

Conceitos fundamentais em Mecânica dos Fluidos

PME3238

Fenômenos de Transporte

Aula 01

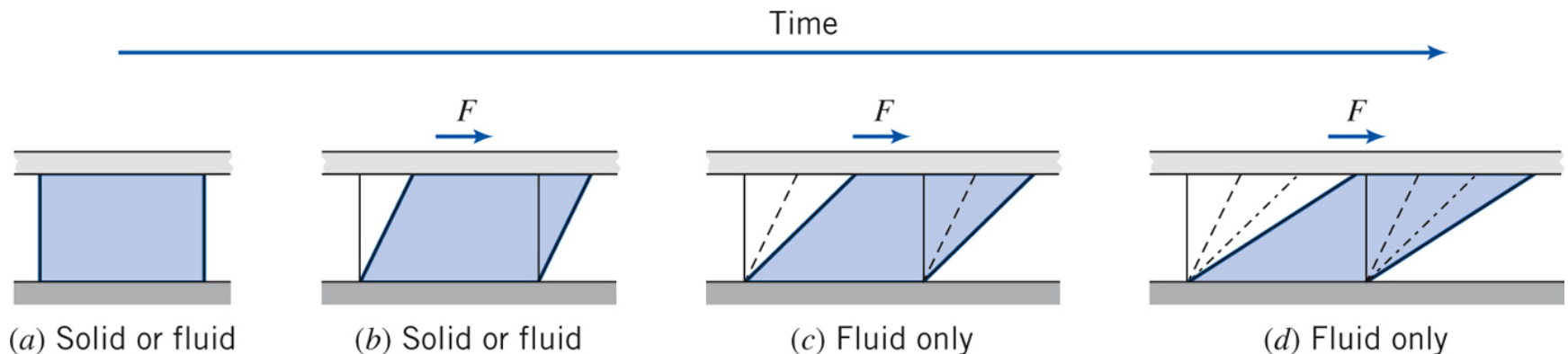
Prof. Dr. Bruno Souza Carmo

Mecânica dos fluidos

- **Mecânica:** ramo da física que lida com movimento, energia e forças
- A **Mecânica dos Fluidos** trata do comportamento dos fluidos em repouso (estática) e em movimento (dinâmica)
- **Aplicações:** transporte, propulsão, forças fluidas em estruturas, máquinas de fluxo, lubrificação, engenharia biomédica, esportes, geração de energia, refrigeração, aquecimento, dispersão de poluentes, etc.

Definição de fluido

Um fluido é uma substância que se deforma continuamente sob a aplicação de uma tensão de cisalhamento (tangencial) de qualquer valor



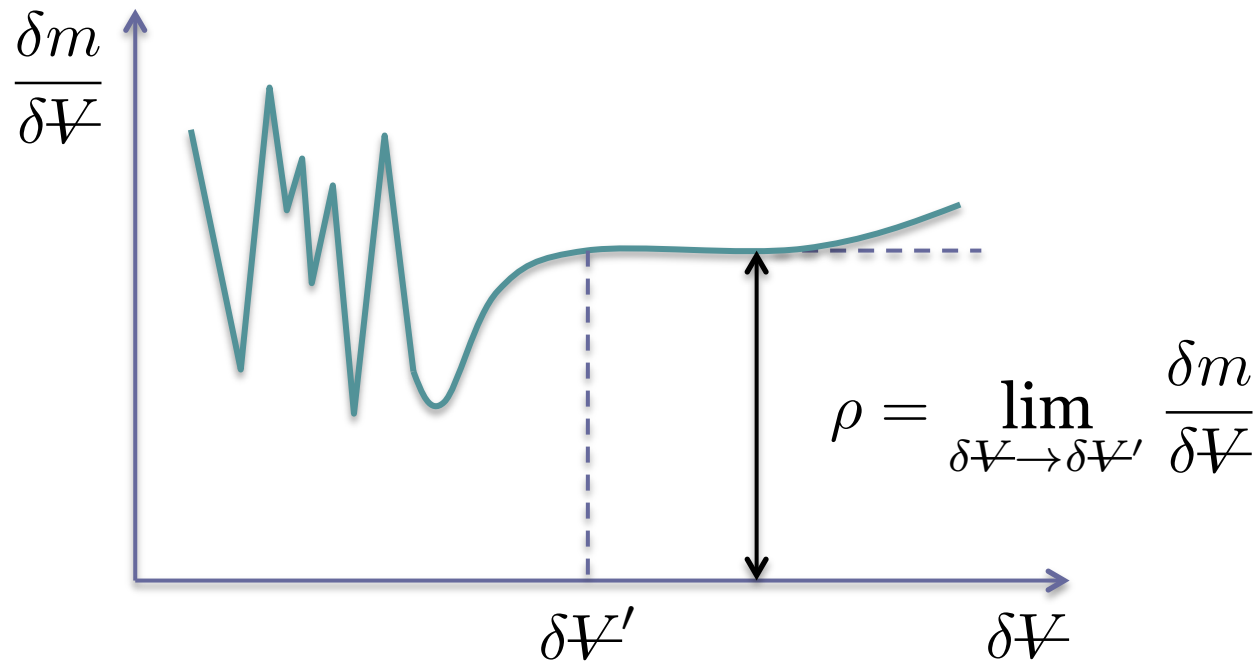
Compreendem as fases líquida e gasosa da matéria

