

# **FENÔMENO DE TRANSPORTE I**

## **AULA 3**

### **CONTINUAÇÃO**

**CONCEITOS E PROPRIEDADES FUNDAMENTAIS**

## DEFINIÇÃO DE CONTÍNUO

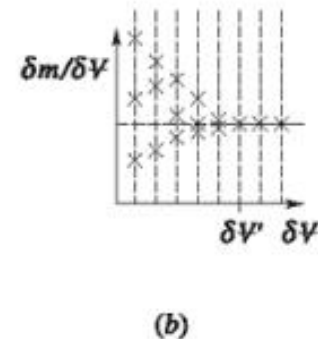
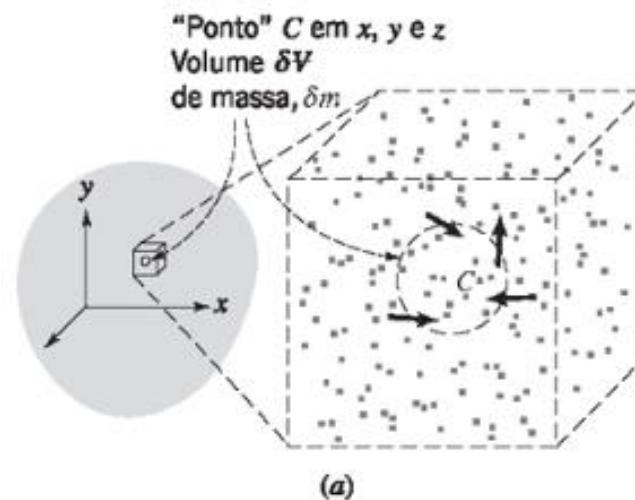
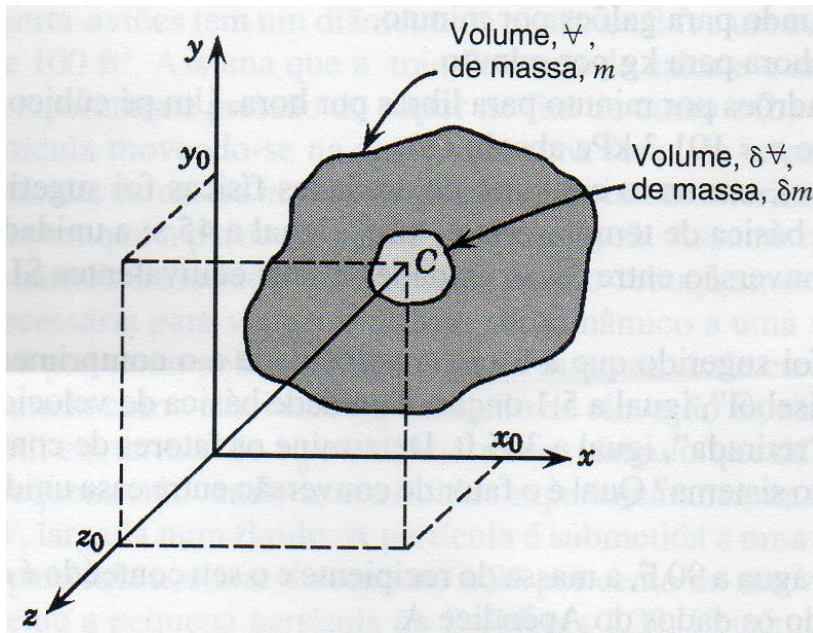
Na nossa definição de fluido, nenhuma menção foi feita à estrutura molecular da matéria. Todos os fluidos são compostos de moléculas em constante movimento. Contudo, na maioria das aplicações de engenharia, estamos interessados nos efeitos médios ou macroscópicos de muitas moléculas. São esses efeitos macroscópicos que comumente percebemos e medimos. Tratamos, assim, um fluido como substância infinitamente divisível, um contínuo (ou *continuum*), e deixamos de lado o comportamento das moléculas individuais.

O conceito de contínuo é a base da mecânica dos fluidos clássica.

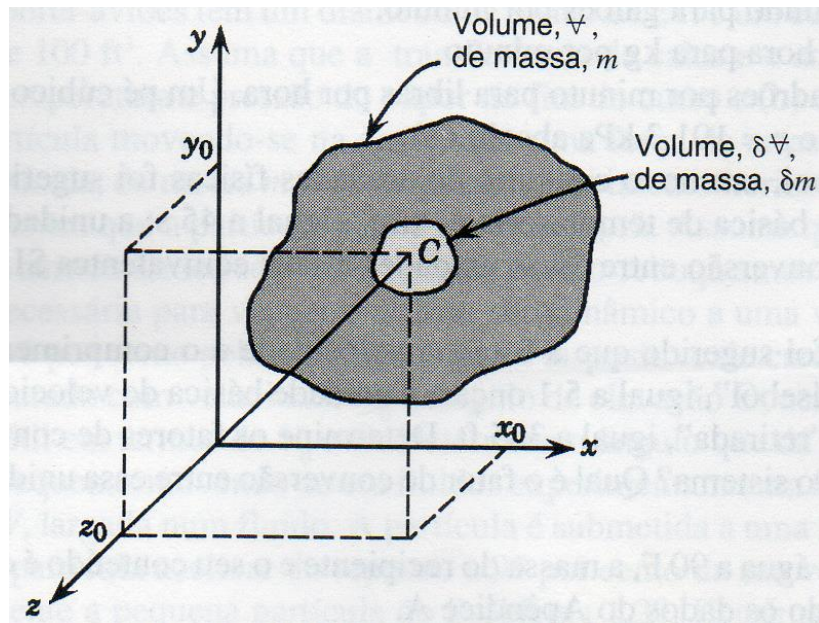
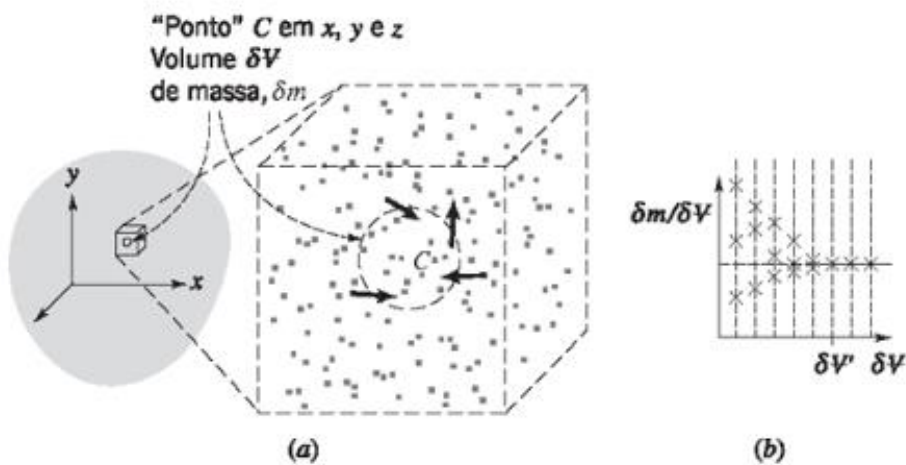
A hipótese é válida no tratamento do comportamento dos fluidos sob condições normais. Em consequência da hipótese do contínuo, cada propriedade do fluido é considerada como tendo um valor definido em cada ponto do espaço.

