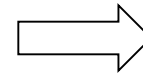
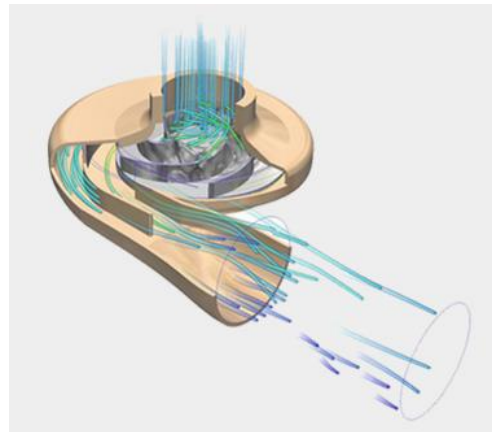
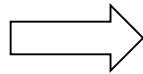


# Introdução e Conceitos básicos

Oscar Rodriguez

Universidade de São Paulo



# Mecânica dos Fluidos:

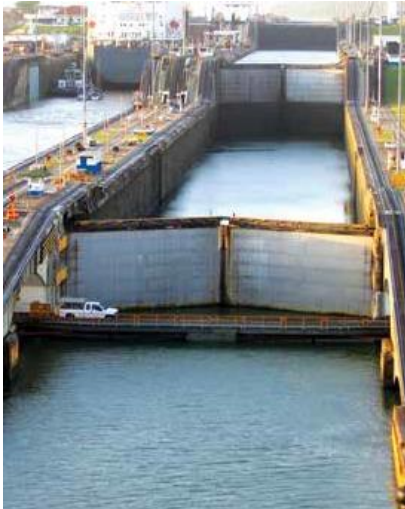
é o estudo do comportamento dos fluidos que estão em repouso ou em movimento. Trata-se de uma das principais ciências da engenharia...

## Engenheiro Mecânico:

projeto de bombas, compressores, turbinas, sistemas de controle de processo, equipamentos de calefação e resfriamento, projetar turbinas eólicas e dispositivos de aquecimento solar, etc.

# Ramos da Mecânica dos Fluidos

- ***Hidrostática*** considera as forças que atuam sobre um fluido em repouso.



- ***Cinemática dos fluidos*** é o estudo da geometria do movimento do fluido.

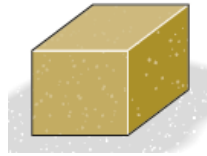


- ***Dinâmica dos fluidos*** considera as forças que causam aceleração de um fluido.

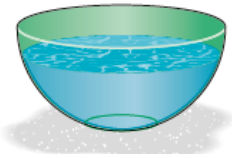


# Estados físicos da matéria

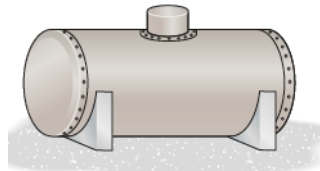
✓ Sólido



✓ Líquido

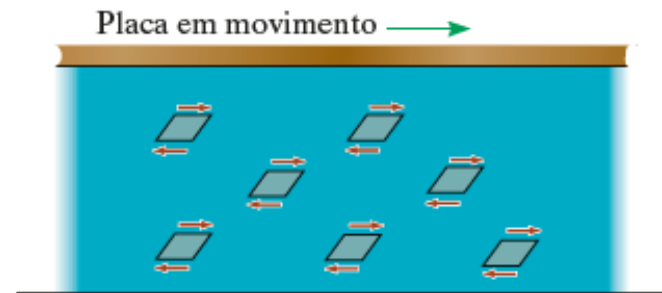


✓ Gás



## Definição de um fluido

- ✓ Líquidos e gases são classificados como fluidos porque são substâncias que se deformam ou fluem continuamente quando sujeitas a uma força de cisalhamento ou tangencial

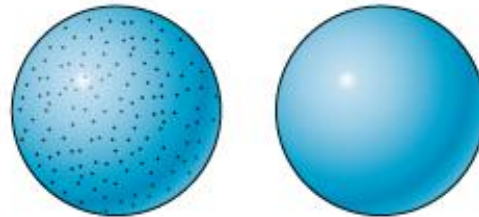


Todos os elementos fluidos se *deformam* quando sujeitos ao cisalhamento

# Hipótese do Contínuo

Quase todas as aplicações da engenharia envolvem um volume de fluido que é muito maior do que a distância entre moléculas adjacentes do fluido.