O fluido como meio contínuo I

- Na Mecânica dos Fluidos clássica, o fluido é considerado um meio contínuo, isto é, as dimensões características do sistema são muito maiores do que o livre caminho médio das moléculas ($\approx 10^{-9}$ m para gases e $\approx 10^{-10}$ m para líquidos).
- Sendo assim, assumimos que as propriedades dos fluidos variam continuamente no espaço, permitindo o uso do Cálculo Diferencial na sua análise.

O fluido como meio contínuo II

Ex: massa específica ρ
(massa por unidade de volume)



Massa específica

- A massa específica depende da temperatura.
- Para **gases**, também depende da pressão e pode ser calculada, na maioria das situações, pela *equação de estado dos gases ideais*

$$p = \rho RT$$

- A massa específica pode, a princípio, variar no espaço e no tempo. Portanto sua representação completa é como um *campo escalar*:

$$\rho = \rho(x, y, z, t)$$

Densidade e peso específico

- A **densidade relativa**, ou apenas **densidade**, SG , é a razão entre a massa específica do fluido e a massa específica da água a 4 °C (1000 kg/m³):

$$SG = \rho / \rho_{\text{água}}$$

- O **peso específico**, γ , é o peso da substância por unidade de volume:

$$\gamma = mg / V = \rho g$$

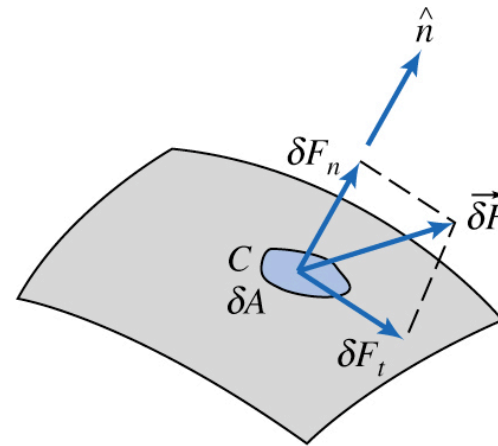
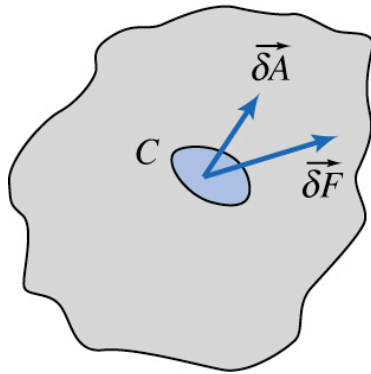
Forças e campo de tensão

- Tipos de força
 - Forças de superfície (pressão, atrito)
 - Forças de campo ou corpo (gravidade, magnética)
- Tensões são geradas por forças de superfície atuando sobre uma partícula fluida

$$\text{Tensão} = \text{Força} / \text{Área}$$

- As tensões num fluido são majoritariamente geradas por movimento (num sólido são geradas por deflexão).

Tipos de tensão



Tensão normal:

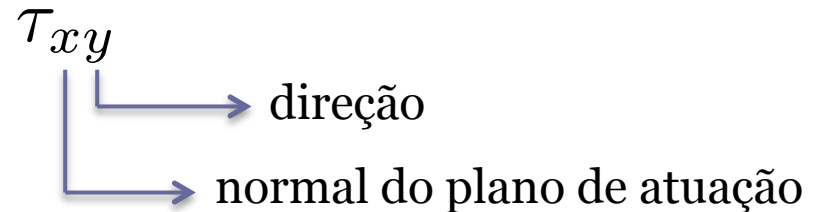
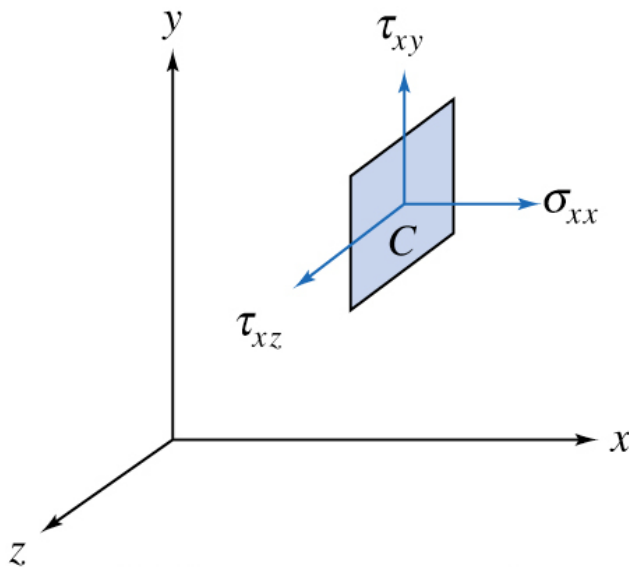
$$\sigma_n = \lim_{\delta A_n \rightarrow 0} \frac{\delta F_n}{\delta A_n}$$