Dessa forma, propriedades dos fluidos, como massa específica, temperatura, velocidade, etc., são consideradas funções contínuas da posição e do tempo.

No estudo realizado será considerado, salvo menção contrária, que os fluidos são um meio contínuo e homogêneo, de forma que as propriedades médias definidas coincidam com as propriedades nos pontos.



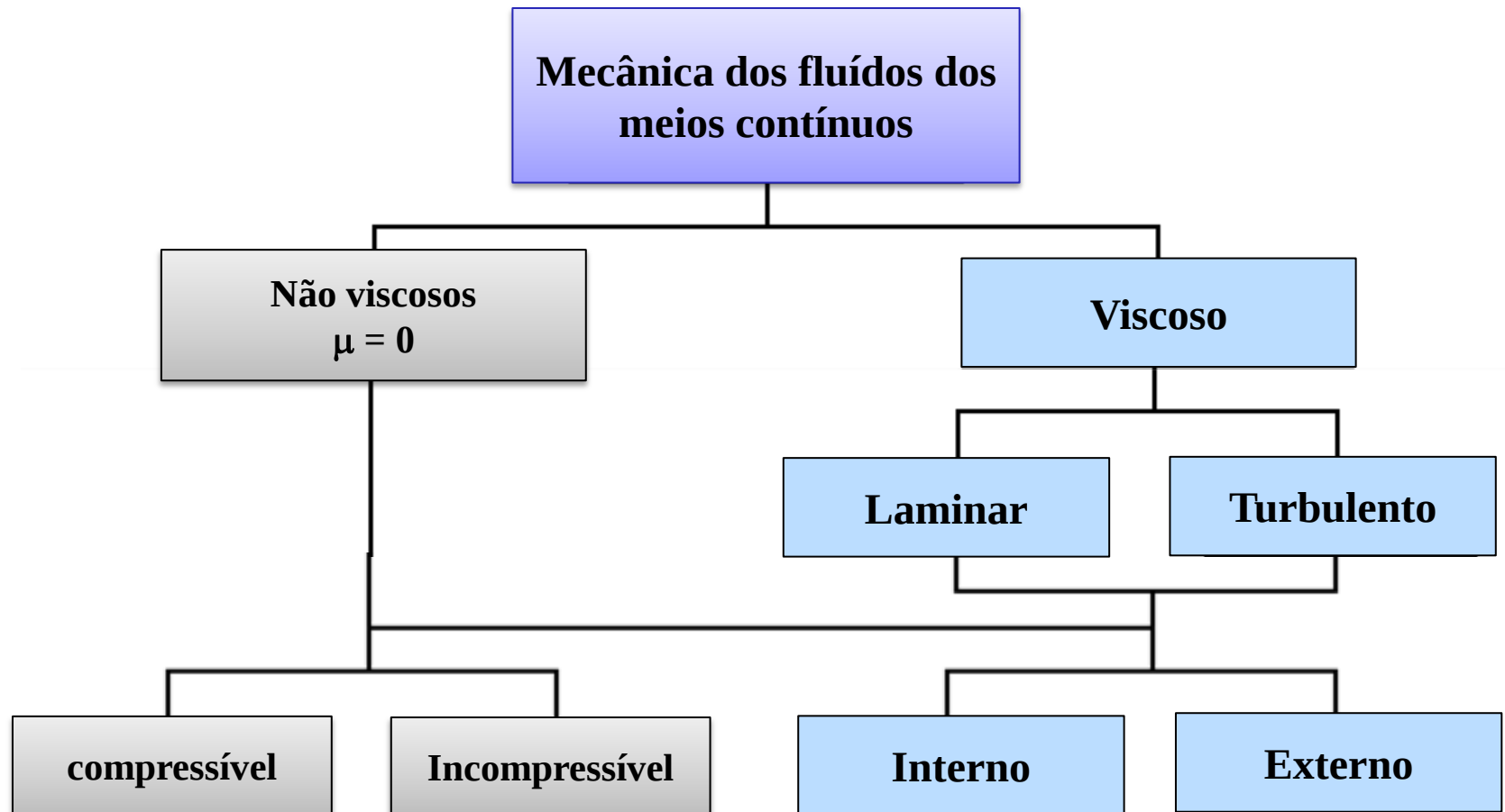
Tal hipótese facilita o estudo e permite introduzir definições simples para todas as propriedades dos fluidos.



