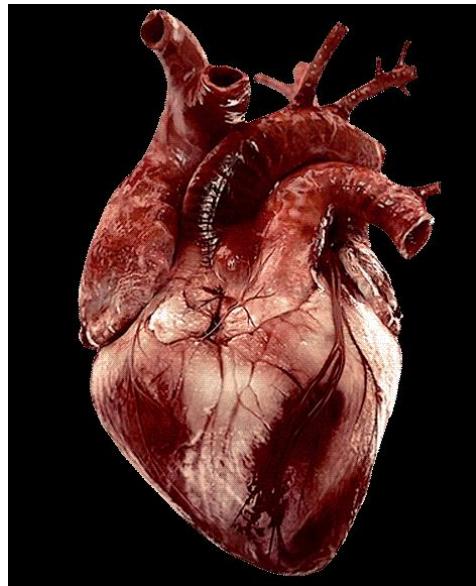
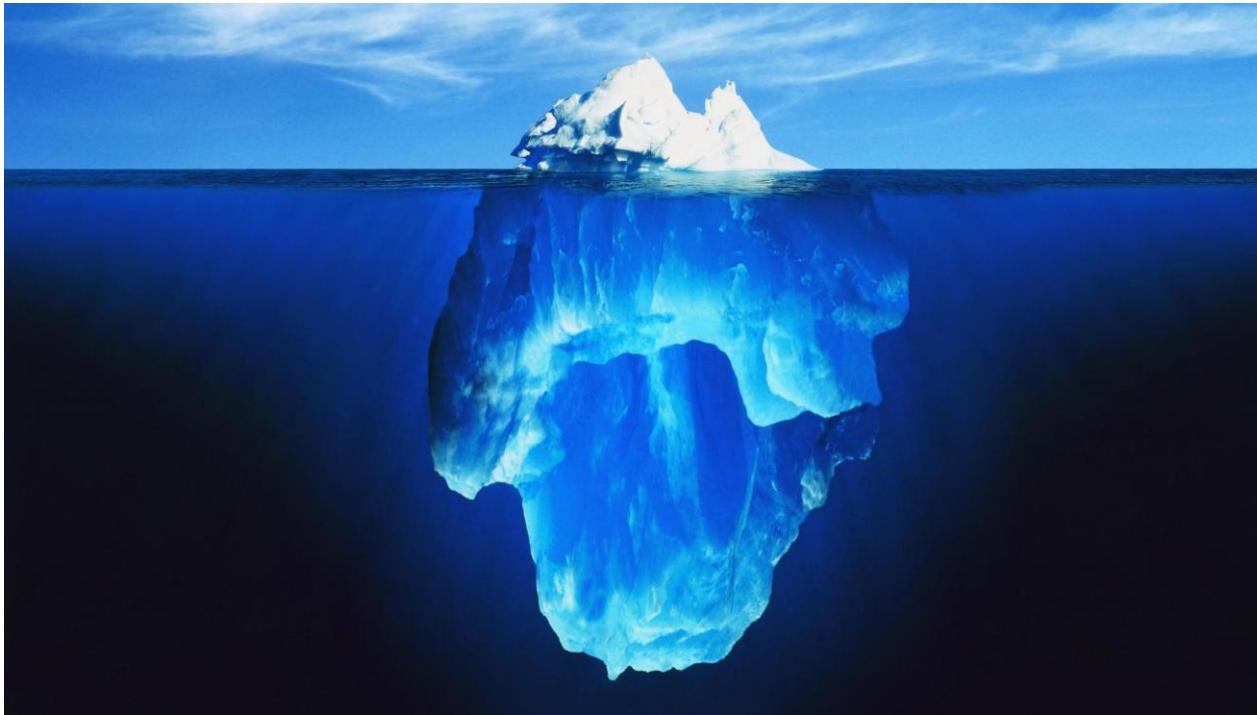
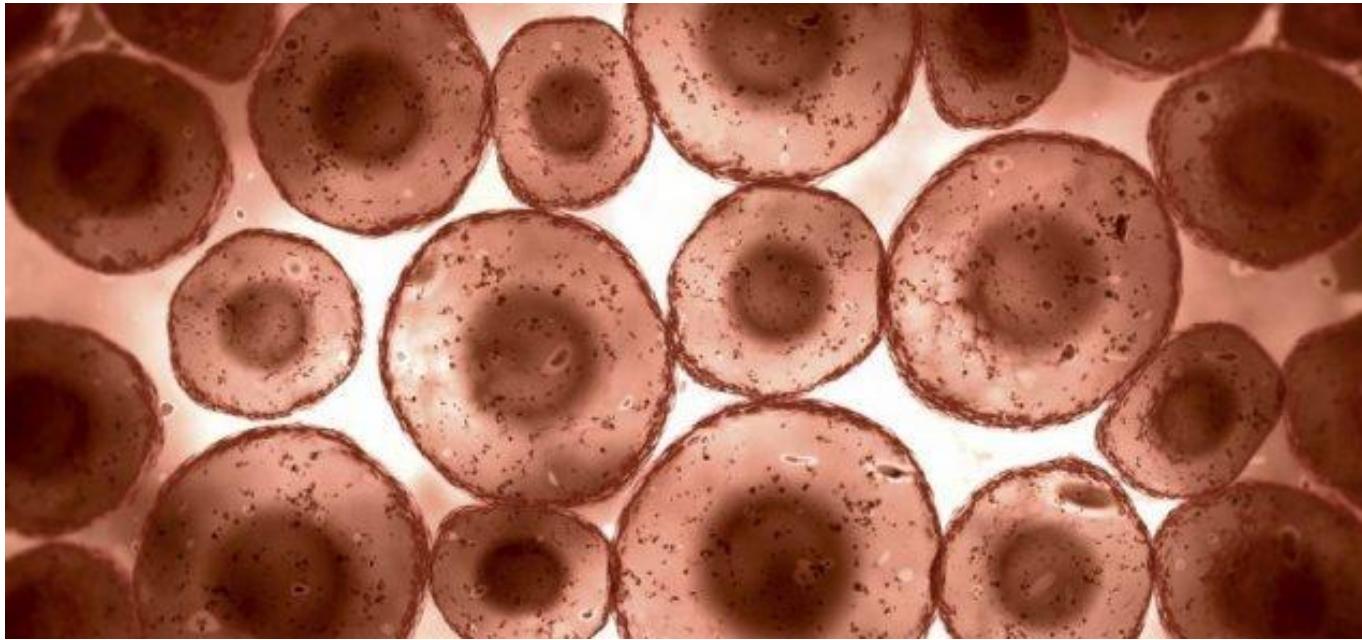


# F106 – Fundamentos de Física para Biologia

## Fluidos e Transporte





# Mecânica dos fluidos

**Fluido** – De uma maneira geral, o fluido é caracterizado pela relativa mobilidade de suas moléculas que, além de apresentarem os movimentos de rotação e vibração, possuem movimento de translação e portanto não apresentam uma posição média fixa no corpo do fluido.

**Mecânica dos Fluidos** – Ciência que trata do comportamento dos fluidos em repouso (Hidrostática) e em movimento (Hidrodinâmica). Estuda o transporte de quantidade de movimento nos fluidos.

# Mecânica dos fluidos

Quais as diferenças fundamentais entre fluido e sólido?

- Fluido é mole e deformável
- Sólido é duro e muito pouco deformável

**Em linguagem mais técnica:** a diferença fundamental entre sólido e fluido está relacionada com a estrutura molecular:

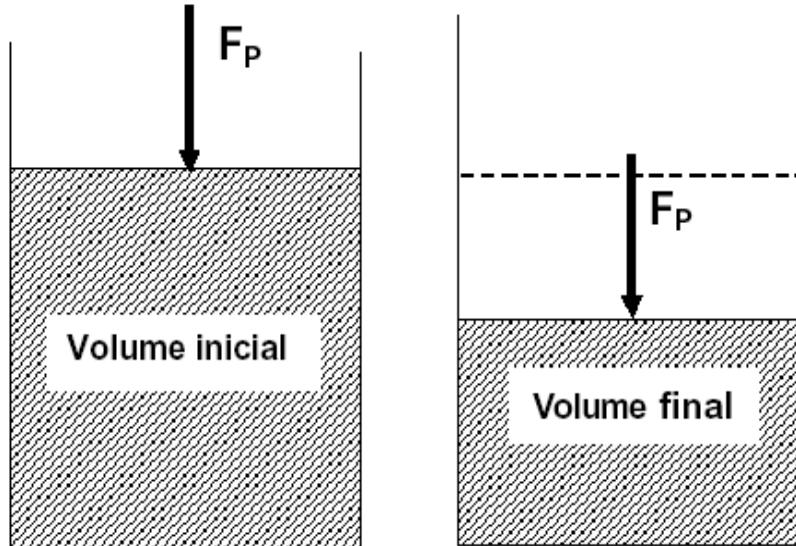
**Sólido:** as moléculas sofrem forte força de atração (estão muito próximas umas das outras) e é isto que garante que o sólido tem um formato próprio;

**Fluido:** apresenta as moléculas com um certo grau de liberdade de movimento (força de atração pequena) e não apresentam um formato próprio.

# Mecânica dos fluidos

Quais as diferenças fundamentais entre líquidos e gases?

A principal distinção entre sólido e fluido, é pelo comportamento que apresentam em face às forças externas.



Se uma força de compressão fosse usada para distinguir um sólido de um fluido, este último seria inicialmente comprimido, e a partir de um certo ponto ele se comportaria exatamente como se fosse um sólido, isto é, seria incompressível.

# Mecânica dos fluidos

Quais as diferenças fundamentais entre líquidos e gases?

## Líquidos:

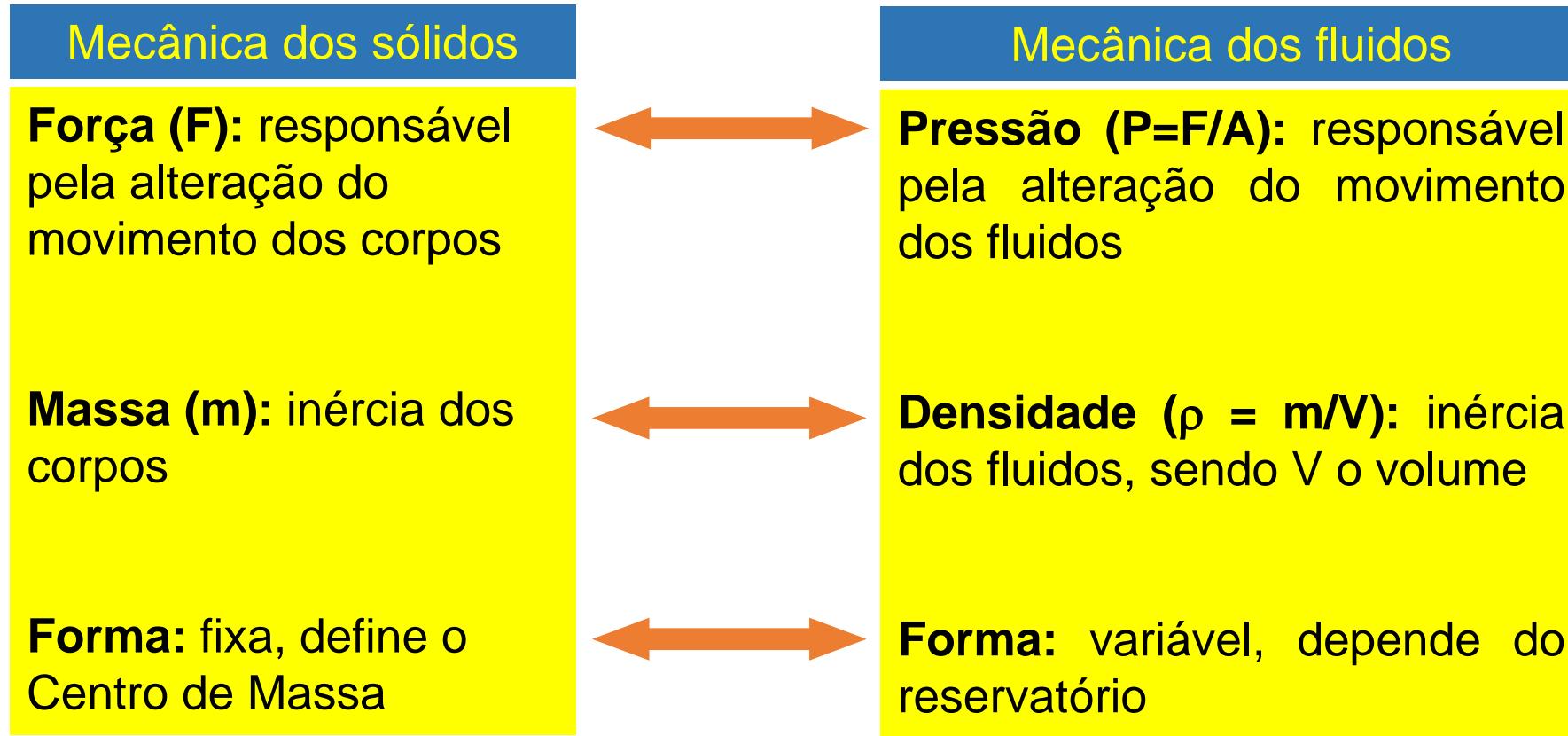
- Assumem a forma dos recipientes que os contém;
- Apresentam um volume próprio (constante);
- Podem apresentar uma superfície livre;

## Gases e vapores:

- apresentam forças de atração intermoleculares desprezíveis;
- não apresentam nem um formato próprio e nem um volume próprio;
- ocupam todo o volume do recipiente que os contém.