Tensão de cisalhamento:

$$\tau_n = \lim_{\delta A_n \rightarrow 0} \frac{\delta F_t}{\delta A_n}$$

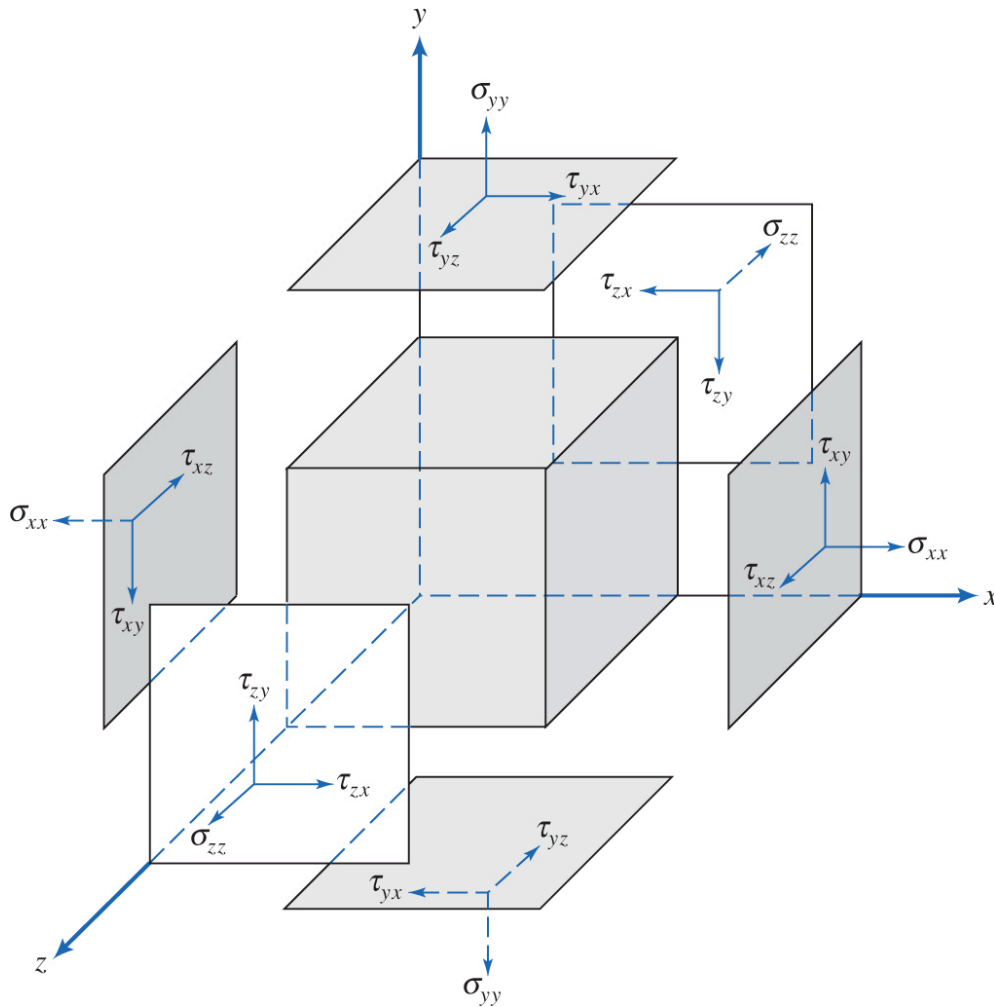
Campo de tensões I

Um elemento de volume fluido está submetido a um campo de tensões que pode ser baseado num sistema de coordenadas arbitrário



O sinal da tensão é o produto dos sinais da direção da tensão e da normal da superfície onde ela atua

