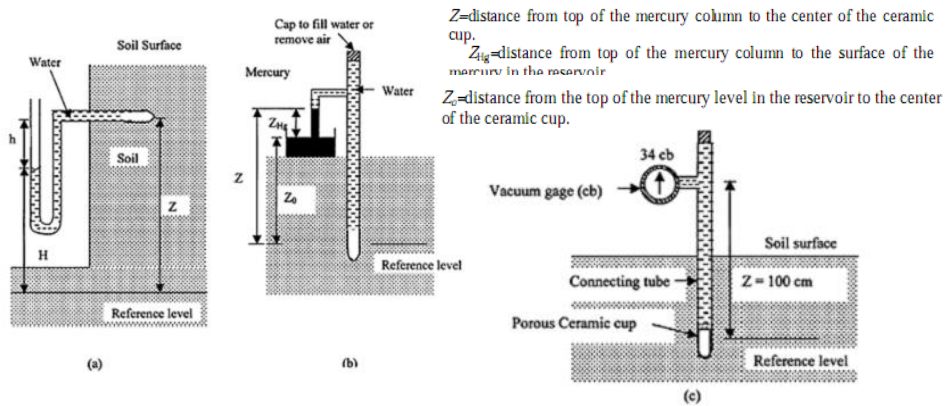


FIGURE 11.3 Different types of tensiometers:

- (a) a water manometer connected to a ceramic cup installed in soil at the designated depth,  $\Phi_m$  equals  $-h$ ;
- (b) a mercury manometer connected to a ceramic cup installed in soil at the desired depth,  $\Phi_m = -Z_{Hg} \times 13.6 + Z$ ;
- (c) a vacuum gauge tensiometer,  $\Phi_m = -34 \times 10 \text{ cm} + 100 \text{ cm} = -240 \text{ cm}$ .  $\rightarrow$  Qto + negati. for menor vai ser o teor de humid.