# Mecânica dos fluidos

## Grandezas fundamentais da Mecânica dos Fluidos



# Estática dos fluidos

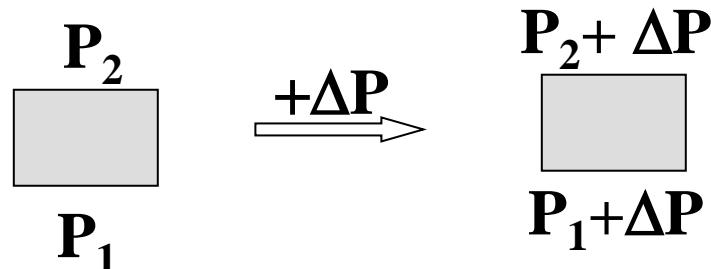
**Pressão:**  $P = F/A$

onde  $F$  é a força normal à superfície de área  $A$

**Unidade:**  $u(P) = u(F)/u(A) = N/m^2 = \text{Pascal (Pa)}$

Outras unidades não SI:

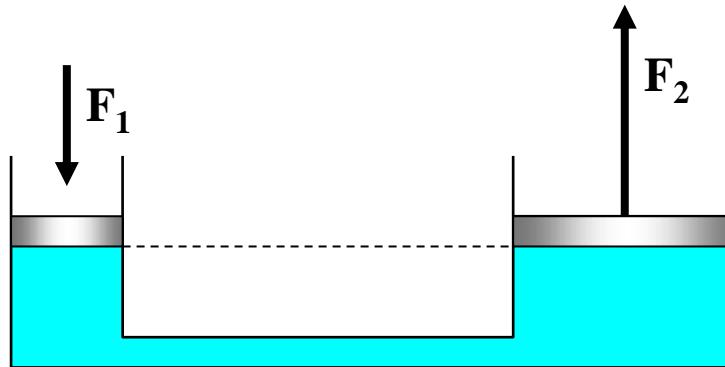
Torr, atm, bar, mm de Hg,  $\text{kgf}/\text{cm}^2$ , pound/sq.inch (psi), etc.



**Princípio de Pascal:** A pressão aplicada a um fluido confinado se transmite integralmente a todos os pontos do fluido.

# Estática dos fluidos

**Princípio de Pascal:** A pressão aplicada a um fluido confinado se transmite integralmente a todos os pontos do fluido.



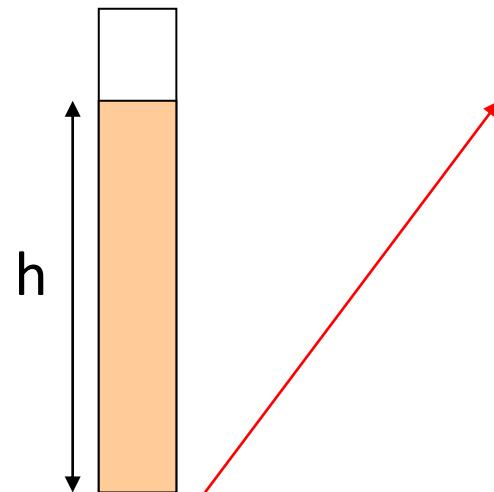
$$\left. \begin{array}{l} P_1 = \frac{F_1}{A_1} \\ P_2 = \frac{F_2}{A_2} \end{array} \right\} \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \Rightarrow F_2 = \frac{A_2}{A_1} F_1$$

Portanto, se  $A_2 > A_1$  então  $F_2 > F_1$

# Estática dos fluidos

## Pressão devido a uma coluna de fluido – Lei de Stevin

Seção reta A



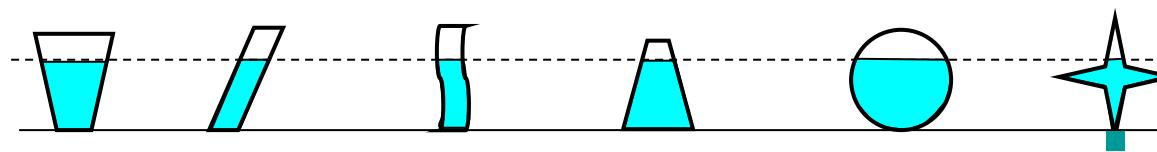
A força atuante, na base, é

$$F = mg = \rho V g = \rho A h g$$

Desta forma, a pressão será

$$P = \frac{F}{A} = \rho g h$$

## Paradoxo hidrostático



# Estática dos fluidos

## Pressão Atmosférica Normal

Para uniformizar estudos que dependem das condições atmosféricas, adota-se um valor padrão para as condições normais de temperatura e pressão;

Os valores da atmosfera padrão, no nível do mar são:

$$p = 760,0 \text{ mmHg} = 101,325 \text{ kPa}$$

$$T = 15^\circ\text{C} = 288\text{K}$$

$$\rho = 1,2232 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma = 11,9 \text{ N/m}^3$$

$$\mu = 1,777 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$$

# Estática dos fluidos

## Pressão Atmosférica Normal

Frequentemente se especificam as pressões dando a altura da coluna de mercúrio que a 0°C exerce a mesma pressão;

Assim, é costume expressar a pressão em **milímetros de mercúrio** (mmHg), unidade de pressão que recebe, também, o nome de **Torr** em homenagem a Torricelli:

$$1 \text{ mmHg} = 1 \text{ Torr} = 13,5955 \text{ g/cm}^3 \times 980,665 \text{ cm/s}^2 \times 0,1 \text{ cm} = 133,326 \text{ Pa}$$

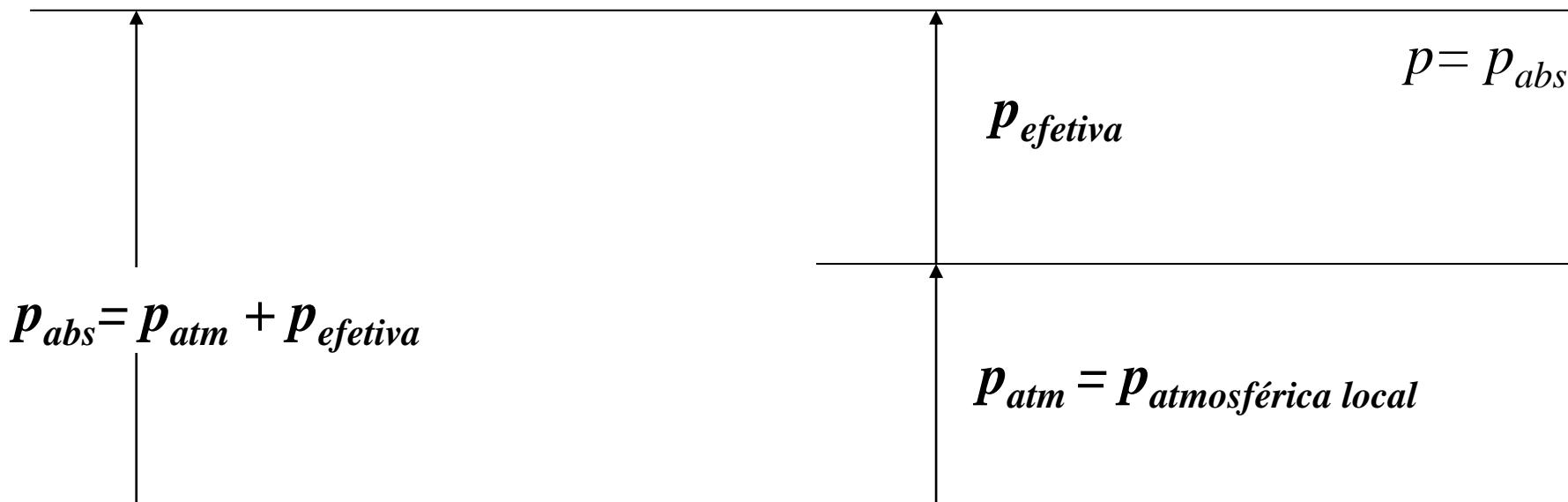
$$1 \text{ cmHg} = 10 \text{ Torr} = 1333 \text{ Pa}$$

# Estática dos fluidos

## Medidas da pressão

- As medidas de pressão são realizadas em relação a uma determinada pressão de referência;
- Adota-se como referência a pressão nula existente no vácuo absoluto ou a pressão atmosférica local;

$$p=0 \text{ (vácuo absoluto)}$$

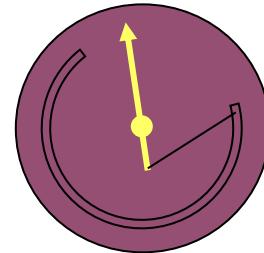


# Estática dos fluidos

## Medidas da pressão

- **Manômetros:** Indicam a diferença entre a pressão medida e a pressão atmosférica local;

Os Manômetros medem a pressão efetiva que pode ser positiva ou negativa (pressões de vácuo – menores que a pressão atmosférica);



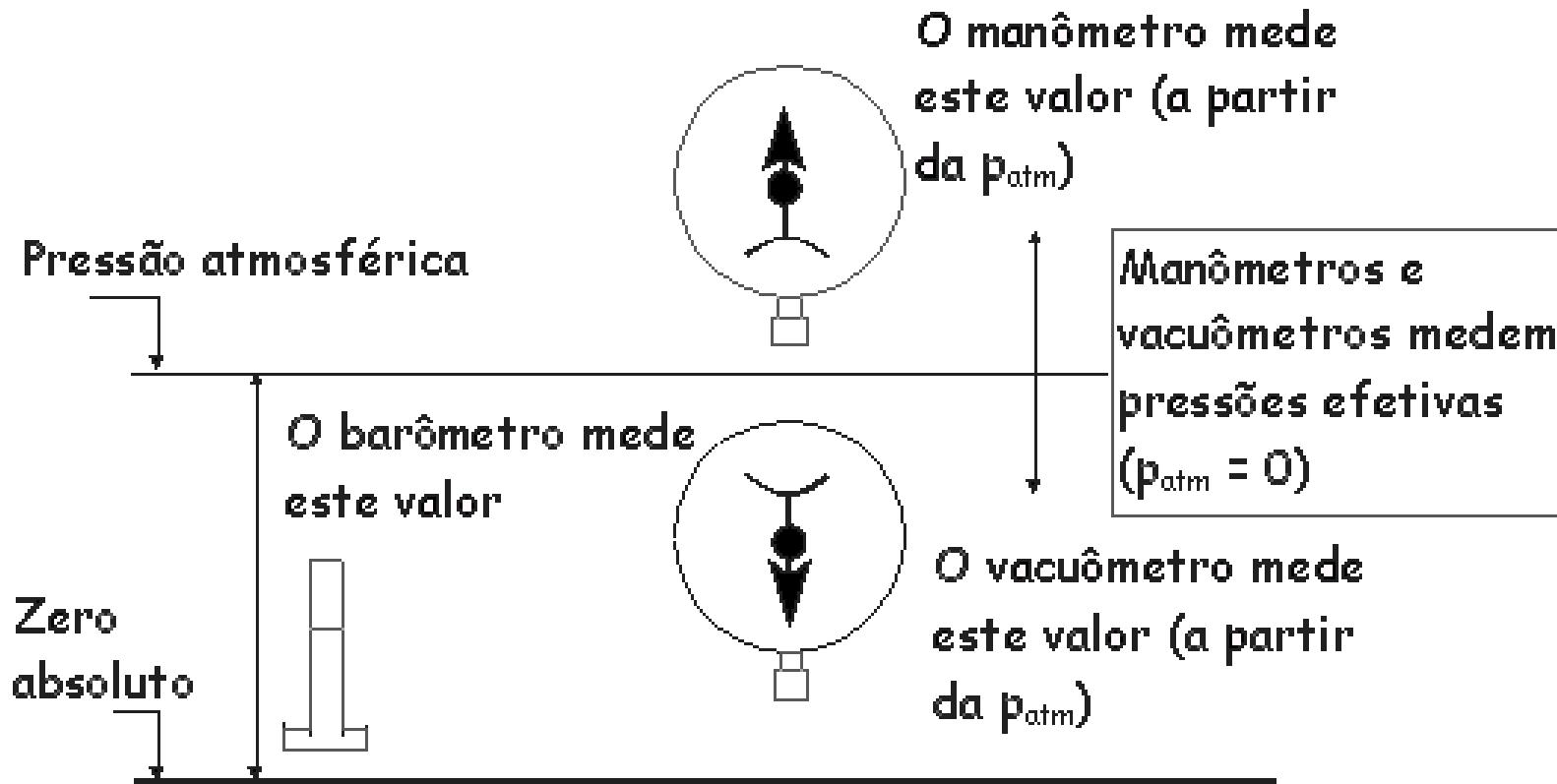
Manômetro Bourdon

- **Barômetros:** medem a pressão atmosférica local;