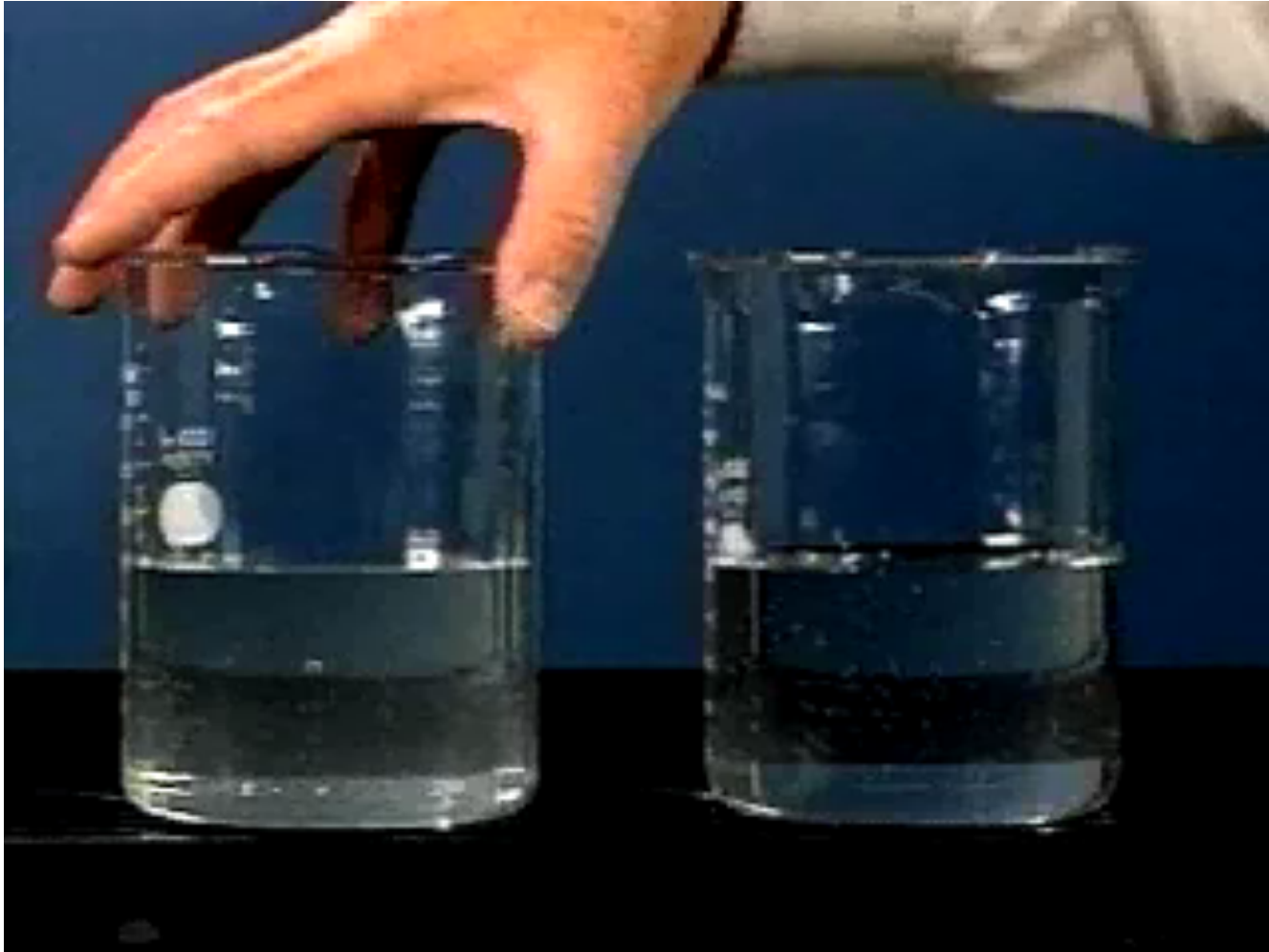
Campo de tensões II



O campo de tensões é uma grandeza tensorial

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

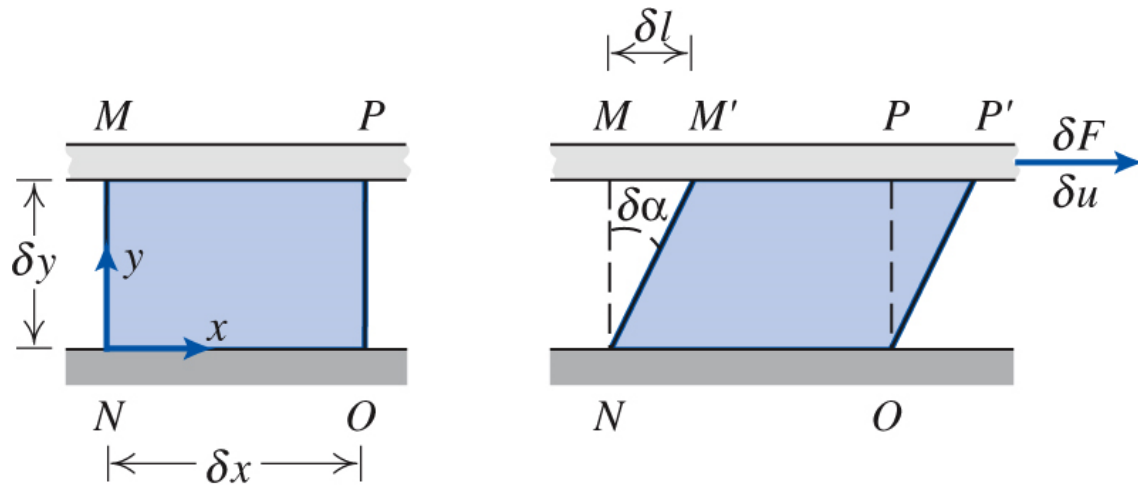
Viscosidade - Vídeo



Viscosidade

- Num fluido, as tensões de cisalhamento aparecem devido ao escoamento viscoso e estão relacionadas à taxa de deformação.
- A **viscosidade** é uma propriedade do fluido que fornece esta relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação.
- Para um fluido em repouso, não existirá tensão de cisalhamento.