- Hipótese: fluido como algo contínuo, i.e., uma distribuição contínua de matéria, sem espaços vazios
- Exceção à regra: situações nas quais a distância molecular torna-se importante a hipótese do contínuo não se aplica, e é necessário empregar técnicas estatísticas para estudar o escoamento do fluido.



Fluido real

Hipótese do contínuo

# Verificação da hipótese do contínuo

Considerando um gás qualquer submetido às CNTP, teremos:

1 mol de gás  $\Rightarrow$  22,4 litros

1 mol de gás  $\Rightarrow$   $6,02 \times 10^{23}$  moléculas de gás

Tomando um volume pequeno  $\Rightarrow$   $dV = 10^{-9} \text{ mm}^3$ , podemos calcular o número de moléculas contidas nesta porção:

22,4 l  $\rightarrow$   $6,02 \times 10^{23}$  moléculas

22,4 l = 22,4 dm<sup>3</sup> =  $22,4 \times 10^6 \text{ mm}^3$

$$n^\circ \text{ de moléc} = 6,02 \times 10^{23} \times \frac{10^{-9}}{22,4 \times 10^6} = 2,69 \times 10^7$$

# Sistemas de unidades

- ✓ Existem cinco **quantidades** básicas utilizadas na mecânica dos fluidos: comprimento, tempo, massa, força e temperatura.
- ✓ Dessas, as quatro primeiras se relacionam pela segunda lei de Newton; três **unidades** utilizadas para definir a medida dessas quantidades podem ser selecionadas arbitrariamente; a quarta unidade é **derivada** da equação  $F = ma$ .

**TABELA 1.1** Sistemas de unidades.

Nome	Comprimento	Tempo	Massa	Força	Temperatura	
Comuns nos EUA	pé	segundo	slug*	libra	Rankine	Fahrenheit
FPS	pé	s	$\left(\frac{\text{lb} \cdot \text{s}^2}{\text{pé}}\right)$	lb	°R	°F
Sistema Internacional de Unidades	metro	segundo	quilograma	Newton*	Kelvin	Celsius
SI	m	s	kg	$\left(\frac{\text{N}}{\text{s}^2}\right)$	K	°C

\* Unidade derivada.

# Homogeneidade dimensional

- ✓ Os termos de uma equação usada para descrever um processo físico deverão ser dimensionalmente homogêneos, ou seja, cada termo deverá ser expresso nas mesmas unidades.

Exemplo: Equação de Bernoulli

$$\frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z = \text{constante}$$

$$\frac{\text{N/m}^2}{\text{N/m}^3} + \frac{(\text{m/s})^2}{\text{m/s}^2} + \text{m}$$

- ✓ Não importando como essa equação está arrumada algebricamente, ela deverá manter sua homogeneidade dimensional!

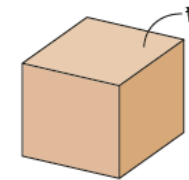


# Propriedades básicas dos Fluidos

## Densidade

- ✓ A **densidade**  $\rho$  (rô) refere-se à massa do fluido que está contida em uma unidade de volume. Ela é medida em  $\text{kg/m}^3$  ou  $\text{slug/pé}^3$  e é determinada a partir de:

$$\rho = \frac{m}{V}$$



Densidade é  
massa/volume

**Líquido:** é praticamente incompressível, ou seja, a densidade de um líquido varia pouco com a pressão.

**Gás:** Ao contrário de um líquido, a temperatura e a pressão podem afetar bastante a densidade de um gás, pois ele possui um grau de compressibilidade mais alto.