Em resumo: região "grande" se comparada com a distância média entre as partículas. Por exemplo, uma região esférica.

**OBSERVAÇÃO:** as grandezas massa específica, pressão, velocidade, etc, variam continuamente dentro do fluido (ou são constantes).

# Possível classificação da mecânica dos fluídos de meios contínuos



## MASSA ESPECÍFICA ( $\rho$ )

*Massa específica* é a massa de fluido por unidade de volume.

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

Onde:

m = massa

V = volume

*Unidades*

Por análise dimensional, utilizando FLT:

Sistema MK\*S  $\rightarrow$  kgf . s<sup>2</sup> / m<sup>4</sup>

Sistema SI  $\rightarrow$  N . s<sup>2</sup> / m<sup>4</sup> = kg/m<sup>3</sup>

Sistema CGS  $\rightarrow$  dina . s<sup>2</sup> / cm<sup>4</sup> = g/cm<sup>3</sup>

Para uma substância  $\Rightarrow$  massa específica = densidade

Densidade de um objeto, de um corpo  $\Rightarrow d = m / V$

Substância  $\rightarrow$  densidade “relativa”

$$d_{rel} = \frac{\rho_{subst}}{\rho_{ref}}$$

Geralmente:

$$d_{rel} = \frac{\rho_{subst}}{\rho_{\text{água}; 4^{\circ} \text{C}}}$$

## EXEMPLOS:

**1-** Um objeto feito em ouro maciço tem 500 g de massa e  $25 \text{ cm}^3$  de volume. Determine a densidade do objeto e a massa específica do ouro.

**2-** Um cubo de aresta 8 cm é homogêneo, exceto na sua parte central, onde existe uma região oca, na forma cilíndrica, de altura 4 cm e área da base  $5 \text{ cm}^2$ . Sendo 1280 g a massa do cubo, determine a densidade do cubo e a massa específica da substância que o constitui.

## PESO ESPECÍFICO ( $\gamma$ )

*Peso específico* é o peso do fluido por unidade de volume.

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

Onde:

G = peso

V = volume

*Unidades*

Por análise dimensional, tem-se:

Sistema MK\*S  $\rightarrow$  kgf/m<sup>3</sup>

Sistema SI  $\rightarrow$  N . s<sup>2</sup> / m<sup>4</sup> = N/m<sup>3</sup>

Sistema CGS  $\rightarrow$  dina/cm<sup>3</sup>

Pode-se deduzir uma relação simples entre peso específico e massa específica:

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad \text{mas} \quad G = mg$$

$$\gamma = \frac{mg}{V} \quad \text{e} \quad \boxed{\gamma = \rho g}$$

## **PESO ESPECÍFICO RELATIVO PARA LÍQUIDOS( $\gamma_r$ )**

É a relação entre o peso específico do líquido e o peso específico da água em condições padrão.

Será adotado que:

$$\gamma_{H_2O} = 1.000 \text{ kgf} / \text{m}^3 \cong 10.000 \text{ N} / \text{m}^3$$

Como a massa específica e o peso específico diferem por uma constante, conclui-se que a massa específica relativa e o peso específico relativo coincidem.

**EXEMPLO**

*O peso específico relativo de uma substância é 0,8.*

*Qual será seu peso específico?*

## VISCOSIDADE CINEMÁTICA ( $\nu$ )

*Viscosidade cinemática* é o quociente entre a viscosidade dinâmica e a massa específica.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Onde:

$\mu$  = viscosidade dinâmica

$\rho$  = massa específica

$\nu$  - m<sup>2</sup>/s

## *Unidades*

Por análise dimensional, utilizando FLT, teremos:

Sistema MK\*S  $\rightarrow$  m<sup>2</sup>/s

Sistema SI  $\rightarrow$  m<sup>2</sup>/s

Sistema CGS  $\rightarrow$  cm<sup>2</sup>/s = stoke (St)

Utiliza-se ainda o centistoke: 1 cSt = 0,01 St.

## **OBSERVAÇÃO:**

Das unidades, verifica-se que o nome – viscosidade cinemática – deve-se ao fato de essa grandeza não envolver força, mas somente comprimento e tempo, que são as grandezas fundamentais da Cinemática.

## VOLUME ESPECÍFICO ( $v$ )

*Volume específico* é o volume ocupado pela unidade de massa de fluido.

$$v = \frac{1}{\rho}$$

## PRESSÃO (p)

*Pressão* é o quociente entre a força normal aplicada e a área onde a força está sendo aplicada.

