

## Tema#2: Mecânica dos fluidos

Bartolomeu Joaquim Ubisse

Instituto Superior de Ciências de Saúde (ISCISA)

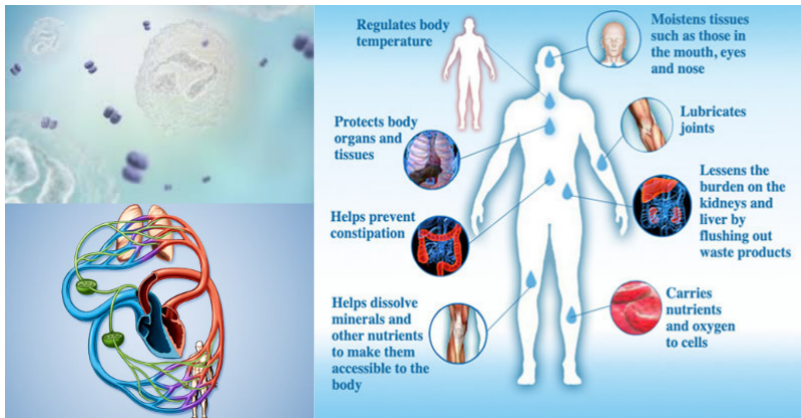
(Aulas preparadas para estudantes de Anatomia Patológica)

28 de Julho de 2021

- 1 Porque Mecânica dos fluídos no curso de Saúde?
- 2 Conceito de fluido. Distinção entre líquido e gás
  - Propriedade mecânicas dos fluidos
- 3 Hidrostática
  - Pressões em líquidos estáticos
- 4 Manômetros

# Porque Mecânica dos fluídos no curso de Saúde?

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



# Conceito de fluido. Distinção entre líquido e gás

Fluido é uma substância que sofre uma deformação contínua quando submetida a uma força tangencial, por mais pequena que ela seja.

Os fluidos classificam-se em:

- 1 Líquidos e
- 2 Gases

O estado físico de uma substância depende do balanço entre a energia cinética das partículas (moléculas e ou átomos) que compõem a substância e as forças intermoleculares. A energia cinética, que é dependente de temperatura, faz com que as partículas se movimentem e estejam mais afastadas. Porém, as forças intermoleculares mantêm as partículas mais próximas umas das outras.

## Conceito de fluido. Distinção entre líquido e gás - Cont.



Figura 1: Líquido

- Conserva seu volume e forma uma superfície livre no recipiente
- Mais denso que o gás
- Forças intermoleculares não são suficientemente forte para impedir o movimento das moléculas - o líquido ganha a forma do recipiente

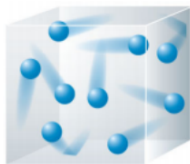


Figura 2: Gás

- A energia cinética média das moléculas é maior que a energia potencial atractiva entre as moléculas;
- Força intermolecular fraca permite que o gás se expande ocupando todo o volume disponível.
- o gás é compressível ( $d\rho/dp \neq 0$ )

Líquidos e gases podem coexistir em misturas de duas fases  
(Ex.vapor-água, água com bolhas de ar).

# Propriedade mecânicas dos fluidos

As propriedades dos fluidos são fundamentais para uma melhor análise do seu comportamento sob certas condições de funcionamento. As propriedades podem ser várias, dependendo da área de aplicação, porém, para nós importam só as seguintes:

- Massa específica ou densidade absoluta ( $\rho$ )
- Peso específico ( $\gamma$ )
- Viscosidade ( $\mu$ )
- Tensão superficial

**Massa específica** - é a razão entre a massa contida em um volume infinitesimal do fluido pela magnitude desse volume.

$$\rho = \frac{dm}{dV} \quad (1)$$

## Propriedade mecânicas dos fluidos - Cont.

Se a massa específica for igual em todos os pontos do fluido, então a sua expressão fica:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1a)$$

A massa específica é muito variável em gases e aumenta quase proporcionalmente com a pressão. Porém, para os líquidos é quase constante (aumenta somente 1% se a pressão for aumentada por um factor de 220).