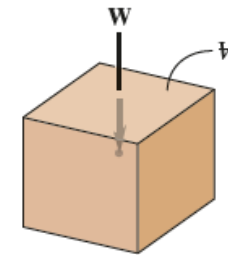
## Alguns valores típicos de densidade ( $\rho$ )

FLUIDO	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
Água destilada a 4° C	1000
Água do mar a 15° C	1026
AR à pressão atm. e 15° C	1,22
AR à pressão de 2 atm. e 15° C	2,44
Mercúrio	13600
Tetracloroeto de carbono	1592
Petróleo	880

# Peso específico

- ✓ O peso específico  $\gamma$  (gama) de um fluido é o seu peso por unidade de volume. Ele é medido em  $\text{N/m}^3$  ou  $\text{lb/pés}^3$ , logo:

$$\gamma = \frac{W}{V}$$



Peso específico  
é peso/volume

Visto que o peso está relacionado à massa por  $W = mg$ , então:

$$\gamma = \rho g$$

## Densidade relativa

- ✓ A densidade relativa  $S$  de uma substância é uma quantidade adimensional definida como a razão entre sua densidade e a de alguma outra substância considerada como um “padrão”. Assim:

$$S = \frac{\rho}{\rho_w} = \frac{\gamma}{\gamma_w}$$

Normalmente, o “padrão” é a densidade da água a 1 atm. e a 4° C, que neste caso é  $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$  em unidades do SI.

# Exemplo

Sabendo-se que, nas C.N.P.T., o volume de 1 mol de gás ideal ocupa 22,4 litros, calcular a densidade do metano ( $\text{CH}_4$ ) nestas condições. Adotar o sistema SI.

O peso molecular do metano é:

$$\text{CH}_4: 12,0 \times 1 + 1,0 \times 4 = 16$$

- Onde a massa  $m = 16 \text{ g/mol} = 0,016 \text{ kg/mol}$

Nas CNTP, o volume ocupado por uma molécula-grama (mol) da substância é constante e igual a

$$22,4 \text{ litros} = 0,0224 \text{ m}^3/\text{mol}$$

- Onde  $V = 0,0224 \text{ m}^3/\text{mol}$

Da definição:  $\rho = \frac{m}{V}$

$$\rho = \frac{0,016 \text{ kg/mol}}{0,0224 \text{ m}^3/\text{mol}} = 0,714 \text{ kg/m}^3$$

# Lei dos gases perfeitos

Consideramos que esse gás possui separação suficiente entre suas moléculas para que elas não se atraiam umas pelas outras. Além disso, o gás não deve estar perto do ponto de condensação para um estado líquido ou sólido

$$P = \rho RT$$

$P$  → pressão absoluta

$\rho$  → densidade

$T$  → temperatura em Kelvin

$R$  → constante característica de cada gás (por exemplo, para o ar,

$$R = 286,9 \text{ J}/(\text{kg K}))$$

## Exemplo

Consideremos um gás perfeito, a  $27^\circ \text{C}$ , aprisionado num cilindro por um êmbolo de peso desprezível, que se move ao longo do cilindro, sem atrito. Coloquemos sobre o êmbolo um peso  $W$ . Em seguida, aquecemos o gás a  $127^\circ \text{C}$ . Observamos, em consequência, um aumento de 50% na pressão absoluta do gás. Sendo  $V_i$  o volume inicial do gás, qual será seu volume final?