Taxa de deformação I



Num intervalo δt , o elemento fluido é deformado de $MNOP$ para $M'NOP'$. A taxa de deformação é dada por:

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta \alpha}{\delta t} = \frac{d\alpha}{dt}$$

Taxa de deformação II

Vamos expressá-la com grandezas mais fáceis de medir. Relacionamos o comprimento δl com a velocidade δu : $\delta l = \delta u \delta t$

Igualando as expressões de δl , sendo y a direção **normal** à velocidade δu :

$$\delta u \delta t = \delta y \delta \alpha \quad \Rightarrow \quad \frac{\delta \alpha}{\delta t} = \frac{\delta u}{\delta y}$$

Tomando o limite:

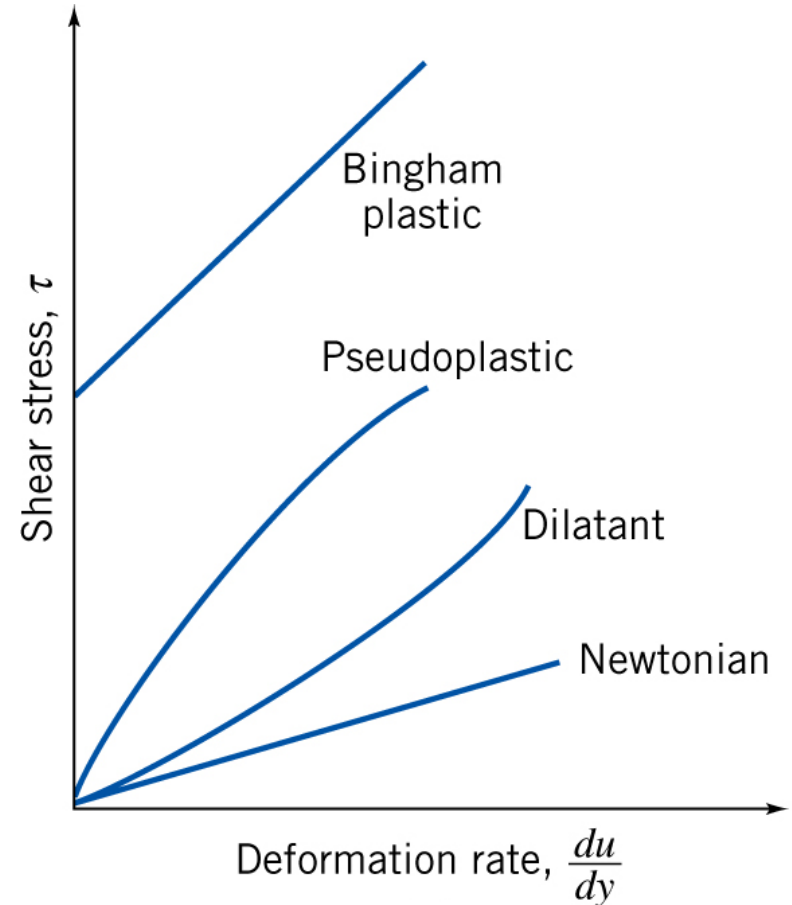
$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{du}{dy}$$

Fluidos newtonianos

São fluidos nos quais a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de deformação:

$$\tau_{xy} \propto \frac{du}{dy}$$

Exemplos: ar, água, boa parte dos óleos.



Viscosidade dinâmica

A constante de proporcionalidade da equação anterior é a **viscosidade dinâmica**, μ , que é uma propriedade do fluido.

$$\tau_{xy} = \mu \frac{du}{dy}$$

Esta equação é a Lei de Newton da viscosidade.

Dimensão de μ :

$$\left[\frac{Ft}{L^2} \right] = \left[\frac{M}{Lt} \right]$$

Unidades:

$$\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \text{ ou } \text{Pa} \cdot \text{s}$$

Mais sobre a viscosidade...