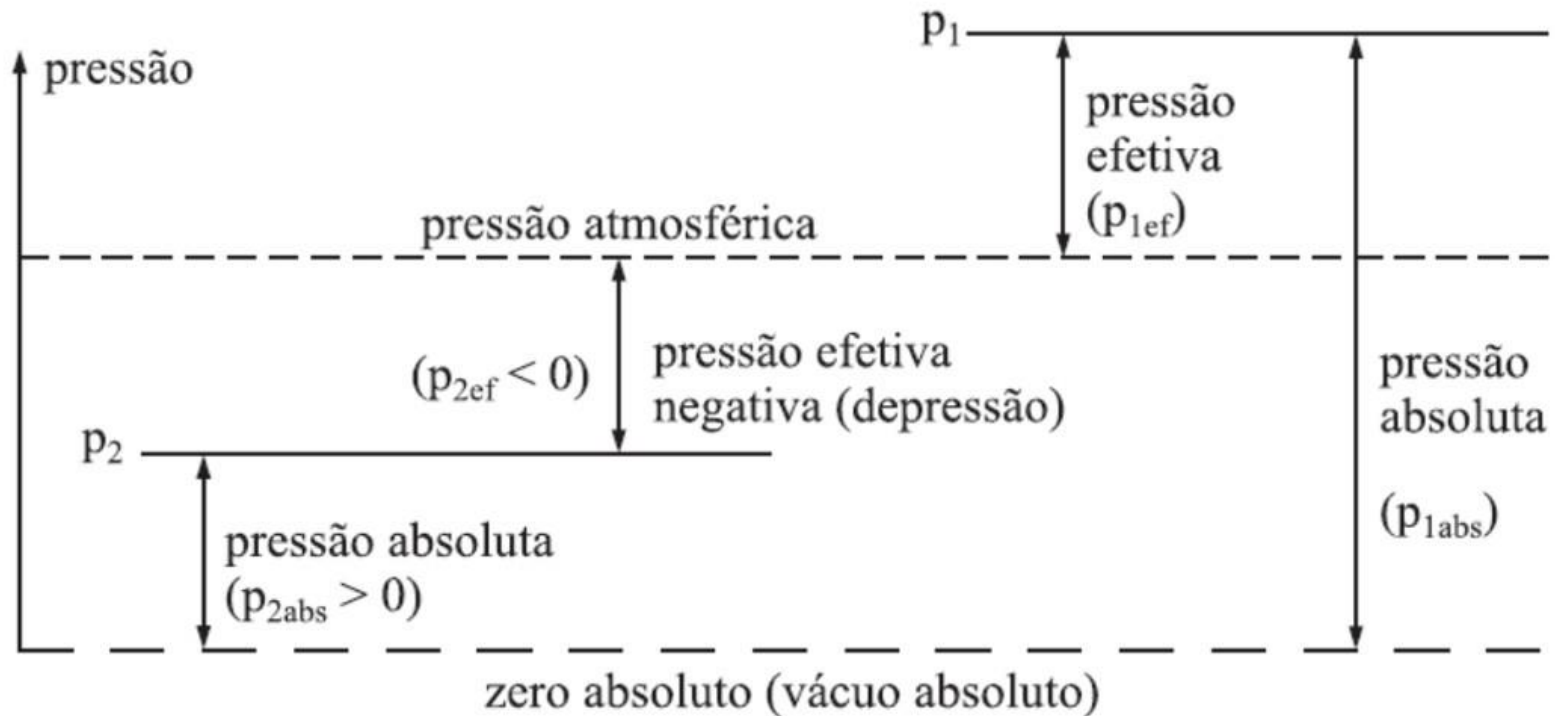
$$p = \frac{F_n}{A}$$

### *Unidades*

Sistema MK\*S → kgf/m<sup>2</sup>

Sistema SI → kg/m.s<sup>2</sup> = N/m<sup>2</sup> = pascal (Pa)

## Relação entre as pressões efetivas e absoluta



## EXERCÍCIOS:

**1-** Um tijolo de 200 g e de dimensões 5 x 10 x 20 cm é apoiado sobre uma superfície horizontal. Determine as pressões que ele pode exercer.

**2-** Uma banqueta de três pernas pesa 50 N e cada perna tem seção reta uniforme de área 5 cm<sup>2</sup>. Subindo nela uma pessoa de 700 N, qual será a pressão que cada perna exercerá no solo horizontal?

## FLUIDO IDEAL

*Fluido ideal é aquele cuja viscosidade é nula.* Por essa definição conclui-se que é um fluido que escoa sem perdas de energia por atrito.

É claro que nenhum fluido possui essa propriedade; no entanto, será visto no decorrer do estudo que algumas vezes será interessante admitir essa hipótese, ou por razões didáticas ou pelo fato de a viscosidade ser um efeito secundário do fenômeno.

## FLUIDO OU ESCOAMENTO INCOMPRESSÍVEL

*Diz-se que um fluido é incompressível se o seu volume não varia ao modificar a pressão.*

Isso implica o fato de que, se o fluido for incompressível, a sua massa específica não variará com a pressão.

É claro que na prática não existem fluidos nessas condições. Os líquidos, porém, têm um comportamento muito próximo a esse e na prática, normalmente, são considerados como tais.

Mesmo os gases em certas condições, em que não são submetidos a variações de pressão muito grandes, podem ser considerados incompressíveis. Um dos exemplos práticos é o estudo de ventilação, em que, em geral, essa hipótese é aceitável.

É importante compreender que nenhum fluido deve ser julgado de antemão. Sempre que ao longo do escoamento a variação da massa específica  $\rho$  for desprezível, o estudo do fluido será efetuado pelas leis estabelecidas para fluidos incompressíveis.

## EQUAÇÃO DE ESTADO DOS GASES

Quando um fluido não puder ser considerado incompressível e, ao mesmo tempo, houver efeitos térmicos, haverá necessidade de determinar as variações da massa específica  $\rho$  em função da pressão e da temperatura.

De uma maneira geral, essas variações obedecem, para os gases, a lei do tipo

$$f(\rho, p, T) = 0$$

denominadas equações de estado.

Para as finalidades desse desenvolvimento, sempre que for necessário, o gás envolvido será suposto como “gás perfeito”, obedecendo à equação de estado:

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad \text{ou} \quad \rho = \frac{p}{RT}$$

Onde:

$p$  = pressão absoluta

$R$  = constante cujo valor depende do gás

$T$  = temperatura absoluta (K)

Para o ar, por exemplo,  $R \cong 287 \text{ m}^2 / \text{s}^2 \text{ K}$ .

Numa mudança do estado de um gás:

$$\frac{p_1}{p_2} \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{T_1}{T_2}$$

►► O processo é dito isotérmico quando na transformação não há variação de temperatura. Nesse caso:

$$\frac{p_1}{\rho_1} = \frac{p_2}{\rho_2} = cte$$

►► O processo é dito isobárico quando na transformação não há variação de pressão. Nesse caso:

$$\rho_1 T_1 = \rho_2 T_2 = cte$$

►► O processo é dito isocórico ou isométrico quando na transformação não há variação de volume. Nesse caso:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} = cte$$

►► O processo é dito adiabático quando na transformação não há troca de calor. Nesse caso:

$$\frac{p_1}{\rho_1^k} = \frac{p_2}{\rho_2^k} = cte$$

Onde  $k$  é a chamada *constante adiabática* cujo valor depende do gás.