**Tabela 1:** Massas específicas de alguns fluidos

<b>Fluido</b>	<b>T(°C)</b>	<b><math>\rho(kg/m^3)</math></b>
Sangue	37	1050
Plasma sanguíneo	37	1030
Água pura	4	1000
Ar	0	1.30

# Propriedade mecânicas dos fluidos - Cont.

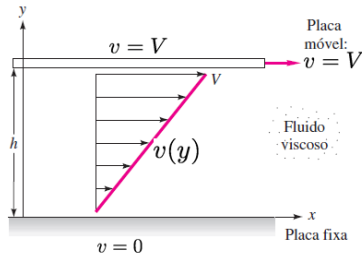
**Peso específico ( $\gamma$ )**- é o peso por unidade de volume, i.é.,

$$\gamma = \frac{P}{V} = \rho g \quad (2)$$

onde,  $\gamma$  é o peso específico em  $N/m^3$  no SI ou  $lbf/ft^3$  em unidades de campo (*field units*) e,  $g$  é aceleração de gravidade

**Viscosidade ( $\mu$ )**- é uma medida quantitativa da resistência de um fluido ao escoamento. Ela surge devido à coesão e interação entre moléculas do fluido, que oferece resistência para deformação de cisalhamento.

Se considerarmos o escoamento do fluido como o movimento de um conjunto de camadas horizontais sobrepostas, onde cada camada desliza sobre a outra, então a viscosidade representa o atrito entre essas camadas.





## Propriedade mecânicas dos fluidos - Cont.

Os gases e alguns líquidos pouco viscosos (Ex.: água, leite, soluções de sacarose, óleos vegetais) são fluidos **newtonianos** onde há uma dependência linear entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade das camadas do fluido em movimento.

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (3)$$

onde a constante de proporcionalidade  $\mu$  é a viscosidade e, sua unidade no SI é  $kg/ms$  ou  $N.s/m^2$ . Outra unidade também muito usada no sistema CGS é *centipoise* (cP) ( $1cP = 0.01P$ )

Na realidade, a viscosidade é função da pressão e temperatura ( $\mu = \mu(p, T)$ ) e, dependendo do tipo de fluido (líquido ou gás), existem várias correlações que permitem a sua determinação para determinadas faixas de temperaturas e pressões.

Os fluidos em que não se verifica a dependência linear entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidades, são chamados de **não newtonianos** e abrangem muitas classes, conforme a fig.3.

Por exemplo, os pseudoplásticos, como é o caso do *plasma sanguíneo*, não necessitam de uma tensão mínima para escoar.

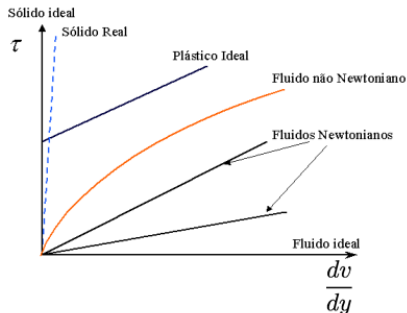


Figura 3: Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação [Alé, J., 2011]

# Propriedade mecânicas dos fluidos - Cont.

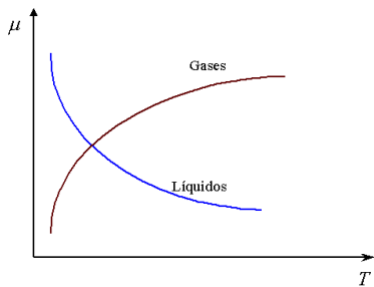


Figura 4:  $\mu \times T$  [Alé, J., 2011]

Tabela 2: Viscosidade de alguns fluidos [Okuno, E., 1986]

Fluido	T(°C)	$\mu(N.s/m^2)$
Sangue	37	$4.00 \times 10^{-3}$
Plasma sanguíneo	37	$1.50 \times 10^{-3}$
Água	0	$1.79 \times 10^{-3}$
	20	$1.00 \times 10^{-3}$
	37	$6.91 \times 10^{-4}$
Ar	0	$1.71 \times 10^{-5}$
	18	$1.83 \times 10^{-5}$
	40	$1.90 \times 10^{-5}$

Porque é comum as equipes de salvacão cobrirem as pessoas (com mantas e/ou outros tecidos) após sofrerem um acidente (ex. de viação)?