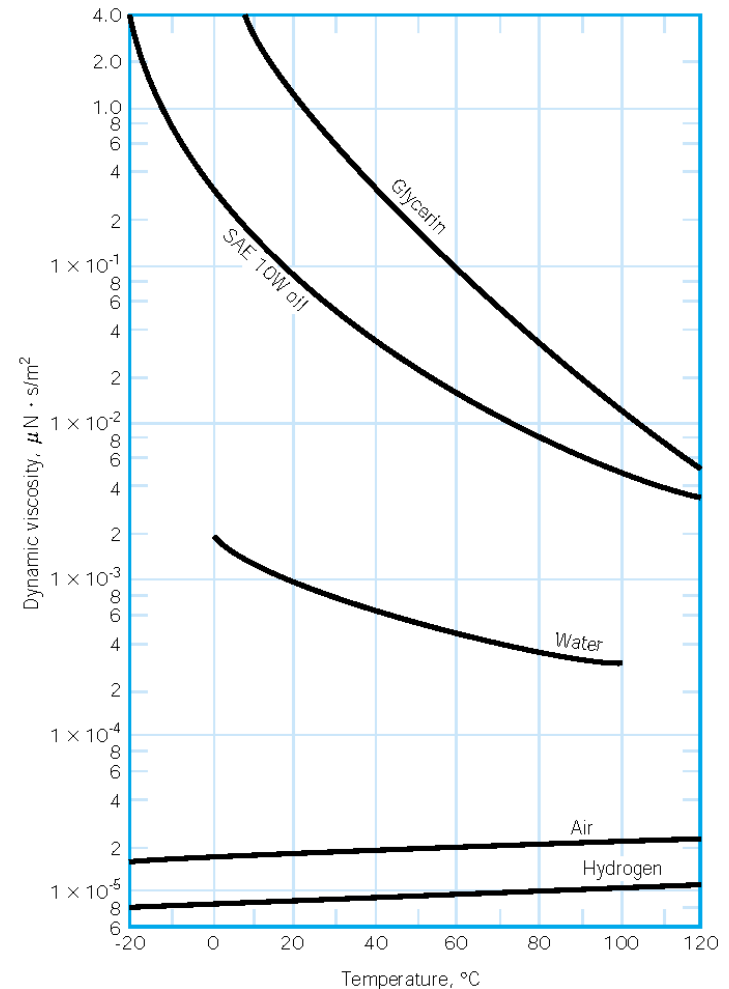
A viscosidade depende fortemente da temperatura.

Gases: $\uparrow T, \uparrow \mu$

Líquidos: $\uparrow T, \downarrow \mu$

A **viscosidade cinemática**, ν , é a razão entre μ e ρ :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \left[\frac{L^2}{t} \right]$$



Fluidos não newtonianos - vídeo



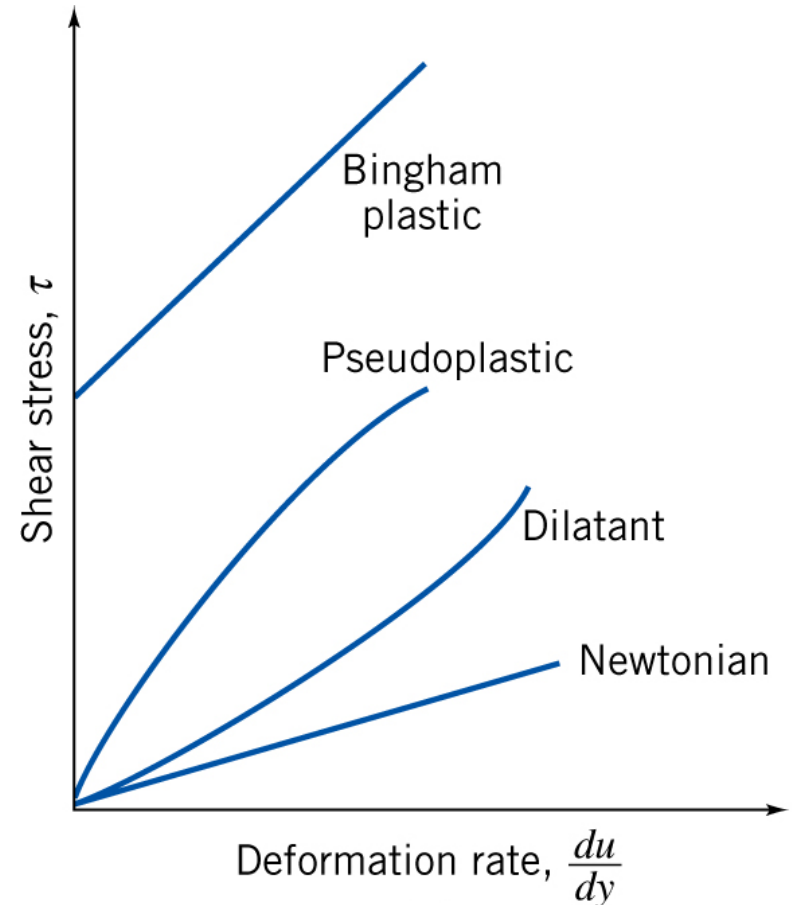
Fluidos não newtonianos

A relação entre τ_{xy} e du/dy pode ser representada por um modelo exponencial para pseudoplásticos ($n < 1$) e dilatantes ($n > 1$):

$$\tau_{xy} = k \left(\frac{du}{dy} \right)^n$$

Plásticos de Bingham comportam-se como sólido até uma tensão limítrofe.