No caso do ar,  $k = 1,4$ .

**EXEMPLO:**

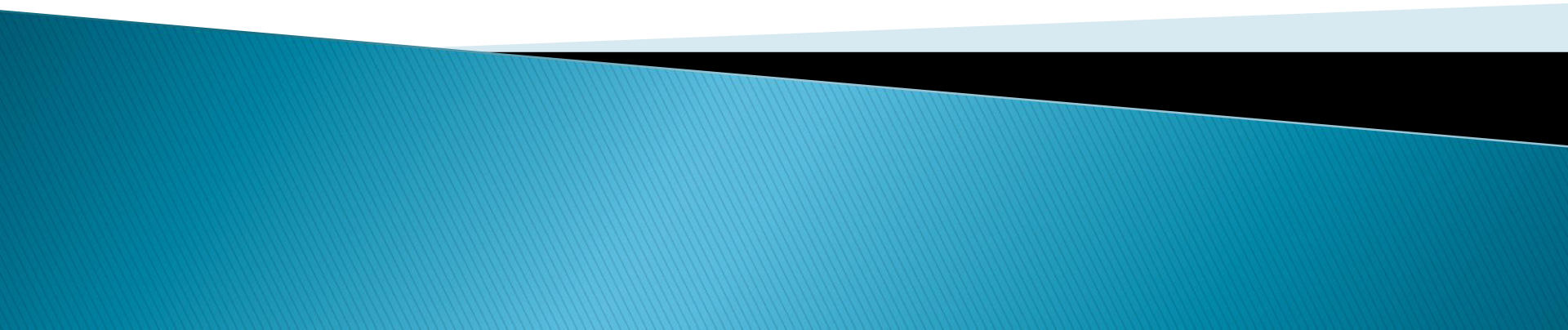
Numa tubulação escoia hidrogênio ( $k = 1,4$  ;  $R = 4.122 \text{ m}^2 / \text{s}^2 \text{ K}$ ).

Numa seção (1),  $p_1 = 3 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \text{ (abs)}$  e  $T_1 = 30^\circ\text{C}$ . Ao longo da tubulação, a temperatura mantém-se constante.

Qual é a massa específica do gás numa seção (2), em que  $p_2 = 1,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \text{ (abs)}$ ?

# Tensão superficial e capilaridade

Prof. Gerônimo Virgínio Tagliaferro



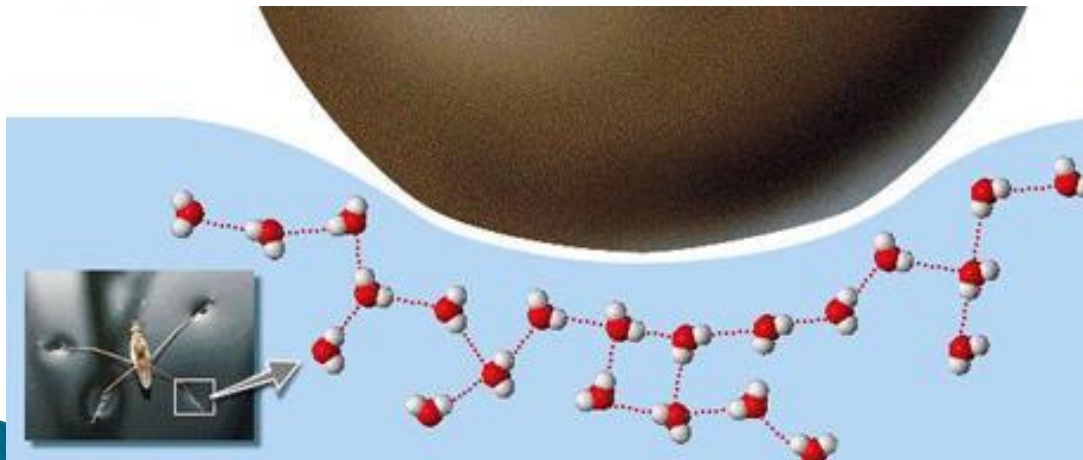
# Tensão Superficial

- ▶ Alguns pequenos objetos ou corpos tem a tendência de flutuar em fluídos.
- ▶ Como o clipe pode ficar em cima da água sem afundar?



# Tensão Superficial

- ▶ Na interface entre um líquido e um gás (ou entre dois líquidos imiscíveis):
- ▶ A existência de forças superficiais.
- ▶ Estas forças fazem com que a superfície do líquido se comporte como uma membrana esticada (membrana elástica) sobre a massa fluída. Na real a membrana não existe.
- ▶ Essa “membrana elástica” não deixa o objeto (corpo) adentrar-se, ou seja, afundar.



Água:

As moléculas formam pontes de hidrogênio em todas as direções da superfície. Mas as que estão na superfície só se ligam nas moléculas que estão abaixo.

# Tensão Superficial

- ▶ Forma uma força de atração dessas moléculas na superfície ao longo de qualquer linha.
- ▶ A intensidade de atração molecular por unidade de comprimento ao longo de qualquer linha na superfície é denominada tensão superficial.
- ▶ Designada por  $\sigma$  (sigma).
- ▶ A tensão superficial é uma propriedade do líquido.
- ▶ Depende da temperatura e do outro fluído que está em contato.
- ▶ A dimensão da tensão superficial:  $FL^{-1}$  no SI (N/m).

# Tensão Superficial

- ▶ Valores de  $\sigma$  para alguns líquidos em contato ao ar.