# HIDROSTÁTICA

# Hidrostática

A hidrostática dedica-se ao estudo de fluidos líquidos em repouso onde a tarefa fundamental é determinar a distribuição da pressão em líquidos homogêneos.

Quando uma força é aplicada a um fluido, esta transmite-se uniformemente em todas as direcções do mesmo. Consequentemente, a perturbação da pressão causada em um dado ponto do fluido em repouso, faz-se sentir da mesma maneira (com a mesma magnitude) em qualquer ponto do fluido.

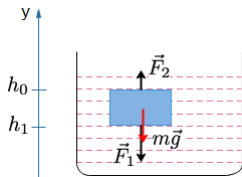
O fluido também exerce força sobre a superfície do recipiente onde é contido. Essa força é perpendicular à superfície e, por essa razão a superfície sente uma pressão expressa por:

$$p = \frac{F}{S} \quad (4)$$

sendo,  $p$  a pressão em Pascal (Pa),  $F$  a força em Newton (N) exercida pelo fluido sobre a superfície  $S$  perpendicular do recipiente em  $m^2$ .

# Hidrostática - Pressão absoluta

Consideremos um sistema de líquido e um corpo de massa  $m$  em equilíbrio. Assim, a resultante das forças que agem no sistema é nula ( $\sum_i \vec{F}_i = 0$ )



$$F_2 = F_1 + mg \Rightarrow p_2 = p_1 + \rho g(h_1 - h_0) \quad (5)$$

Deste modo, a pressão na profundidade ( $h_1$ ) é:

$$p = p_0 + \rho gh \quad (5a)$$

Onde,  $p_0$  é a pressão atmosférica normal ( $p_0 = 1.01 \times 10^5 Pa = 1 atm = 760 mmHg$ ),  $h$  é a profundidade (em metros) na qual pretende se determinar o valor da pressão,  $g$  é aceleração de gravidade ( $g \approx 9.81 m/s^2$ ), e  $\rho$  é a densidade do líquido em  $kg/m^3$

## Hidrostática - Pressão absoluta - Cont.

Na Eq.5a,  $p$  denomina-se **pressão absoluta ou total** e  $\rho gh$  denomina-se **pressão manométrica**. Deste modo:

$$p_{manometrica} = p_{absoluta} - p_{atmosferica} \quad (6)$$

Varias conclusões que podemos tirar apartir da Eq.5a, a saber:

- Se o sistema é fechado, i.é., não está em comunicação com o meio externo, a pressão a uma profundidade  $h$  em um líquido homogêneo é:  $p = \rho gh$
- A pressão é constante em todos os pontos que se encontram em um plano horizontal<sup>1</sup>

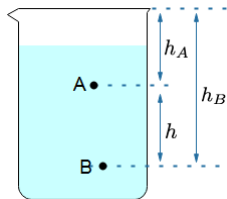
---

<sup>1</sup>Reparem que esta constatação permite-nos determinar a densidade de um dado líquido em caso de uma mistura de dois ou mais tipos de líquidos

# Hidrostática - Teorema de Stevin

## Princípio fundamental da hidrostática ou Teorema de Stevin

A diferença entre as pressões em dois pontos dentro de um líquido em equilíbrio é igual ao produto entre massa específica do líquido a aceleração de gravidade e a diferença entre as profundidades dos dois pontos em consideração.

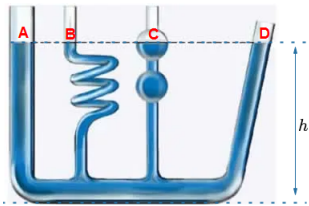


$$\begin{aligned} p_B - p_A &= (p_0 + \rho g h_B) - (p_0 + \rho g h_A) \\ &= \rho g (h_B - h_A) \\ &= \rho g h \end{aligned} \quad (7)$$

Uma das aplicações do teorema de Stevin é o caso de vasos comunicantes.