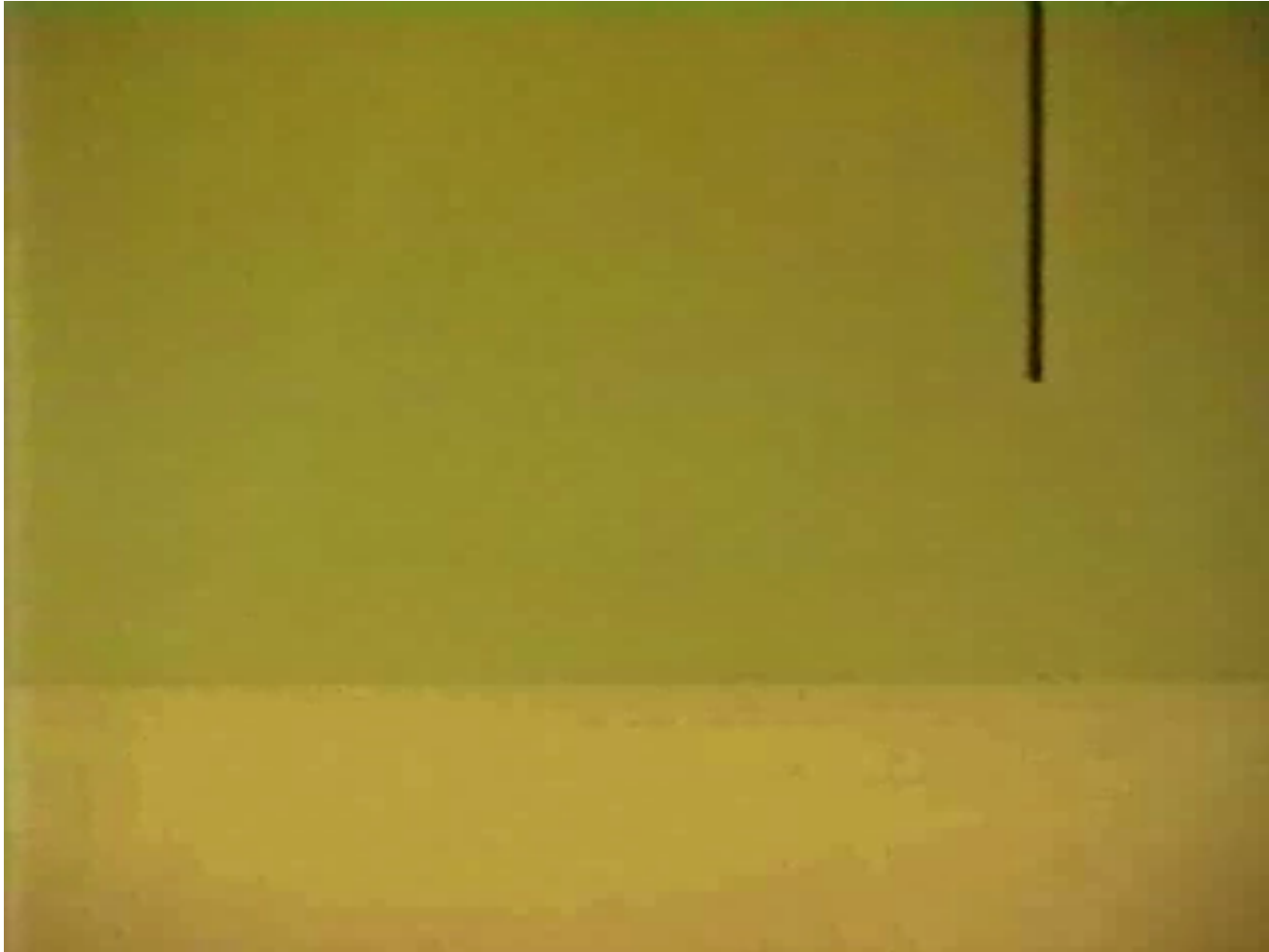
$$\tau_{xy} = \tau_l + \mu_p \frac{du}{dy}$$



Condição de não escorregamento

- **Na fronteira com um sólido, a velocidade relativa ao sólido é nula.**
- Essa é uma característica de todos os escoamentos viscosos.
- Ela se deve a interações moleculares e equilíbrio de quantidade de movimento.
- Também conhecida como princípio da aderência completa.

Não escorregamento - vídeo



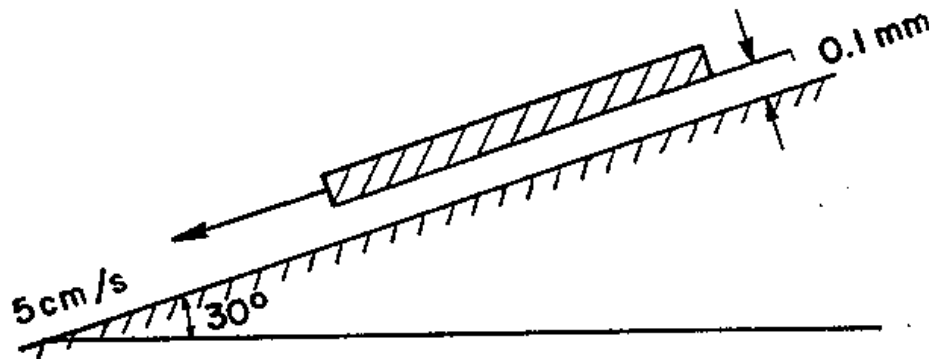
Hipótese de perfil linear de velocidades

Podemos admitir que o perfil de velocidades é linear quando as seguintes condições forem simultaneamente satisfeitas:

- O fluido for viscoso;
- O escoamento for laminar;
- O escoamento acontecer entre superfícies planas ou cilíndricas paralelas e próximas entre si;
- Não houver gradiente de pressão na direção do escoamento.