O Barômetro de mercúrio (mais simples) consiste em um tubo de vidro cheio de mercúrio com sua extremidade aberta imersa em um recipiente com mercúrio

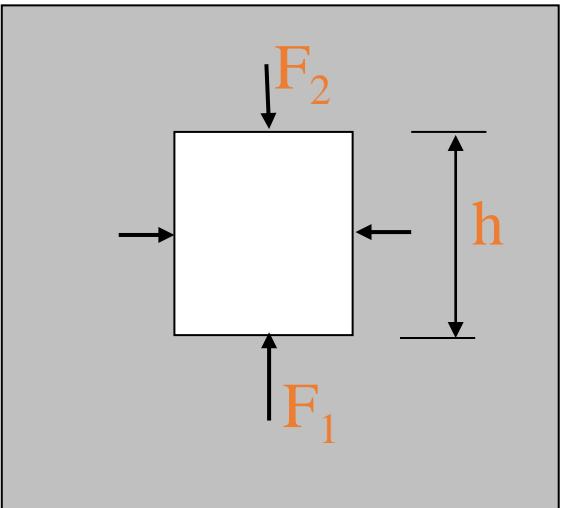
# Estática dos fluidos

## Medidas da pressão



# Estática dos fluidos – Princípio de Arquimedes

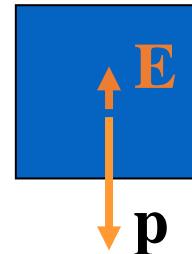
## EMPUXO



$$E = F_1 - F_2 = P_1A - P_2A = \Delta PA$$

$$\Delta P = \rho_f gh$$

$$E = \rho_f ghA = \rho_f gV$$



**Teorema de Arquimedes:** Todo corpo imerso num fluido sofre a ação de uma força de baixo para cima igual ao peso de fluido deslocado

Peso Aparente:  $P_{ap} = P_{real} - E$

# Dinâmica dos Fluidos

Fluidos: De uma maneira geral, o fluido é caracterizado pela relativa mobilidade de suas moléculas que, além de apresentarem os movimentos de rotação e vibração, possuem movimento de translação e portanto não apresentam uma posição média fixa no corpo do fluido.

Mecânica dos Fluidos: Ciência que trata do comportamento dos fluidos em repouso e em movimento. Estuda o transporte de quantidade de movimento nos fluidos.

# Dinâmica dos Fluidos

## Fluidos estáticos (Hidrostática)

A Hidrostática trata dos fluidos em repouso, caracterizando e quantificando suas propriedades, como pressão, volume, densidade, envolvendo leis como os Princípios de Pascal e de Arquimedes (empuxo).

## Fluidos em movimento (Hidrodinâmica)

A Hidrodinâmica trata dos fluidos em movimento, envolvendo leis de conservação de massa (equação da continuidade) e energia (Bernouille).

# Dinâmica dos Fluidos

Nova variável: tempo (t)

Fluxo:  $\Phi = \Delta V / \Delta t$

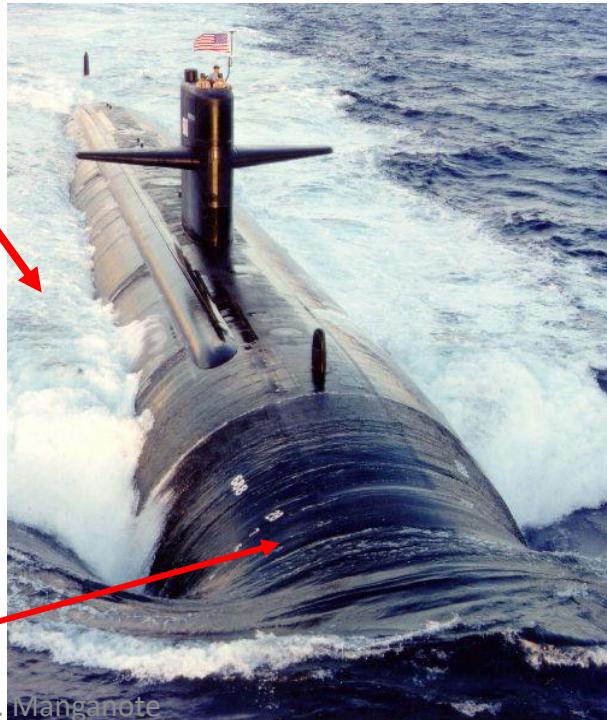
Unidade:  $m^3/s$ ,  $l/s$ , etc

Tipos de fluxo: Laminar e Turbulento



turbulento

laminar



# Dinâmica dos Fluidos

- **Escoamento Laminar:**

As partículas descrevem trajetórias paralelas.

- **Escoamento Turbulento:**

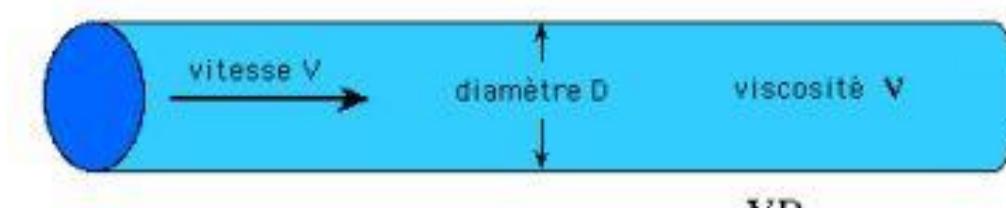
As trajetórias são errantes e cuja previsão é impossível;

- **Escoamento de Transição:**

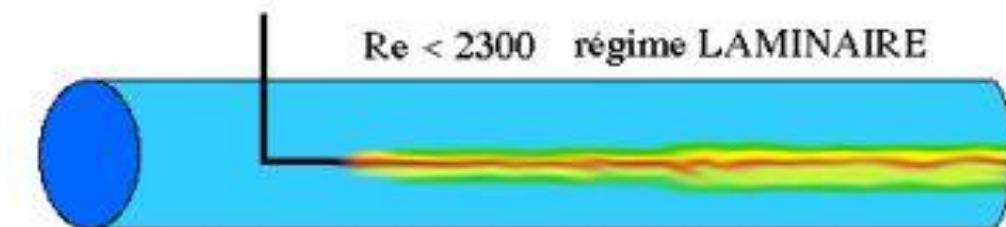
Representa a passagem do escoamento laminar para o turbulento ou vice-versa.

# Dinâmica dos Fluidos

**Número de Reynolds:** transição entre o regime laminar e o turbulento

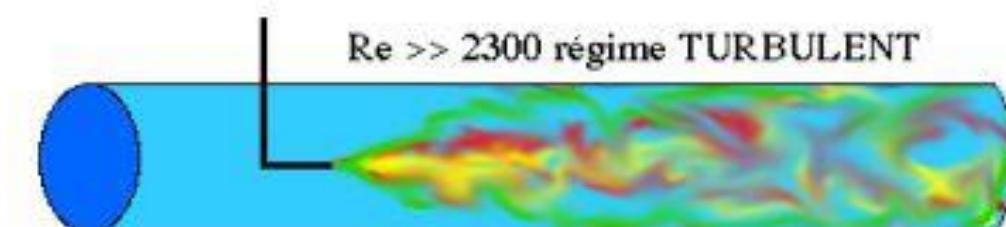


$$\text{Nombre de Reynolds} = R_e = \frac{VD}{\nu}$$



$$R_e = \frac{\nu D \rho}{\eta}$$

$R_e < 2300$  Laminar



$R_e \gg 2300$  Turbulento

# Dinâmica dos Fluidos

**Número de Reynolds:** transição entre o regime laminar e o turbulento

**Exemplo** – O diâmetro da aorta de um adulto é da ordem de 2,2 cm. A velocidade sistólica média  $\bar{v}_{\text{sis}}$  do sangue é cerca de 60 cm/s. Considere a densidade do sangue igual à da água e sua viscosidade igual a 0,004 kg/(m · s). Determine se o fluxo do sangue na aorta é laminar ou turbulento.

**Solução**

$$Re = \frac{2 \bar{v}_{\text{sis}} r_a \rho_s}{\eta_s} = \frac{(2)(0,6 \text{ m/s})(0,011 \text{ m})(1\,000 \text{ kg/m}^3)}{(0,004 \text{ kg/(m · s)})}$$

$$Re = 3\,300 > 2\,000$$

Portanto, o fluxo do sangue é turbulento na aorta.

# Dinâmica dos Fluidos

## Equação de Continuidade

$$V_1 = A_1 \cdot x_1 = A_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t$$

$$V_2 = A_2 \cdot x_2 = A_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t$$

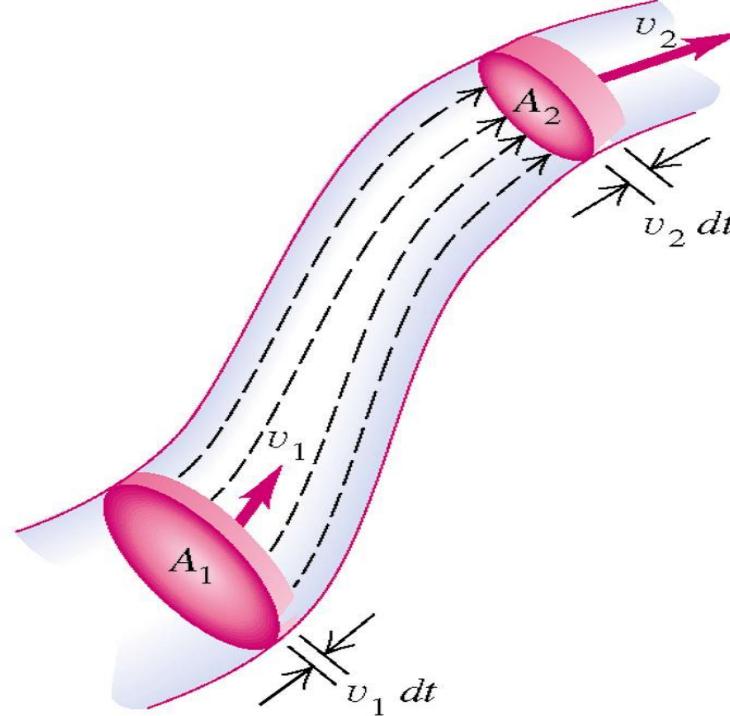
$$\text{Vazão: } \phi = V/\Delta t$$

$$\phi_1 = V_1/\Delta t$$

$$\phi_2 = V_2/\Delta t$$

$$\text{Conservação da massa: } \phi_1 = \phi_2$$

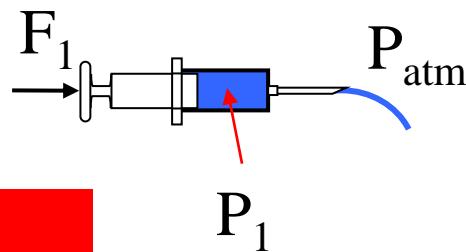
$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \text{ ou } A \cdot v = \text{cte.}$$



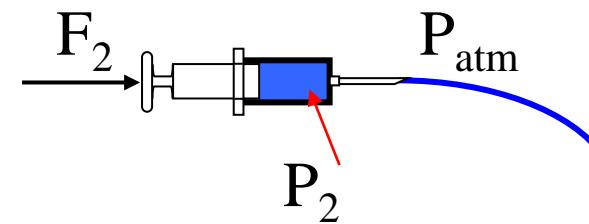
Tubo de seção reta de área variável. Quando o fluido é incompressível, o produto  $Av$  permanece constante em todos os pontos do tubo de escoamento

# Dinâmica dos Fluidos

Relação entre fluxo e diferença de pressão



Semelhante à resistência elétrica:  $\Delta V = R \cdot i$



$$P_1 < P_2$$

Lei de Poiseuille:

$$\Delta P = R \phi$$

$$R = \frac{8\eta L}{\pi r^4}$$

$\eta$  - viscosidade do fluido  
 L - comprimento do tubo  
 r - raio da seção reta do tubo

Unidade de R:  $u(R) = u(P)/u(f) = \text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3$  no SI (também usado: torr.s/l)

Unidade de  $\eta$ :  $u(\eta) = u(R) \cdot u^4(r)/u(r) = \text{Pa} \cdot \text{s} = \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$  no SI (também usada: Poise (Pi) = 0,1 Pa.s)

# Dinâmica dos Fluidos

## Aplicação da Lei de Poiseuille

$$\Delta P = R \phi$$

**Uma pequena quantidade de oclusão arterial pode ter um efeito surpreendentemente grande !**

* Oclusão	A pressão é 120 mmHg, a Vazão =	Pressão para restabelecer o fluxo normal
0%	100 cm <sup>3</sup> /min	120 mmHg
20%	41 cm <sup>3</sup> /min	293 mmHg
50%	6.3 cm <sup>3</sup> /min	1920 mmHg
80%	0.16 cm <sup>3</sup> /min	75,000 mmHg

\* 20% de oclusão aqui é tomada como uma redução média do raio interno de 20%, ou seja restando 80% do seu raio original.