→Equação geral dos gases ideais:

$$\frac{P_i V_i}{T_i} = \frac{P_f V_f}{T_f}$$

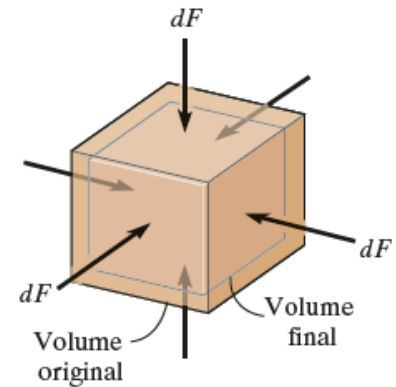
→Como:  $T_i = 27 + 273 = 300\text{K}$   
 $T_f = 127 + 273 = 400\text{K}$   
 $p_f = 1,50p_i$

$$V_f = \frac{p_i V_i T_f}{T_i p_f} = \frac{p_i V_i 400}{300 \times 1,50 p_i} = \frac{8}{9} V_i$$

# Módulo de elasticidade volumétrico

O módulo de elasticidade volumétrico é uma medida da magnitude pela qual um fluido oferece uma resistência à compressão.

$$E_v = - \frac{dP}{\frac{dV}{V}} \Big|_T = \frac{dP}{\frac{d\rho}{\rho}} \Big|_T$$

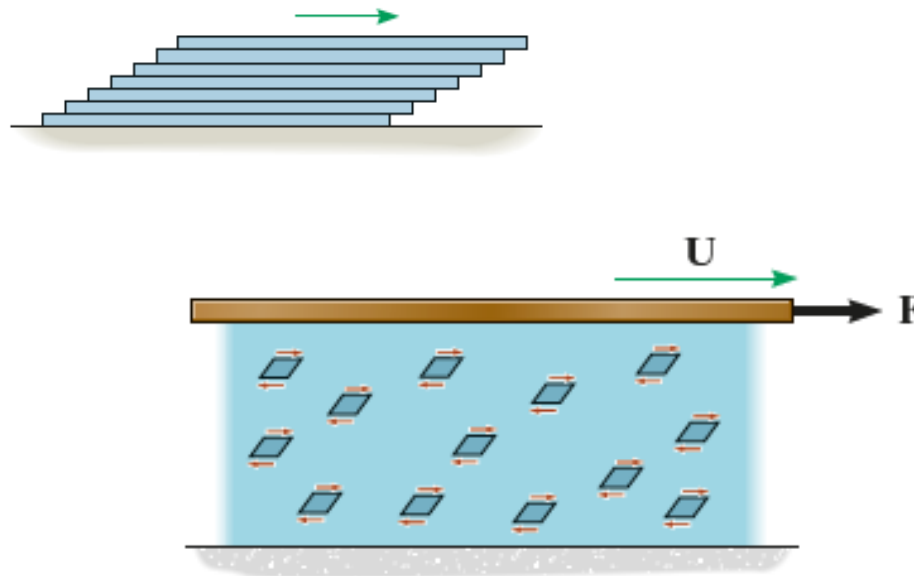


- ✓ Água do mar na pressão atmosférica e temperatura ambiente possui um módulo de elasticidade de cerca de  $E_v = 2,20$  GPa.
- ✓ Se um gás escoar em baixas velocidades, ou seja, menos de cerca de 30% da velocidade do som no gás, então neste caso um gás também pode ser considerado incompressível, mesmo com seu baixo módulo de elasticidade volumétrico



# Viscosidade

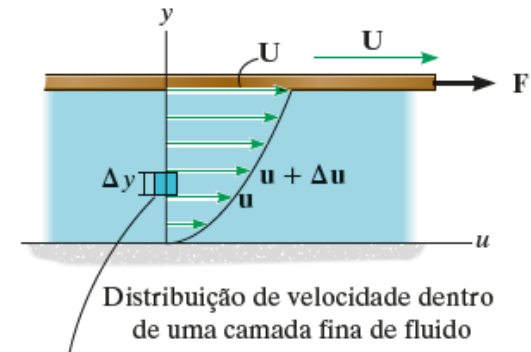
**Viscosidade** é uma propriedade de um fluido que mede a resistência ao movimento de uma camada muito fina de fluido sobre uma camada adjacente. Essa resistência ocorre somente quando uma força tangencial ou de cisalhamento é aplicada ao fluido.