**Tab. 1.5** Propriedades Físicas Aproximadas de Alguns Líquidos <sup>a</sup>

|                          | Tempe-<br>ratura<br>(°C) | Massa<br>Específica<br>$\rho$<br>(kg / m <sup>3</sup> ) | Viscosidade<br>Dinâmica<br>$\mu$<br>(N · s / m <sup>2</sup> ) | Tensão<br>Superficial <sup>b</sup> ,<br>$\sigma$<br>(N / m) | Pressão de<br>Vapor,<br>$p_v$<br>[N / m <sup>2</sup> (abs)] | Compres-<br>sibilidade <sup>c</sup><br>$E_v$<br>(N / m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Tetracloreto de Carbono  | 20                       | 1590                                                    | 9,58 E-4                                                      | 2,69 E-2                                                    | 1,3 E+4                                                     | 1,31 E+9                                                              |
| Álcool Etílico           | 20                       | 789                                                     | 1,19 E-3                                                      | 2,28 E-2                                                    | 5,9 E+3                                                     | 1,06 E+9                                                              |
| Gasolina <sup>d</sup>    | 15,6                     | 680                                                     | 3,1 E-4                                                       | 2,2 E-2                                                     | 5,5 E+4                                                     | 1,3 E+9                                                               |
| Glicerina                | 20                       | 1260                                                    | 1,50 E+0                                                      | 6,33 E-2                                                    | 1,4 E-2                                                     | 4,52 E+9                                                              |
| Mercúrio                 | 20                       | 13600                                                   | 1,57 E-3                                                      | 4,66 E-1                                                    | 1,6 E-1                                                     | 2,85 E+10                                                             |
| Óleo SAE 30 <sup>d</sup> | 15,6                     | 912                                                     | 3,8 E-1                                                       | 3,6 E-2                                                     | —                                                           | 1,5 E+9                                                               |
| Água do mar              | 15,6                     | 1030                                                    | 1,20 E-3                                                      | 7,34 E-2                                                    | 1,77 E+3                                                    | 2,34 E+9                                                              |
| Água                     | 15,6                     | 999                                                     | 1,12 E-3                                                      | 7,34 E-2                                                    | 1,77 E+3                                                    | 2,15 E+9                                                              |

Fonte: Munson, 2004

# Tensão Superficial

- Valores de  $\sigma$  da água para várias temperaturas em relação ao ar.

## Propriedades Físicas da Água<sup>a</sup>

| Tempe-<br>ratura<br>(°C) | Massa<br>específica<br>$\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Peso<br>específico <sup>b</sup><br>$\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | Viscosidade<br>dinâmica<br>$\mu$<br>(N·s/m <sup>2</sup> ) | Viscosidade<br>cinemática<br>$\nu$<br>(m <sup>2</sup> /s) | Tensão<br>superficial <sup>c</sup><br>$\sigma$<br>(N/m) | Pressão de<br>vapor<br>$p_v$<br>[N/m <sup>2</sup> (abs)] | Velocidade<br>do som <sup>d</sup><br>$c$<br>(m/s) |
|--------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 0                        | 999,9                                                 | 9,806                                                               | 1,787 E - 3                                               | 1,787 E - 6                                               | 7,56 E - 2                                              | 6,105 E + 2                                              | 1403                                              |
| 5                        | 1000,0                                                | 9,807                                                               | 1,519 E - 3                                               | 1,519 E - 6                                               | 7,49 E - 2                                              | 8,722 E + 2                                              | 1427                                              |
| 10                       | 999,7                                                 | 9,804                                                               | 1,307 E - 3                                               | 1,307 E - 6                                               | 7,42 E - 2                                              | 1,228 E + 3                                              | 1447                                              |
| 20                       | 998,2                                                 | 9,789                                                               | 1,002 E - 3                                               | 1,004 E - 6                                               | 7,28 E - 2                                              | 2,338 E + 3                                              | 1481                                              |
| 30                       | 995,7                                                 | 9,765                                                               | 7,975 E - 4                                               | 8,009 E - 7                                               | 7,12 E - 2                                              | 4,243 E + 3                                              | 1507                                              |
| 40                       | 992,2                                                 | 9,731                                                               | 6,529 E - 4                                               | 6,580 E - 7                                               | 6,96 E - 2                                              | 7,376 E + 3                                              | 1526                                              |
| 50                       | 988,1                                                 | 9,690                                                               | 5,468 E - 4                                               | 5,534 E - 7                                               | 6,79 E - 2                                              | 1,233 E + 4                                              | 1541                                              |
| 60                       | 983,2                                                 | 9,642                                                               | 4,665 E - 4                                               | 4,745 E - 7                                               | 6,62 E - 2                                              | 1,992 E + 4                                              | 1552                                              |
| 70                       | 977,8                                                 | 9,589                                                               | 4,042 E - 4                                               | 4,134 E - 7                                               | 6,44 E - 2                                              | 3,116 E + 4                                              | 1555                                              |
| 80                       | 971,8                                                 | 9,530                                                               | 3,547 E - 4                                               | 3,650 E - 7                                               | 6,26 E - 2                                              | 4,734 E + 4                                              | 1555                                              |
| 90                       | 965,3                                                 | 9,467                                                               | 3,147 E - 4                                               | 3,260 E - 7                                               | 6,08 E - 2                                              | 7,010 E + 4                                              | 1550                                              |
| 100                      | 958,4                                                 | 9,399                                                               | 3,818 E - 4                                               | 2,940 E - 7                                               | 5,89 E - 2                                              | 1,013 E + 5                                              | 1543                                              |

Fonte: Munson, 2004

# Tensão Superficial

- ▶ Outro exemplo da utilização do conceito de tensão superficial.
- ▶ Gota esférica de água. Membrana Hipotética



# Tensão Superficial

- ▶ Uma gota de raio R.
- ▶ Pressão interna da gota é maior que a pressão externa.
- ▶  $p_i$  = Pressão interna da gota.
- ▶  $P_e$  = Pressão externa da gota.