# Hidroestática - Teorema de Stevin - Cont.

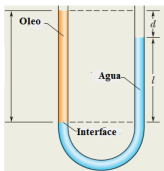


Reparem que independentemente da forma geométrica de cada vaso, quando o líquido (homogêneo) estiver em equilíbrio, a altura é sempre a mesma para todos os vasos.

$$p_A = p_B = p_C = p_D$$

O líquido pode não ser homogêneo, porém, o princípio de Stevin continua aplicável. Vejamos o seguinte exemplo:

Um tubo em U contem dois líquidos em equilíbrio estático. Um dos líquidos é a água ( $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$ ) e o outro é um óleo com uma densidade não conhecida. Sabendo que  $l = 135 \text{ mm}$  e  $d = 12.3 \text{ mm}$ , determine a densidade do óleo.



$$p_{\text{oleo}} = p_0 + \rho_{\text{oleo}}g(l + d)$$

$$p_{\text{agua}} = p_0 + \rho_{\text{agua}}gl$$

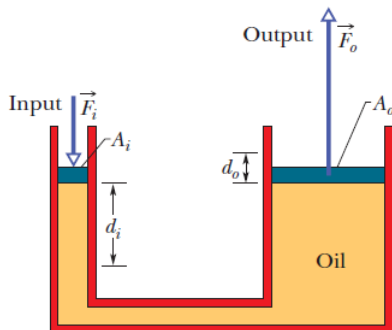
$$p_{\text{oleo}} = p_{\text{agua}} \Rightarrow \rho_{\text{oleo}}(l + d) = \rho_{\text{agua}}l$$

$$\rho_{\text{oleo}} = \left( \frac{l}{l+d} \right) \rho_{\text{agua}} \rightsquigarrow \rho_{\text{oleo}} = 915 \text{ kg/m}^3$$

# Hidroestática - Princípio de Pascal

## Princípio de Pascal

O acréscimo de pressão produzido num líquido em equilíbrio, por menor que seja, transmite-se integralmente a todos os pontos do fluido.



$$\Delta p_i = \frac{F_i}{A_i} \quad \text{e} \quad \Delta p_o = \frac{F_o}{A_o}$$

$$\Delta p_i = \Delta p_o \Rightarrow \frac{F_i}{A_i} = \frac{F_o}{A_o}$$

$$F_o = F_i \frac{A_o}{A_i} \quad (8)$$

Usando agora o volume (V):

$$V_i = V_o \Rightarrow A_i d_i = A_o d_o$$

$$d_o = d_i \frac{A_o}{A_i} \quad (8a)$$

# Hidrostatica - Princípio de Pascal - Cont.

Exemplo,

Considere que o raio da secção de pistão de entrada seja de 0.5 cm ( $r_i = 0.5cm$ ) e o de secção de saída seja de 4.0 cm ( $r_o = 4.0cm$ ) e, a força na entrada é de 50 N. A força no pistão de saída é:

$$F_o = \frac{\pi(4.0)^2}{\pi(0.5)^2} \times 50 = 3200N$$

Com este exemplo percebe-se que a força no pistão de saída é 64 vezes a força na entrada ( $F_o = 64 \times F_i$ ). Reparem que esta amplificação consegue-se sem a necessidade de se realizar mais trabalho ( $W = F_o d_o = F_i d_i$ ) e, isso é uma das vantagens do uso do princípio de Pascal.

# Hidrostática - Princípio de Arquimedes

## Princípio de Arquimedes

Um corpo totalmente ou parcialmente imerso em um líquido qualquer é sujeito a uma força vertical de baixo para cima (força de impulsão), igual ao módulo do peso do volume do líquido deslocado pelo corpo.