Distorção dos elementos  
fluidos causada pelo cisalhamento

## Lei da viscosidade de Newton

- ✓ Considerar uma fina camada de fluido que é confinado entre uma superfície inferior fixa e uma placa horizontal muito larga.
- ✓ Quando uma força horizontal muito pequena  $\mathbf{F}$  é aplicada à placa, ela fará com que os elementos do fluido se distorçam.
- ✓ A resistência viscosa do fluido levará a placa ao equilíbrio, de modo que a placa começará a se mover com uma velocidade constante  $\mathbf{U}$ .
- ✓ A força de aderência molecular entre as partículas do fluido em contato com a superfície fixa e a placa cria uma “condição de não deslizamento”.



## Tensão de cisalhamento

Uma *tensão de cisalhamento*  $\tau$  (tau) é definida como uma força tangencial  $\Delta F$  que atua sobre uma área  $\Delta A$  do elemento. Ela pode ser expressa como

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} = \frac{dF}{dA}$$

## Deformação por cisalhamento

essa tensão de cisalhamento fará com que cada elemento se deforme para a forma de um paralelogramo, e durante o curto tempo  $\Delta t$ , a deformação resultante é definida por sua **deformação por cisalhamento**,  $\Delta\alpha$  (alfa), onde

$$\Delta\alpha \approx \text{tg } \Delta\alpha = \frac{\delta x}{\Delta y}$$

Como o topo do elemento se move a uma taxa de  $\Delta u$  relativa à sua parte inferior, então  $\delta x = \Delta u \Delta t$ . A taxa temporal de variação da deformação por cisalhamento torna-se:

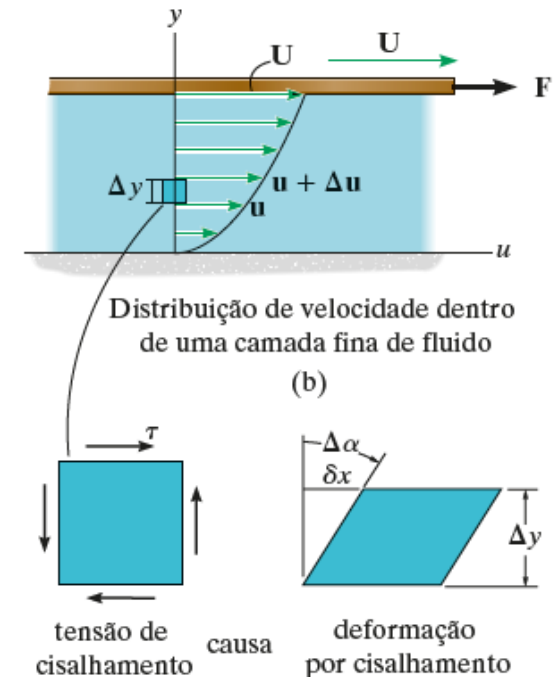
$$\frac{\Delta\alpha}{\Delta t} = \frac{\Delta u}{\Delta y}$$

E no limite, quando  $\Delta t \rightarrow 0$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{du}{dy}$$

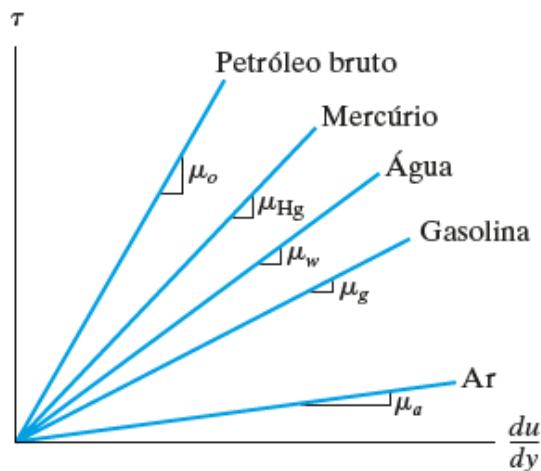
Isaac Newton propôs que a tensão de cisalhamento no fluido é diretamente proporcional a essa taxa de deformação por cisalhamento ou gradiente de velocidade:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$