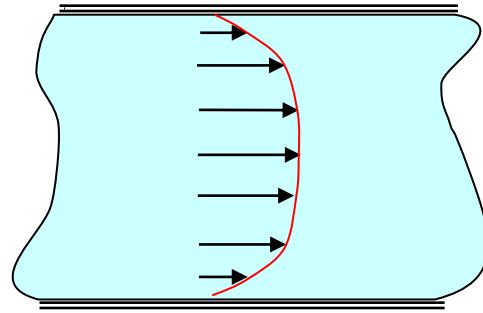
# Dinâmica dos Fluidos

## Viscosidade

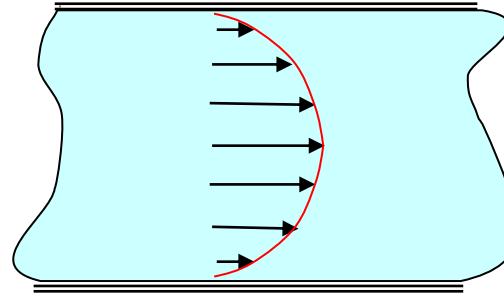
Fluido	Temperatura (°C)	$\eta$ (Pa.s)
Sangue	36	$4,00 \times 10^{-3}$
Acetona	25	$3,16 \times 10^{-3}$
Óleo leve	16	$1,13 \times 10^{-1}$
	38	$3,4 \times 10^{-2}$
Água	0	$1,79 \times 10^{-3}$
	20	$1,00 \times 10^{-3}$
	37	$0,69 \times 10^{-3}$
	100	$2,82 \times 10^{-5}$
Ar	0	$1,71 \times 10^{-5}$
	18	$1,83 \times 10^{-5}$
	40	$1,90 \times 10^{-5}$

# Dinâmica dos Fluidos

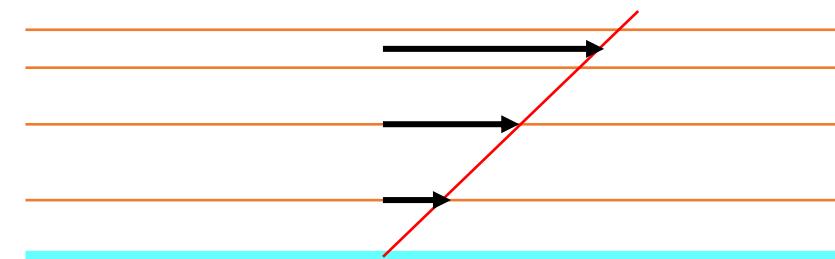
Viscosidade: perfil de velocidades



baixa viscosidade



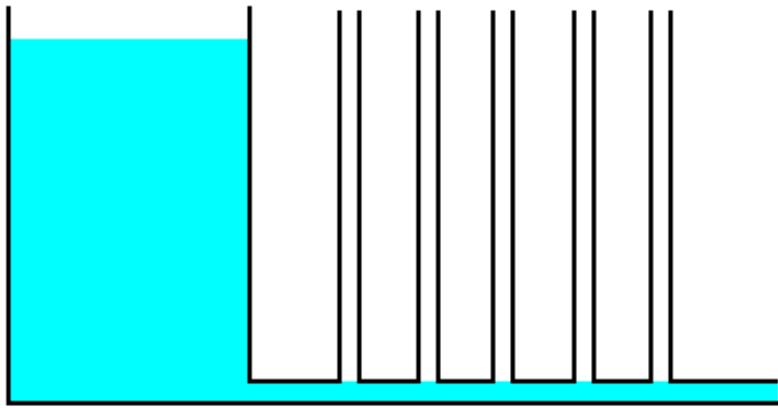
alta viscosidade



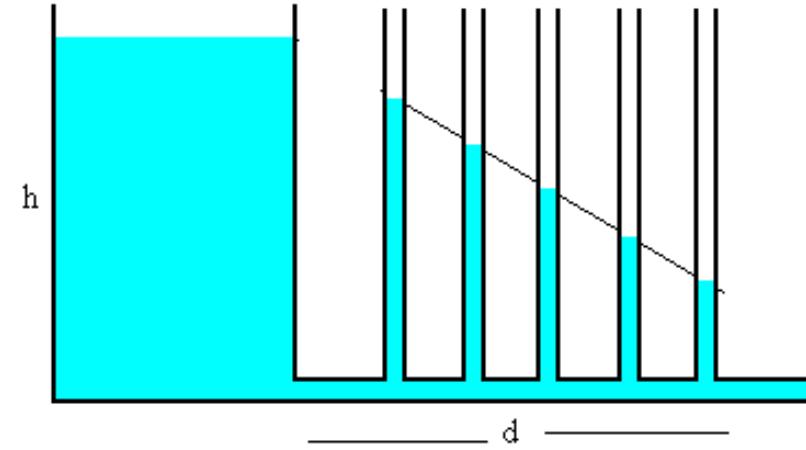
$v = 0$  na superfície

# Dinâmica dos Fluidos

## Viscosidade: fluidos ideais e reais



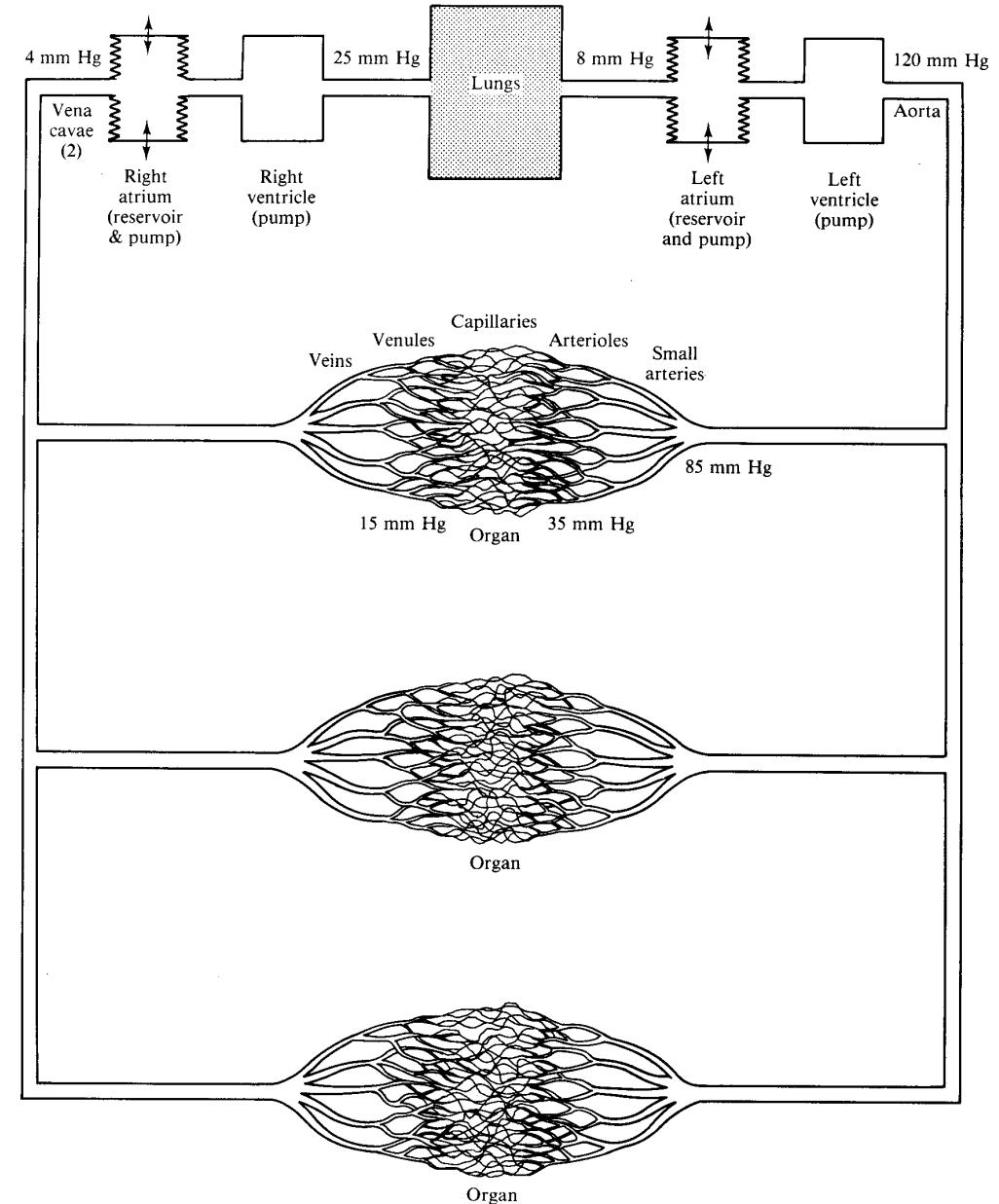
Escoamento de um fluido ideal (viscosidade nula)



Escoamento de um fluido real (viscosidade não nula)

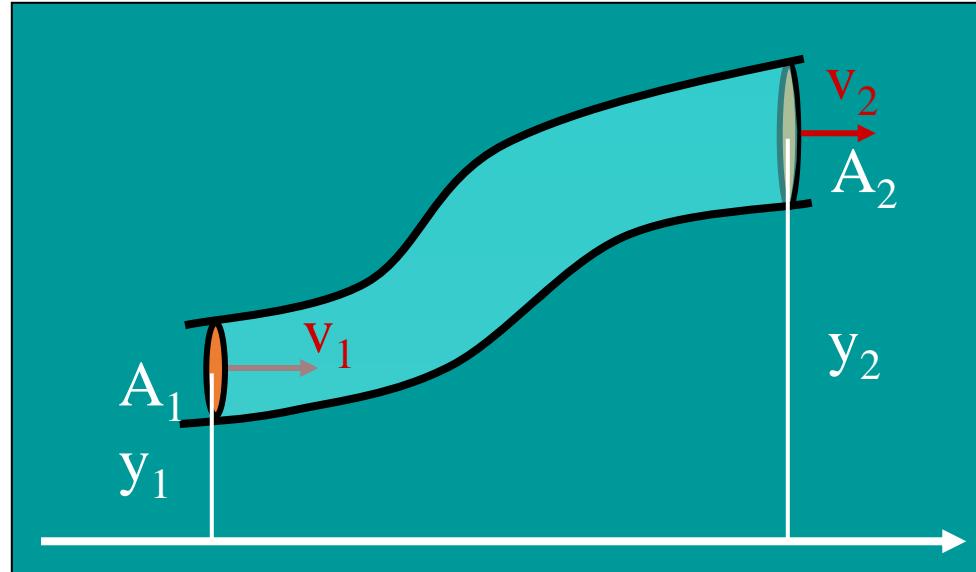
# Dinâmica dos Fluidos

Aparelho Circulatório  
(sob o aspecto da dinâmica de fluidos)



# Dinâmica dos Fluidos

Equação de Bernoulli (Conservação da energia):



$$p_1 + \rho gy_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho gy_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