$$P_1 > P_2 = \Delta P$$

- ▶ Esse excesso de pressão deve ser compensado de algum modo para que a gota não estoure. A compensação é fornecida pela tensão superficial na parede da gota.

força na borda      força da área

$$2\pi R\sigma = \Delta p \pi R^2$$

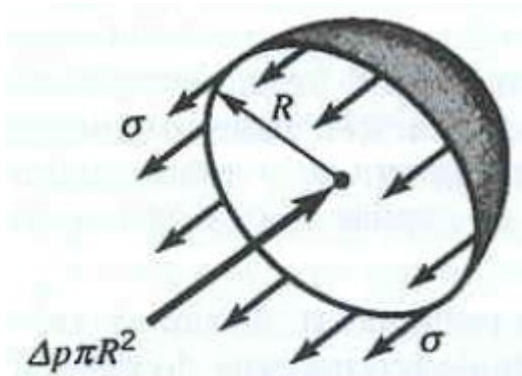
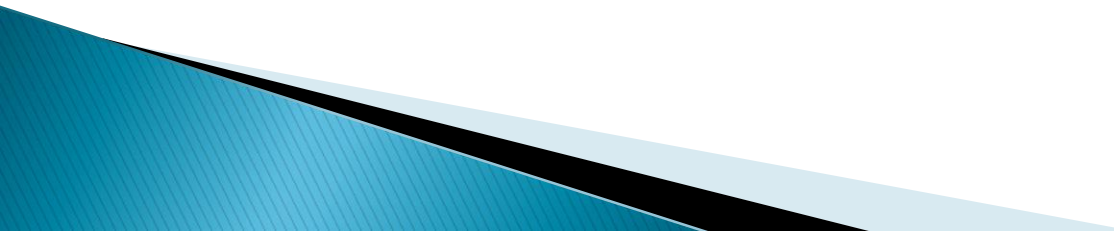


Diagrama de corpo livre da gota

$$\Delta p = p_i - p_e = \frac{2\sigma}{R}$$

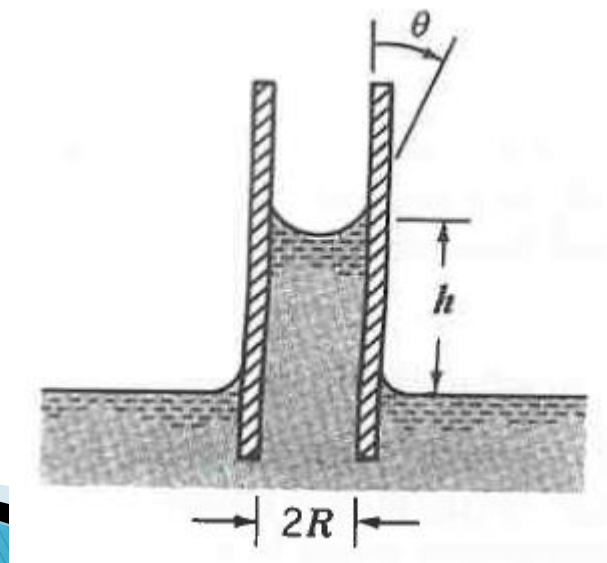
$\sigma$  = Tensão superficial (N/m)

# Tensão Superficial

- ▶ Tensão superficial:
  - ▶ Intensidade (Força) de atração molecular de um fluído por unidade de comprimento ao longo de qualquer linha na superfície.
  - ▶ Essa intensidade depende da temperatura e do outro fluído que está em contato na superfície (interface).
  - ▶ A dimensão  $\sigma$  é dado por N/m.
- 

# Capilaridade

- ▶ Um outro fenômeno associado com a tensão superficial é a subida ou queda de um líquido num tubo capilar. Efeito da ação capilar.
- ▶ Inserir um tubo pequeno e aberto na água. O nível da água no tubo subirá acima do nível do reservatório.



**Adesão:** Entre as moléculas da parede do tubo e as do fluído.

**Coesão:** Atração mútua das Moléculas do fluído.

O fluído “sobe” no capilar e o líquido molha a superfície sólida.

# Capilaridade

- ▶ A altura da coluna de líquido  $h$  é função:
- ▶ Dos valores da tensão superficial  $\sigma$  (sigma).
- ▶ Do raio do tubo  $R$ .
- ▶ Do peso específico do líquido  $\gamma$  (gama) ( $\text{kN}/\text{m}^3$ ).
- ▶ Do ângulo de contato entre o fluido e o material do tubo  $\theta$ .

A força vertical provocada é:

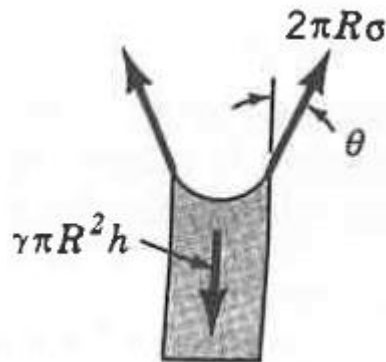
$$2\pi R\sigma \cos \theta$$

E o peso da coluna de líquido é:

$$\gamma\pi R^2 h$$

Essas forças precisam ser equilibradas:

$$2\pi R\sigma \cos \theta = \gamma\pi R^2 h$$



# Capilaridade

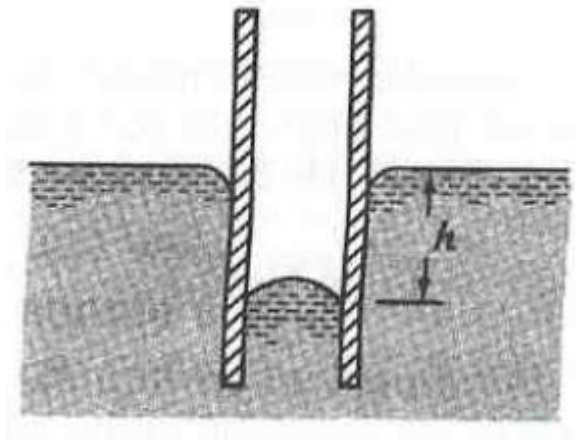
Assim, a altura da coluna de líquido é dada pela relação:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\gamma R}$$

- ▶ A altura da coluna de líquido é inversamente proporcional ao raio do tubo.
- ▶ Quanto menor for o diâmetro do tubo, maior a ascensão do líquido pela ação da força capilar.
- ▶ O ângulo de contato é função da combinação líquido-material da superfície.
- ▶ Geralmente  $\theta \approx 0^\circ$  para água em contato com o vidro limpo.