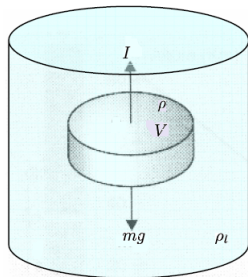


Figura 5: Força de impulsão

$$I = \rho_l V_l g \quad (9)$$

Onde,  $I$  é a força de impulsão em  $N$ ,  $V_l$  é o volume do líquido deslocado em  $m^3$ ,  $\rho_l$  é a densidade do líquido e  $g$  é aceleração de gravidade. Reparem que a força resultante sobre o corpo é  $\vec{F} = \vec{I} - m\vec{g}$ , e a sua magnitude é:

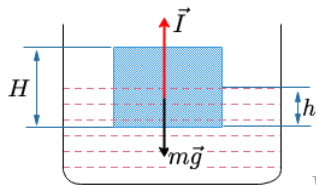
$$F = \rho_l V g - \rho V g = (\rho_l - \rho) V g \quad (10)$$

- Se  $\rho_l > \rho$  o sentido da força  $\vec{F}$  é para cima e o corpo tende a flutuar;

# Hidrostatica - Princípio de Arquimedes - Cont.

Exemplo;

Um bloco denso de  $6.0\text{cm}$  de altura e com uma densidade de  $800\text{kg}/\text{m}^3$ , é colocado em um líquido com uma densidade de  $1200\text{kg}/\text{m}^3$ . Determine a altura do bloco que imerge no líquido.



$$|\vec{I}| = m|\vec{g}| \Rightarrow \rho_l V_d g = \rho V g$$

$$\rho_l A h g = \rho A H g \Rightarrow h = H \frac{\rho}{\rho_l}$$

$$\leadsto h = 4.0\text{cm}$$

$V_d$  é o volume do líquido deslocado pelo bloco.

## Peso aparente

Corpos imersos em líquidos parecem ser mais leves do que realmente são fora dos líquidos.

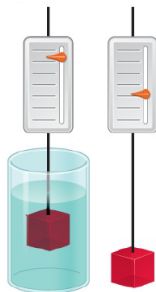


Figura 6: Peso aparente

$$\begin{aligned}P_{ap} &= P - \rho_l V_d g \\ &= \rho V g - \rho_l V_d g\end{aligned}\quad (11)$$

Se o corpo estiver totalmente imerso no líquido, i.,é.,  $V = V_d$ :

$$P_{ap} = (\rho - \rho_l) V g \quad (11a)$$

onde,  $P_{ap}$  é peso aparente,  $P$  é o peso real do objecto,  $\rho$  é a densidade do objecto e  $V$  é o volume do objecto.

# Hidrostatica - Princípio de Arquimedes - Cont.

## Exemplo.

No corpo humano, a densidade de um músculo magro é de  $1.06 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  e a densidade do tecido gordo é de  $9.3 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$ . Se uma pessoa que pesa 833 N no ar livre tem um peso aparente de 27.4 N quando imerge na água, determine a percentage de gordura no seu corpo, assumindo que só é composta de músculos e gordura.

### Dados:

$$\rho_m = 1.06 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_g = 9.3 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_l = 1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$P = 833 \text{ N}$$

$$P_{ap} = 27.4 \text{ N}$$

$$\chi = ?$$

### Vol. da pessoa:

$$P_{ap} = P - \rho_l V g$$

$$V = \frac{P - P_{ap}}{(\rho_l g)}$$

$$V \approx 0.081 \text{ m}^3$$

### Densidade da pessoa:

$$P_{ap} = (\rho - \rho_l) V g$$

$$\rho = \frac{P_{ap}}{V g} + \rho_l$$

$$\rho = 1.034 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

# Hidrostatica - Princípio de Arquimedes - Cont.

A massa da pessoa é:  $m = m_m + m_g$  e o volume da pessoa também é a superposição dos volumes, i.e.,  $V = V_m + V_g$ . Assim:

$$\begin{aligned} m_m &= m - m_g & V &= V_m + V_g \\ m_m &= m - \chi m & \frac{m}{\rho} &= \frac{m_m}{\rho_m} + \frac{m_g}{\rho_g} & \chi &= \frac{\rho_g(\rho_m - \rho)}{\rho(\rho_m - \rho_g)} \\ m_m &= (1 - \chi)m & \frac{m}{\rho} &= \frac{(1 - \chi)m}{\rho_m} + \frac{\chi m}{\rho_g} & \chi &\approx 18\% \end{aligned}$$

onde,  $m_m$  é a massa muscular,  $m_g$  é a massa da gordura e  $m$  é a massa da pessoa.

Com este resultado pode-se afirmar que 18% da massa desta pessoa é gordura.