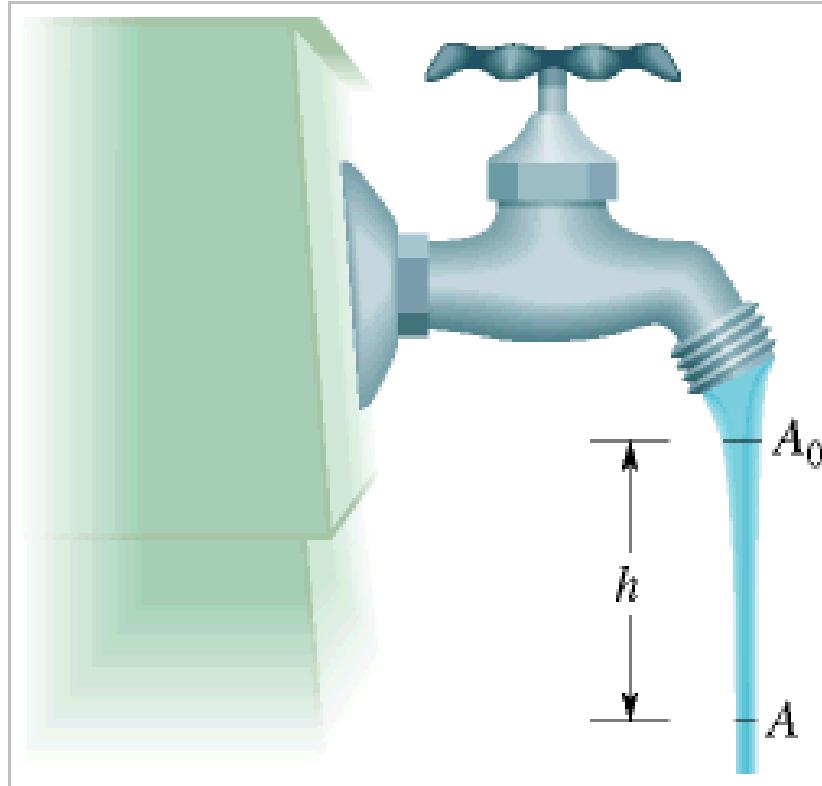
Para um tubo horizontal,  $y_1 = y_2$



$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

# Dinâmica dos Fluidos

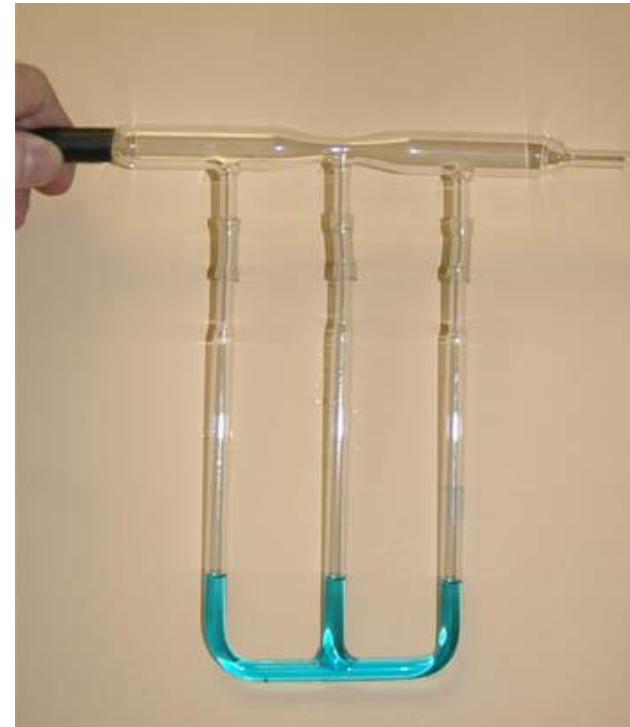
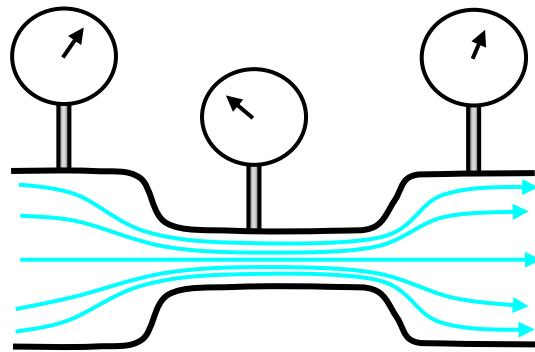
## Equação de Bernoulli (Aplicações) – Escoamento



$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad \text{e} \quad p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h = cte$$

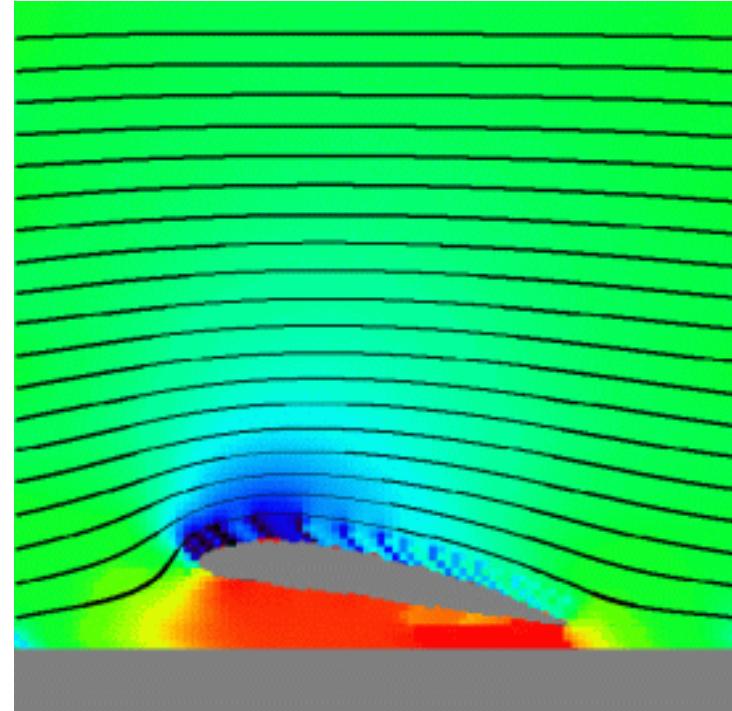
# Dinâmica dos Fluidos

Equação de Bernoulli (Aplicações) – Tubo de Venturi



# Dinâmica dos Fluidos

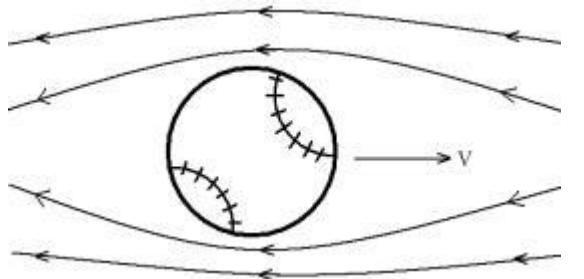
## Equação de Bernoulli (Aplicações) – Sustentação



$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h = cte$$

# Dinâmica dos Fluidos

## Equação de Bernoulli (Aplicações) – Efeito Magnus

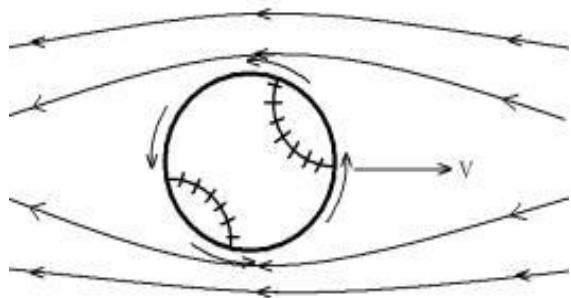


+



=

Força resultante: bola com efeito

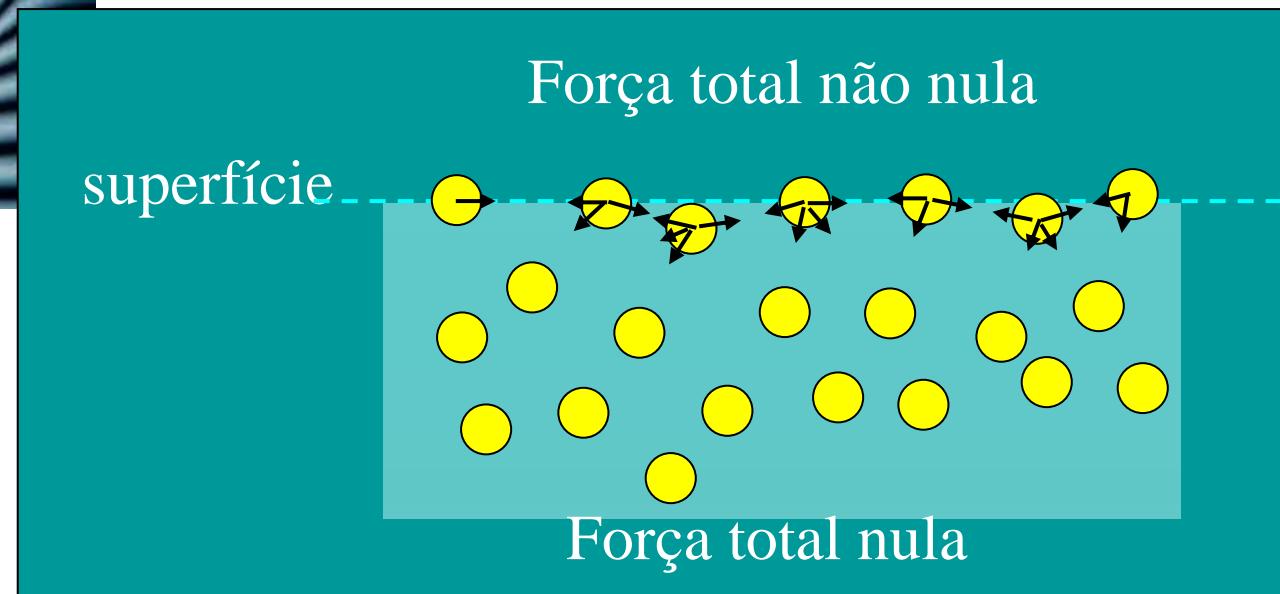


Bernoulli outra vez!!!!



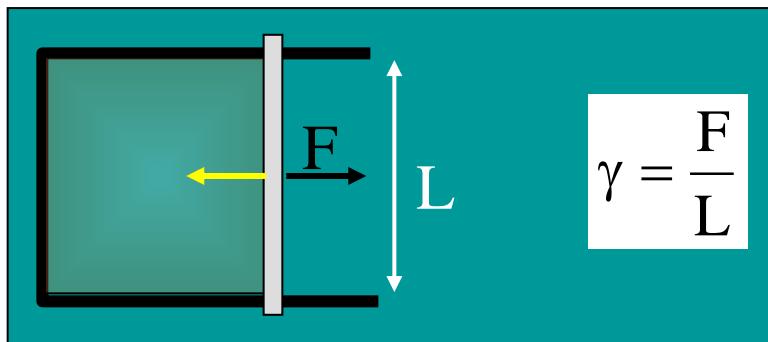
# Dinâmica dos Fluidos

Tensão superficial: resultante das forças de atração que as moléculas internas do líquido exercem junto às da superfície.



# Dinâmica dos Fluidos

Tensão superficial:



$$\gamma = \frac{F}{L}$$

$\gamma$ : Tensão superficial (N/m)

$$F = \gamma L$$

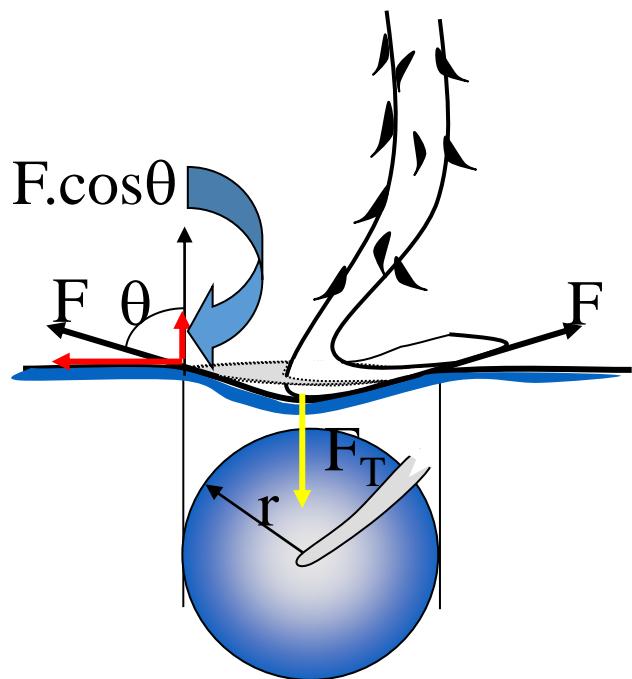
Líquido	Tensão superficial (N/m)
Plasma sanguíneo	0,073
Sangue	0,058
Etanol	0,023
Mercúrio	0,436
Água	
0°C	0,076
20°C	0,072
100°C	0,059
Água com sabão	0,037

# Dinâmica dos Fluidos

## Tensão superficial

Considerações importantes:

1.  $\gamma$  está ligado a propriedades moleculares do líquido. Depende, portanto do material;
2. O fator 2 que multiplica  $\gamma$  vem da existência de duas superfícies. No caso de uma única superfície, não tem o fator 2.