# Capilaridade

- ▶ Se a **adesão** da molécula na superfície sólida for menor se comparada com a **coesão** entre as moléculas do líquido.
- ▶ O líquido não molhará (molhará menos) a superfície do tubo.
- ▶ O nível do líquido no tubo imerso será mais baixo que o nível do reservatório.



Depressão da coluna para um líquido que não molha a parede do tubo

Exemplo:

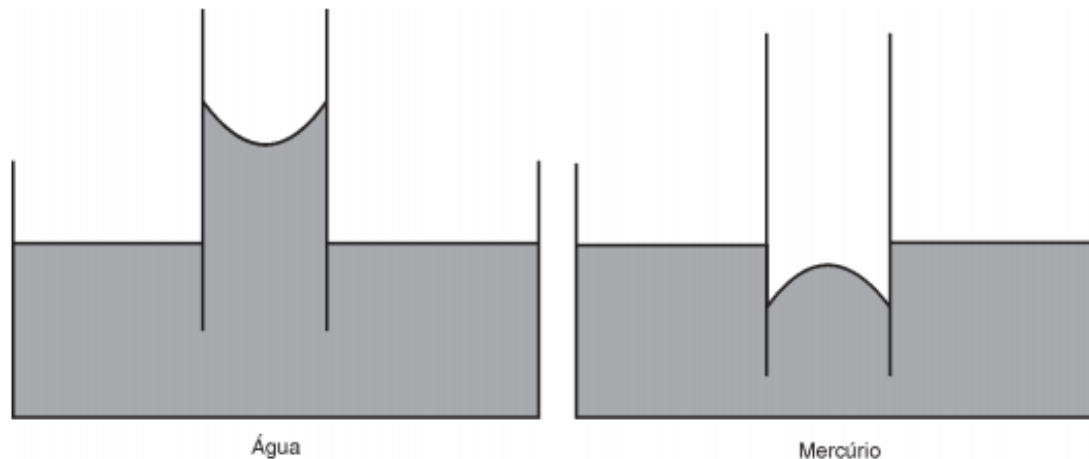
– Mercúrio

$$\theta \approx 130^\circ$$

$$\theta > 90^\circ$$

# Tensão superficial e Capilaridade

- ▶ O efeito mais importante da tensão superficial para a engenharia é a criação do **menisco** curvo nos tubos de leitura de manômetros e barômetros.
- ▶ Na química: o **menisco** da proveta, pipeta e bureta.
- ▶ As leituras devem ser feitas no meio do menisco. Nesse local está afastado os efeitos máximos da tensão superficial.



**Ascensão capilar  $\theta < 90^\circ$**

**Depressão capilar  $\theta > 90^\circ$**

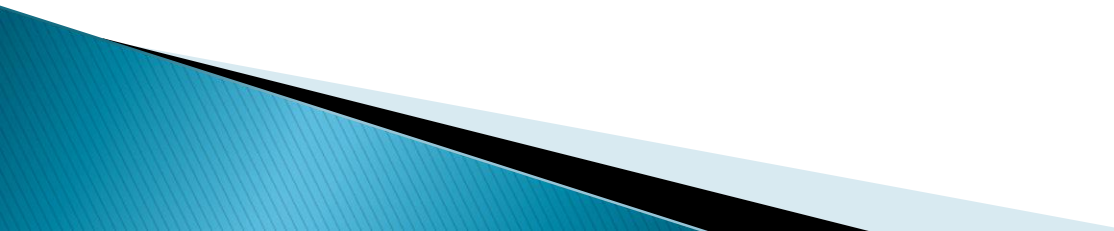
Ascensão e depressão capilar dentro e fora de um tubo circular

# Tensão superficial e Capilaridade

- ▶ Exercício:

- ▶ 1 – Qual é o diâmetro de um tubo limpo de vidro necessário para que o movimento de água promovido pela ação capilar seja menor do que 1,5 mm de altura? Admita que a temperatura seja uniforme e igual a 20 °C.

# Tensão superficial e Capilaridade

- ▶ Experimento para mostrar a tensão superficial da água.
  - ▶ Membrana hipotética.
  - ▶ Uma vasilha com água;
  - ▶ Objetos: cliques, etc..
  - ▶ Detergente.
  - ▶ Coloque os cliques cuidadosamente na vasilha contendo água.
  - ▶ Os cliques não vão afundar (flutuar) na água.
  - ▶ Vamos adicionar alguma gotas de detergente!!!
  - ▶ Os objetos afundam rapidamente devido ao efeito do surfactante que age nas moléculas da água quebrando a interação entre elas e conseqüentemente, quebrando a tensão superficial.
- 

## Tensão Superficial e capilaridade

- ▶ A tensão superficial é importante em muitos problemas da mecânica dos fluídos:
  - ▶ Escoamento de líquidos através do solo (e de outros meio porosos);
  - ▶ Escoamento de líquidos em filmes finos;
  - ▶ Na formação de gotas e na quebra dos jatos de líquido.
  - ▶ Em outros casos a tensão superficial não são significativos:
  - ▶ Inércia, forças viscosas e as forças gravitacionais.
- 