Qual é a faixa da percentagem de gordura em uma pessoa adulta saudável segundo a OMS?



# MANÔMETROS

# Manômetros

Os manômetros são aparelhos usados para medir pressões manométricas.

$$p_{manom} = p_{abs} - p_{atm}$$

A pressão atmosférica mede-se com o **barômetro** cujos princípios do funcionamento são acreditados a Torricelli(1608-1647)

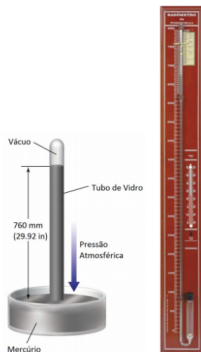


Figura 7: Barômetro de Torricelli

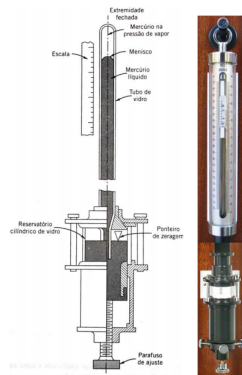


Figura 8: Barômetro de Fortin

Para a medição de pressões acima ou abaixo da pressão atmosférica (barométrica) usa-se manômetros. Estes subdividem-se em dois tipos:

- ① **Manômetros de coluna de líquido** - utilizam líquido como substância manométrica
  - Tubo em "U"
  - Colunas de áreas diferentes
  - Coluna inclinada
- ② **Manômetros de tipo elástico** - utilizam a deformação de um elemento elástico como meio para se medir a pressão.
  - Tipo tubo de Bourdon
  - Tipo diafragma
  - Tipo fole
  - Tipo cápsula

## Manômetros - Cont.

É basicamente constituído por um tubo de vidro com uma secção uniforme, uma escala graduada e um líquido manométrico(  $H_2O$ ,  $CCl_4$  e  $Hg$ ).

Seu princípio de funcionamento consiste na aplicação de pressão num dos terminais do seu tubo o que faz com que o líquido desça nesse ramo e suba no outro ramo. Por exemplo, para a Fig.9, a pressão aplicada é  $p_B$ .  $p_A$  é pressão atmosférica. Assim:

$$p_0 = p_A + \rho g H + \rho_m g h$$

$$p_1 = p_B + \rho g H + \rho g h$$

$$p_0 = p_1 \Rightarrow \boxed{p_B - p_A = (\rho_m - \rho) g h}$$

O inverso da diferença das densidades dos fluidos no tubo é a sensibilidade do manômetro, isto é,

$$\kappa = \frac{1}{\rho_m - \rho} \quad (12)$$

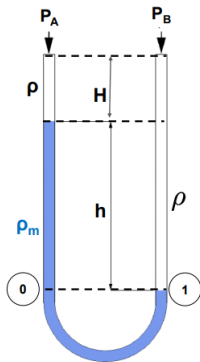


Figura 9: Tubo em U



## Manômetros - Cont.

O manômetro de tubo tipo em U tem a desvantagem de que a mudança em altura do líquido deve ser lida em ambos lados do manômetro. Isto pode-se evitar usando manômetro de poço.

### Manômetro de colunas de áreas diferentes (Manômetro de poço)

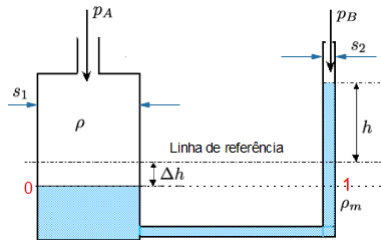


Figura 11: Manômetro de poço

$$p_0 = p_A + \rho g(h + \Delta h)$$

$$p_1 = p_B + \rho_m g(h + \Delta h)$$

$$p_A - p_B = g(\rho_m - \rho)(h + \Delta h)$$

Sendo que o volume deslocado é o mesmo (Eq. de continuidade)  $V_1 = V_2$ :

$$\Delta h s_1 = h s_2 \Rightarrow \Delta h = h \frac{s_2}{s_1}$$

$$p_A - p_B = (\rho_m - \rho)g \left( 1 + \frac{s_2}{s_1} \right)$$

## **Manômetros de tipo elástico - Tubo de Bourdon**