$$F = \gamma L = \gamma 2\pi r$$

$$F_T = F \cos \theta$$

$$Assim, \quad F_T = \gamma 2\pi r \cos \theta$$

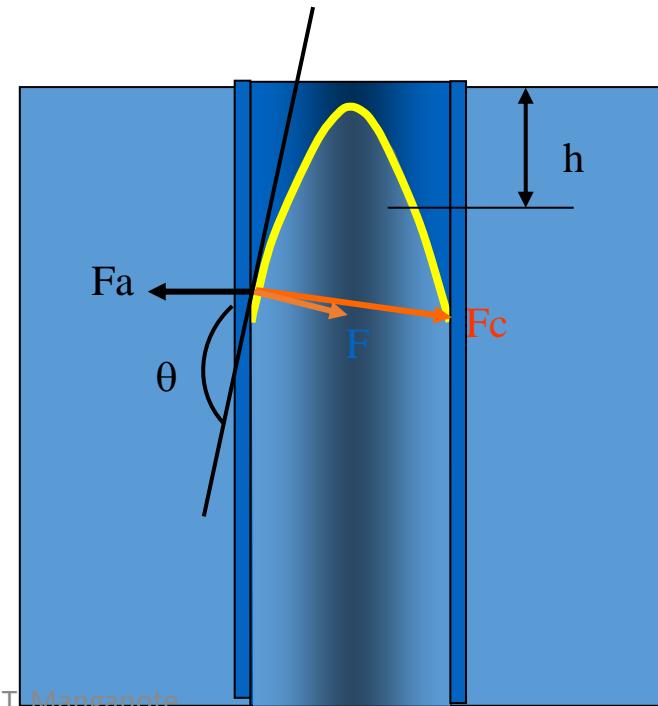
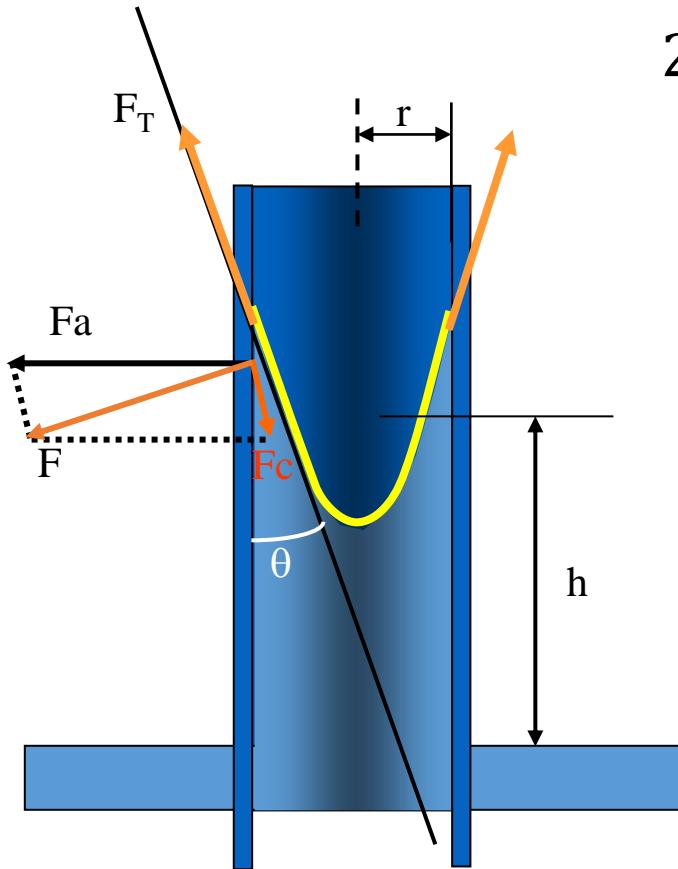
# Dinâmica dos Fluidos

**Capilaridade:** propriedade dos fluidos de subir ou descer em tubos muito finos

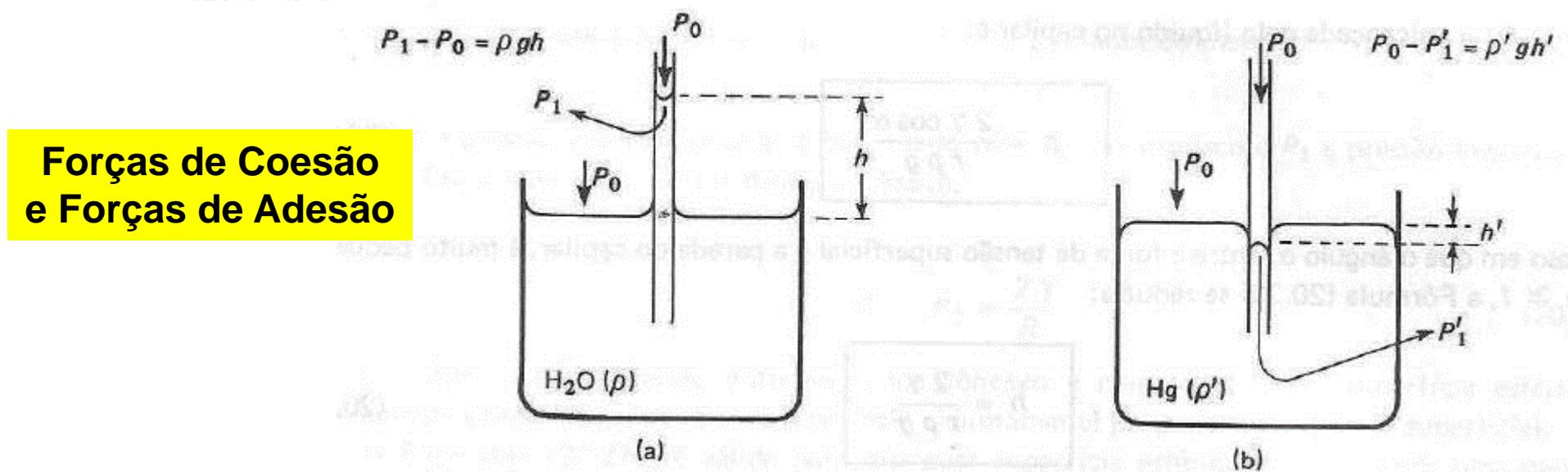
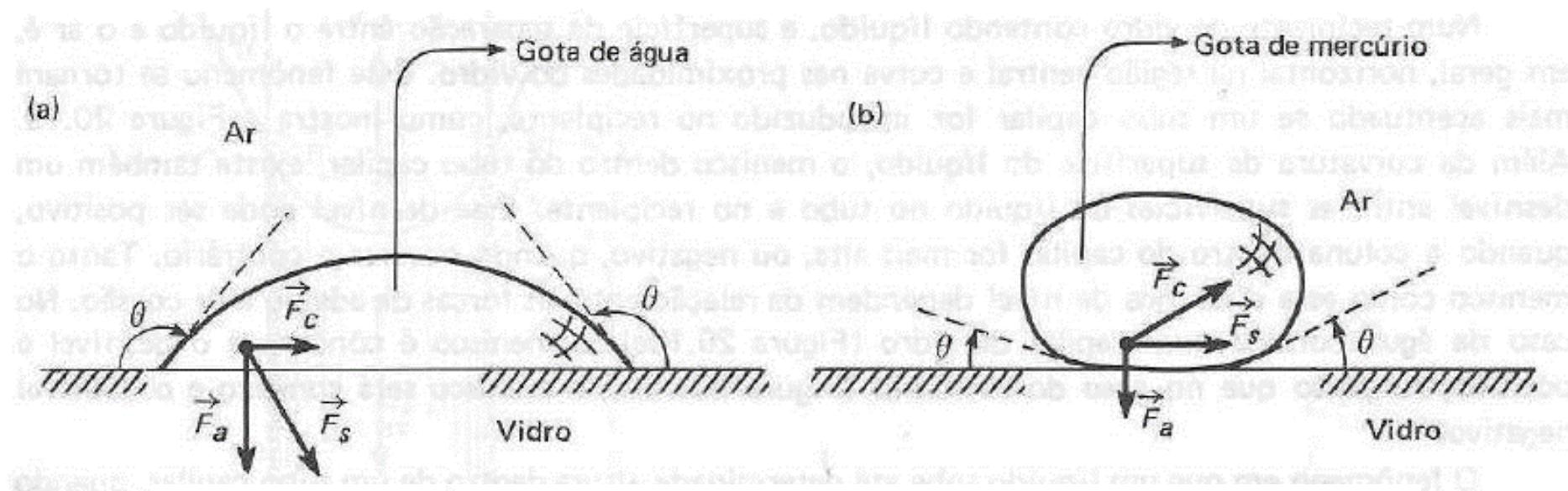
$$F_T = mg$$

$$2\pi r\gamma \cos\theta = \rho V g = \rho \pi r^2 h g$$

$$h = \frac{2\gamma \cos\theta}{\rho g r}$$



# Dinâmica dos Fluidos - Capilaridade

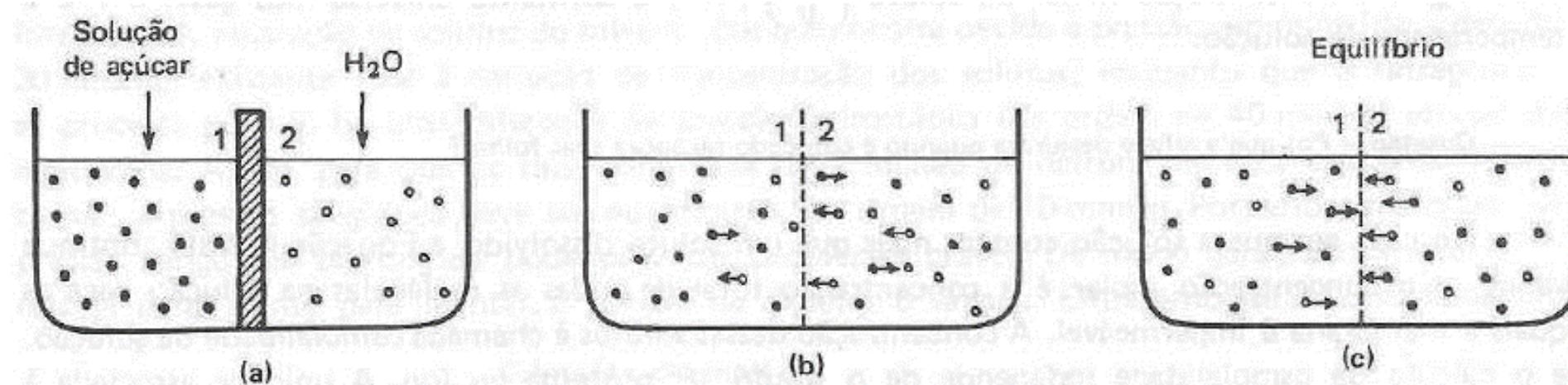


# Transporte de Partículas

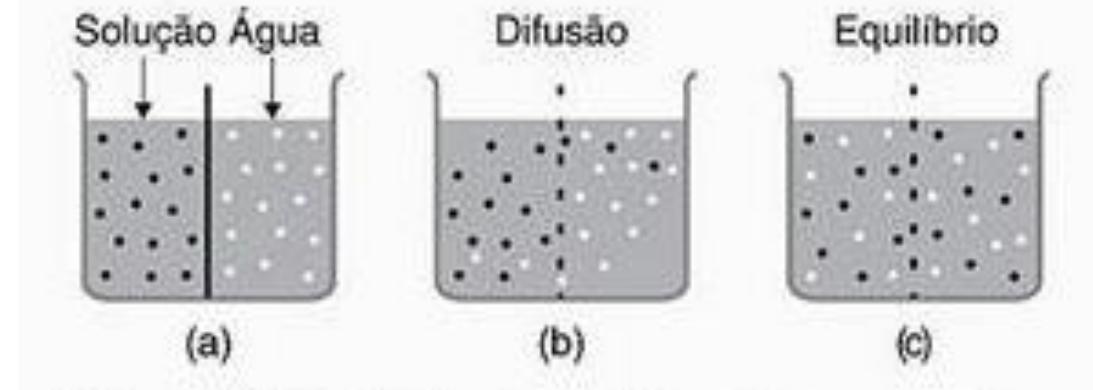
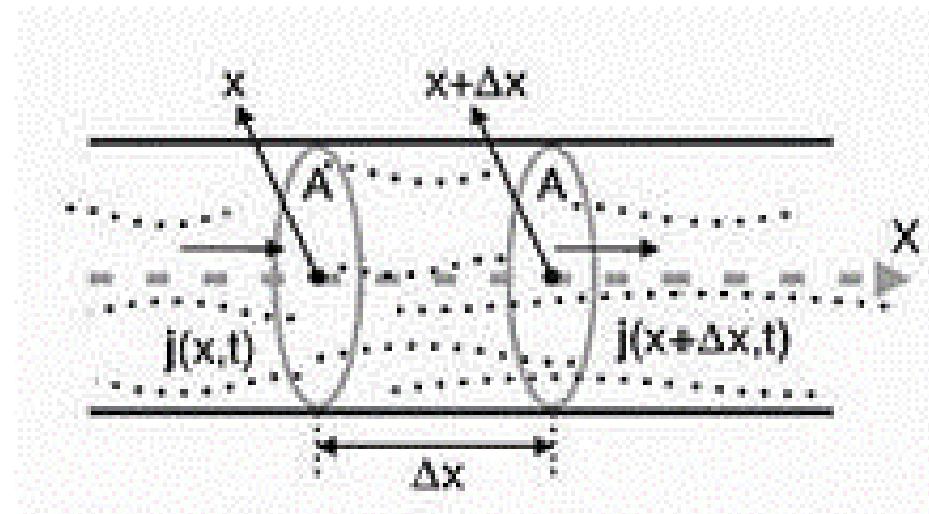
**Fluxo** – é o volume total de material transportado por unidade de tempo ( $m^3 s^{-1}$ )