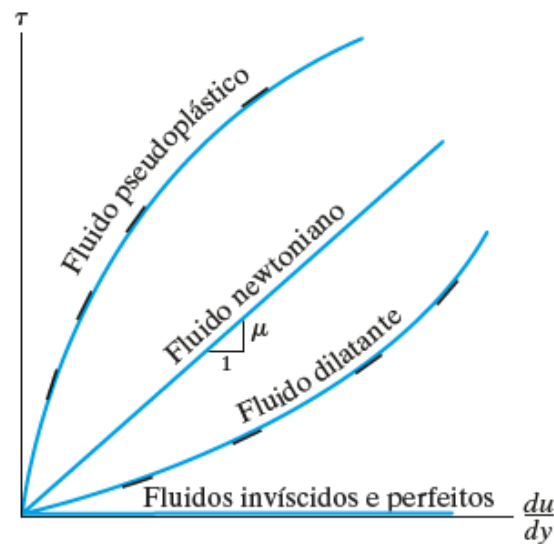
A constante de proporcionalidade é a **viscosidade**  $\mu$  (mi), que é uma *propriedade física do fluido* que mede a *resistência* ao movimento do fluido. A *viscosidade* tem unidades de  $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$  ou  $\text{lb} \cdot \text{s}/\text{ft}^2$

### Fluidos Newtonianos



Quanto maior a viscosidade,  
mais difícil é o escoamento do fluido.

### Fluidos não Newtonianos



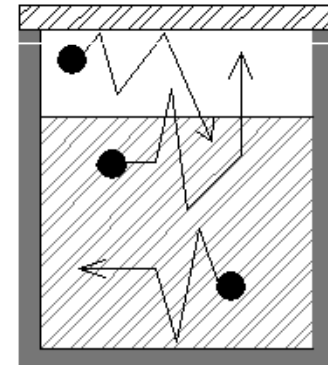
# Pressão de vapor

Um líquido começará a ferver quando a pressão absoluta em sua superfície for igual ou menor que sua *pressão de vapor*; qualquer aumento na temperatura do líquido o fará ferver. De modo semelhante, se a pressão na superfície da água for reduzida, como no topo de uma montanha, então a ebulição ocorrerá nessa pressão inferior, mesmo que a temperatura seja menor.

## Cavitação

- ✓ Quando os engenheiros projetam máquinas de fluxo ou tubulações, é importante evitar que o líquido em qualquer ponto dentro do escoamento esteja sujeito a uma pressão *igual ou menor que* sua pressão de vapor.
- ✓ As bolhas resultantes da evaporação migrarão para regiões de pressão mais alta e se romperão repentinamente, criando um fenômeno conhecido como **cavitação**, responsável pelo desgaste da superfície da lâmina, hélice ou casco de bomba.

Molécula abandonando o líquido e passando ao estado de vapor



Molécula em movimento no interior da porção líquida

# Tensão superficial

- ✓ A tensão superficial é uma propriedade que resulta de forças atrativas entre moléculas.
- ✓ As forças entre moléculas no interior do líquido se anulam, porém numa interface as moléculas exercem uma força que tem uma resultante na camada interfacial
- ✓ Chamamos essa força de tração por unidade de comprimento em qualquer direção ao longo da superfície de **tensão superficial**,  $\sigma$  (sigma). Ela possui unidades de N/m ou lb/ft.

Quebrar a tensão superficial exige trabalho, e a energia produzida por esse trabalho é chamada de **energia de superfície livre**. Suponha que um pequeno elemento da superfície esteja sujeito à força de tensão superficial  $F = \sigma \Delta y$ . Se a superfície se estica por  $\delta x$ , então o aumento na área é  $\Delta y \delta x$ . A força  $F$  realiza trabalho de  $F \delta x$ , portanto, o trabalho realizado por aumento de área é:

$$\frac{F \delta x}{\Delta y \delta x} = \frac{\sigma \Delta y \delta x}{\Delta y \delta x} = \sigma$$