**Taxa de Fluênciа ou Densidade de Fluxo** – é a quantidade de alguma coisa transportada através de uma superfície imaginária por unidade de área, por unidade de tempo ( $m^{-2} s^{-1}$ )

**Difusão** – é o movimento aleatório de partículas de uma região de concentração mais alta para outra de concentração mais baixa



# Transporte de Partículas



1<sup>a</sup> Lei de Fick



$$\vec{j}(x, y, z, t) = -D \vec{\nabla} C(x, y, z, t)$$

Gradiente de Concentração

$$j_x = -D \frac{\delta C}{\delta x}$$



D é o coeficiente de difusão do soluto na solução [ $m^2/s$ ]

# Transporte de Partículas

Constantes de Difusão de moléculas no ar à pressão atmosférica

Molécula	Temperatura (°C)	$D$ (cm <sup>2</sup> /s)
Hidrogênio	0°	0,634
Vapor de água	8°	0,239
Oxigênio	0°	0,178
Dióxido de carbono	0°	0,139
Vapor de álcool	40°	0,137

Constantes de Difusão de moléculas na água a 20 °C

Molécula	Massa molecular $M$ (g/mol)	Raio (Å)	$D$ (cm <sup>2</sup> /s)
H <sub>2</sub> O	18	~1,5	$2,0 \times 10^{-5}$
O <sub>2</sub>	32	~2	$1,0 \times 10^{-5}$
CO(NH <sub>2</sub> ) – Uréia	60	~4	$1,1 \times 10^{-5}$
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> – Glicose	180	~5	$6,7 \times 10^{-6}$
Ribonuclease	13 683	~18,0	$1,2 \times 10^{-6}$
β-lactoglobulina	35 000	~27,4	$7,8 \times 10^{-7}$
Hemoglobina	68 000	~31,0	$6,9 \times 10^{-7}$
Catalase	250 000	~52,2	$4,1 \times 10^{-7}$
DNA	6 000 000		$0,13 \times 10^{-7}$
Vírus do mosaico do tabaco	50 000 000		$0,39 \times 10^{-7}$

# Transporte de Partículas

**Exemplo:** A difusão da água através da pele ocorre com uma taxa média de 350 ml/dia. Considere um adulto cujo corpo tem uma área de  $1,75 \text{ m}^2$ . Se a espessura da pele é de aproximadamente  $20 \mu\text{m}$ , calcule a constante de difusão da água.

Taxa média de difusão

$$\frac{\Delta n}{\Delta t} = n \frac{3,5 \times 10^{-4} \text{ moléculas}}{8,64 \times 10^4 \text{ s}} = n(0,41 \times 10^{-8}) \frac{\text{moléculas}}{\text{s}}$$

Fluxo de moléculas através da pele

$$j = \frac{\Delta n / \Delta t}{\text{área}} = \frac{n(0,41 \times 10^{-8}) \text{ moléculas}}{1,75 \text{ s.m}^2} = n(0,23 \times 10^{-8}) \frac{\text{moléculas}}{\text{s.m}^2}$$

Gradiente de concentração

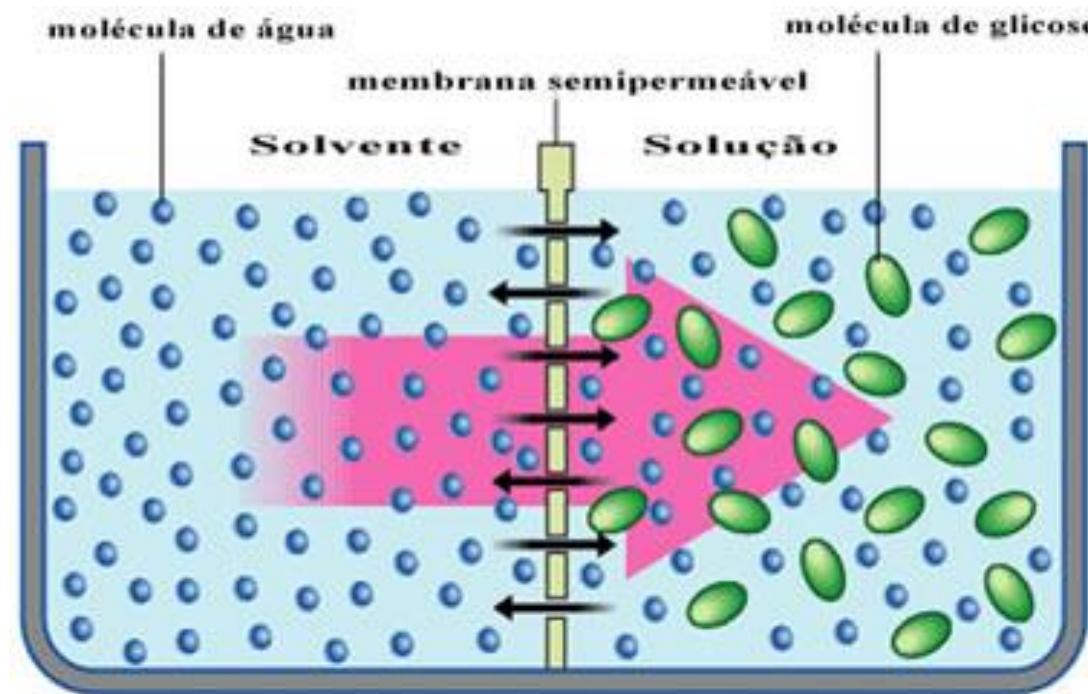
$$\frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{(n - 0)}{2 \times 10^{-5}} \frac{\text{moléculas}}{\text{m}^4} = n(0,5 \times 10^5) \frac{\text{moléculas}}{\text{m}^4}$$

$$j_x = -D \frac{\Delta C}{\Delta x} \quad \xrightarrow{\hspace{100pt}} \quad D = 4,6 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$$

# Transporte de Partículas

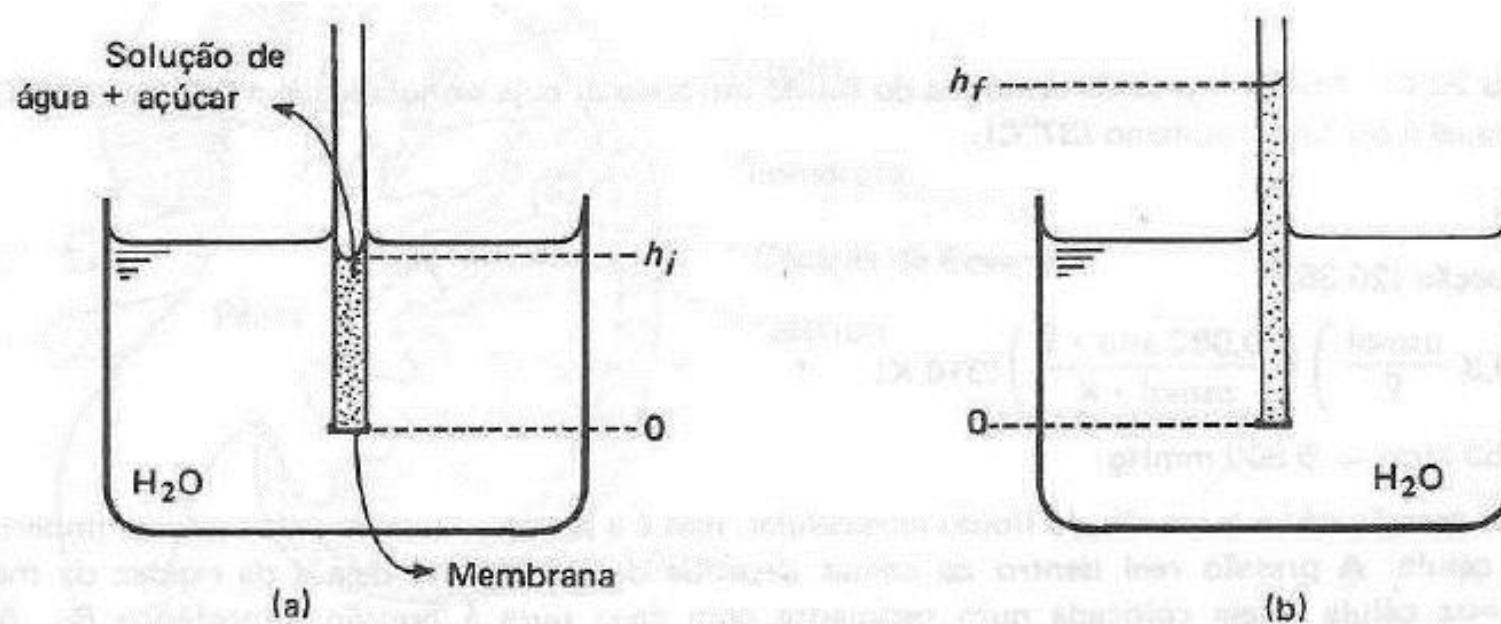
**Osmose** - No processo de osmose ocorre a passagem do solvente (água) de um meio menos concentrado (hipotônico) para um meio mais concentrado (hipertônico).

Durante a osmose, o solvente tem tendência de atravessar a membrana semipermeável na direção da solução com menor concentração, de tal modo que nesta aumenta a quantidade de solvente e na outra diminui. Este efeito continua até que a pressão hidrostática equilibre esta tendência.



# Transporte de Partículas

## Osmose



$$\Delta p = \rho_{solução} g (h_f - h_i)$$

$$\pi = \Delta p$$

$$\pi V = nRT$$

Lei de van't Hoff  $\rightarrow \pi = \frac{n}{V} RT = C_M RT$

# Transporte de Partículas

Pressão Osmótica

Constante universal dos gases

Temperatura da solução

Concentração molar do soluto

$$\Pi = \frac{n}{V} RT = C_M RT$$

**Osmolalidade** da solução [osmol/l] → Um osmol é um mol de moléculas ou íons numa solução para os quais uma membrana é impermeável

# Transporte de Partículas

**Exemplo** – Determine a pressão osmótica de uma hemácia quando a célula for imersa em água destilada a 27°C. Considere que a concentração molar  $C_{Hb}$  da hemoglobina seja 10 mM dentro da hemácia.

**Solução**

$$C_{Hb} = 10 \text{ mM} = 10 \times 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\ell} = \frac{10 \times 10^{-3} \text{ mol}}{10^{-3} \text{ m}^3} = 10 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

$$\Pi = C_{Hb}RT = \left( 10 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \right) \left( 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right) (300 \text{ K})$$

$$\Pi = 25\,000 \text{ N/m}^2 = 0,25 \text{ atm}$$

**Exemplo** – Qual é a pressão osmótica do fluido intracelular cuja osmolalidade é 0,3 osmol/ℓ? Considere a temperatura igual a do corpo humano (37°C).

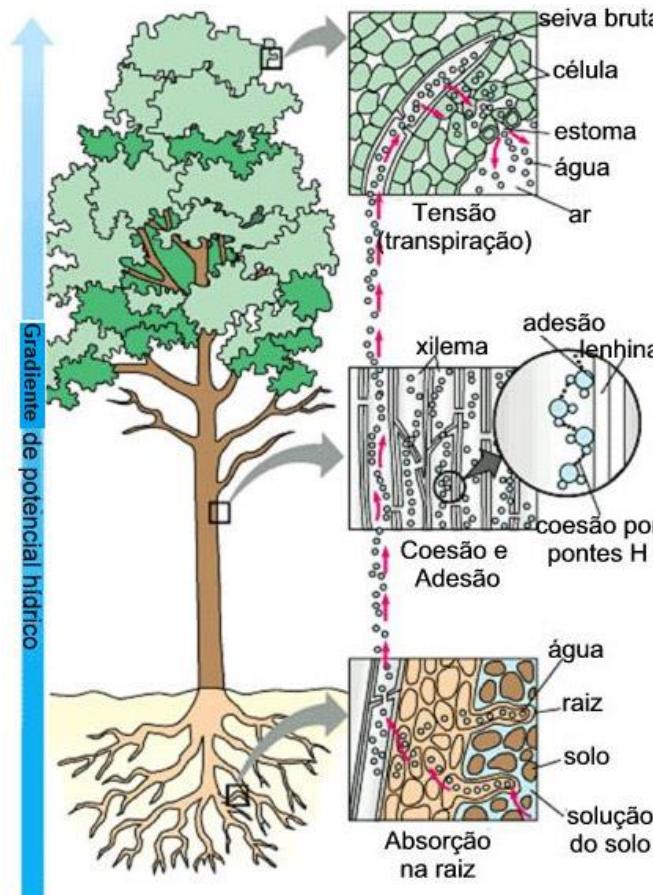
**Solução**

Pela Equação (20.36):

$$\Pi = \left( 0,3 \frac{\text{osmol}}{\ell} \right) \left( \frac{0,082 \text{ atm} \cdot \ell}{\text{osmol} \cdot \text{K}} \right) (310 \text{ K})$$

$$\Pi = 7,63 \text{ atm} = 5\,800 \text{ mmHg}$$

# Transporte de Partículas



**Exemplo:** Considere uma árvore com 30 m de altura, estando a seiva a 20 °C. Qual deve ser a concentração molar dos solutos na seiva? ( $\rho_{seiva} \equiv 1 \text{ g/cm}^3$ )

**Resolução:** A pressão osmótica necessária para elevar a seiva até seu topo será

$$\Pi = \rho gh = (1\,000 \text{ kg/m}^3)(9,8 \text{ m/s}^2)(30 \text{ m}) = 2,94 \times 10^5 \text{ Pa} = 2,9 \text{ atm.}$$

Esta pressão implica em que a concentração molar mínima dos solutos na seiva deve ser  $C_M = \Pi/RT = 0,12 \text{ osmol/l}$ .

Se admitirmos que a seiva sobe até uma altura  $h$  pela *ação capilar*, então, com  $\gamma_{seiva} = 0,073 \text{ N/m}$  e sendo 0,02 mm o diâmetro do xilema, teremos

$$h = 2\gamma/\rho g a = (2 \times 0,073 \text{ N/m})/(10^3 \text{ kg/m}^3)(9,8 \text{ m/s}^2)(10^{-5} \text{ m}) = 1,5 \text{ m.}$$

# Transporte de Partículas

**Exemplo:** Tendo 10 g de sacarose (massa molar = 360 g) e 5 g de glicose (massa molar = 180 g) dissolvidos em 1 litro de água a 87 °C, qual será a pressão osmótica da solução se esta for separada da água por uma membrana impermeável a este soluto?

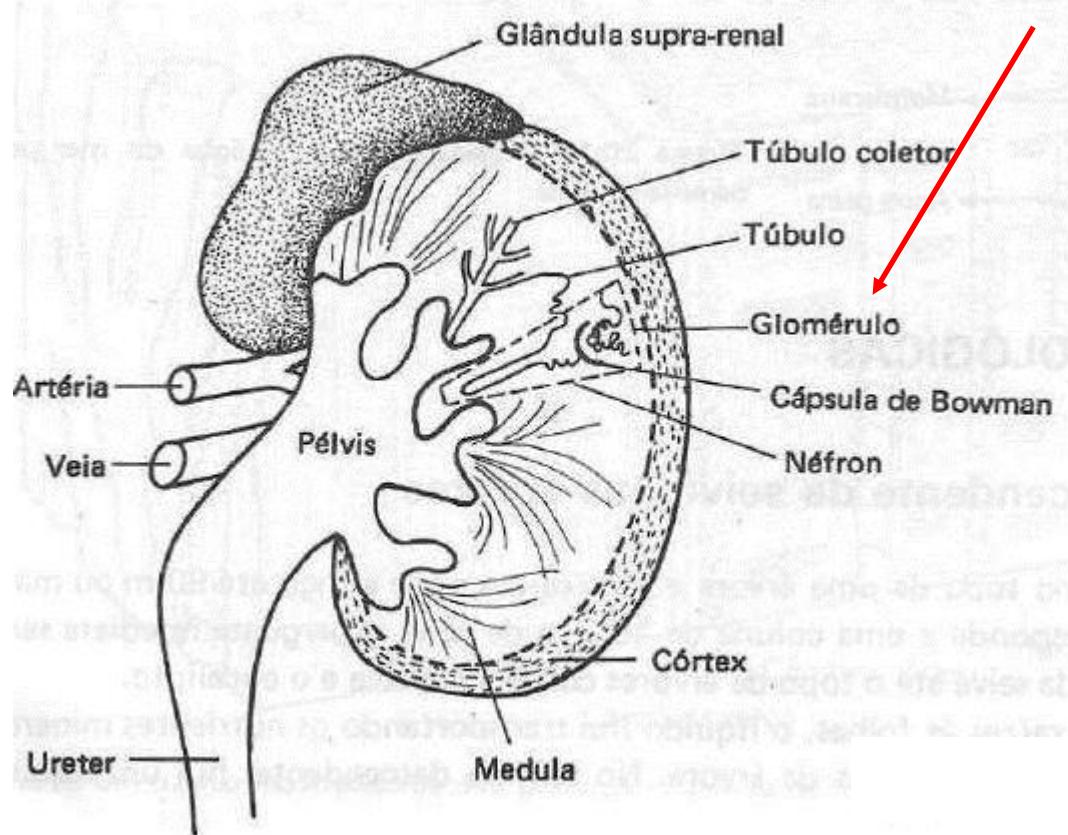
**Resolução:** Na solução temos  $n_s = 10/360 = 1/36$  moles de sacarose e  $n_g = 5/180 = 1/36$  moles de glicose.

O total de moles na solução é  $1/36 + 1/36 = 1/18$  moles.

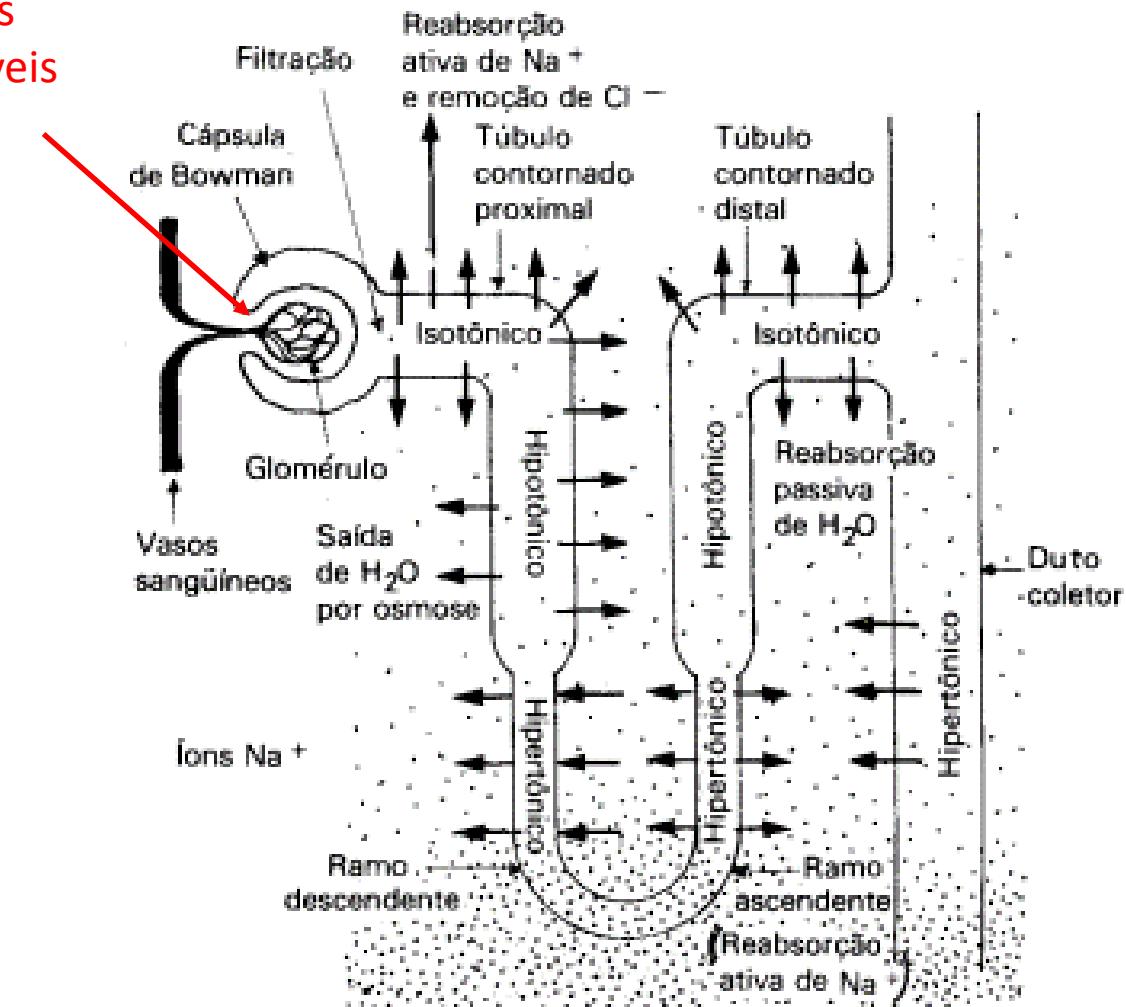
Logo, a pressão osmótica da solução será  $\Pi_{sol} = (1/18) \times 0,0821 \times (87 + 273) \text{ atm} = 1,64 \text{ atm}$ .

# Transporte de Partículas

## Osmose - Diálise



Membranas Semipermeáveis

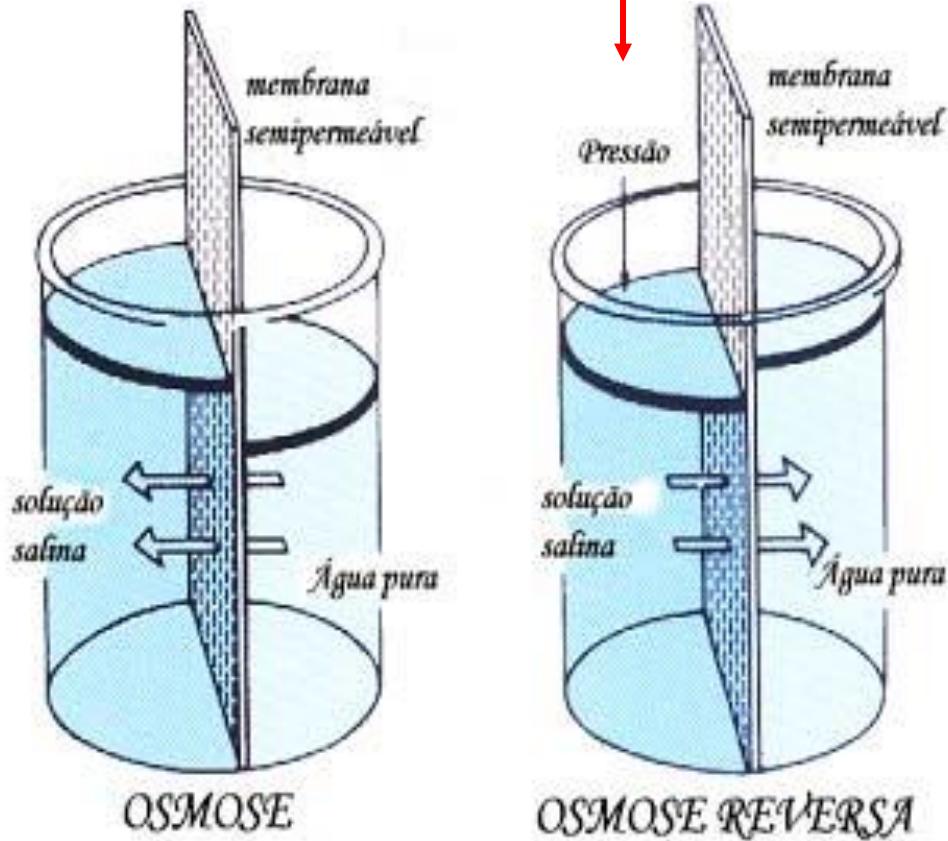


Diálise – processo pelo qual os produtos metabólicos inúteis e/ou tóxicos são retirados do sangue pelos rins

Esquema do funcionamento de um néfron.

# Transporte de Partículas

$$P > \Pi$$



Sistema de Osmose Reversa para Tratamento de Água