Exercício 1

Uma placa de vidro quadrada de 0,6 m de lado desliza sobre um plano inclinado também de vidro. Sabendo-se que a placa pesa 30 N e que adquire uma velocidade constante de 5 cm/s quando o plano tem inclinação de 30° em relação à horizontal, determinar a viscosidade dinâmica da película lubrificante de 0,1 mm, que está entre as duas placas.

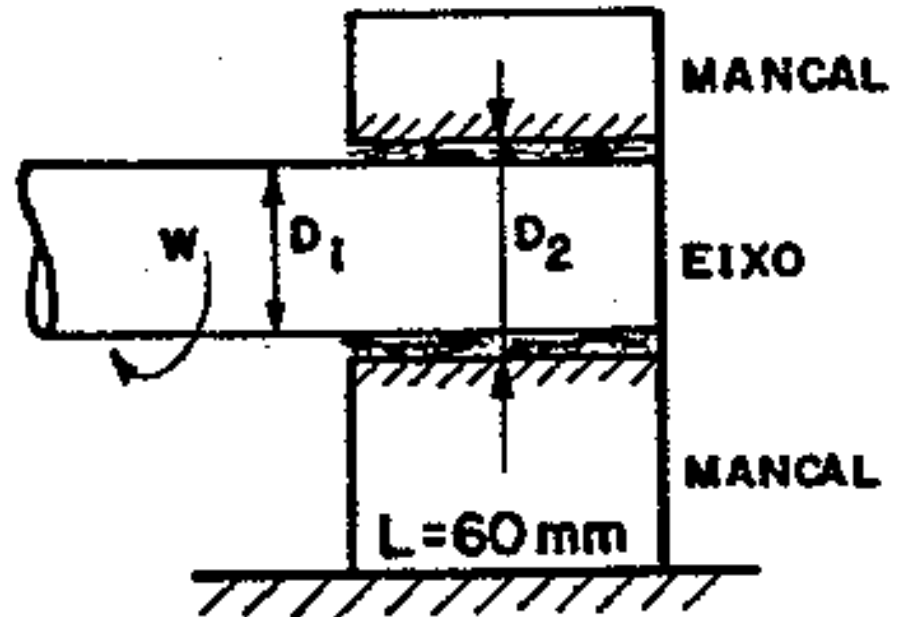


Exercício 2

Um eixo de 30 mm de diâmetro gira em um mancal de 30,1 mm de diâmetro interno e 60 mm de comprimento com a frequência de 5000 rpm. A essa frequência pode-se supor que a excentricidade seja nula.

O lubrificante utilizado é o óleo SAE-30 a 60 °C ($\mu = 0,04 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$).

Qual é a potência absorvida pelo mecanismo?

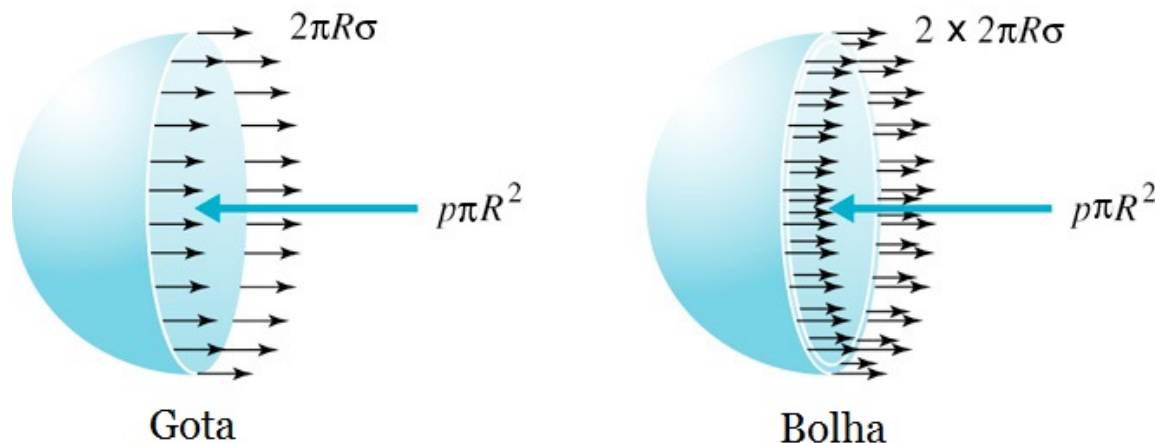


Tensão superficial - vídeo 1



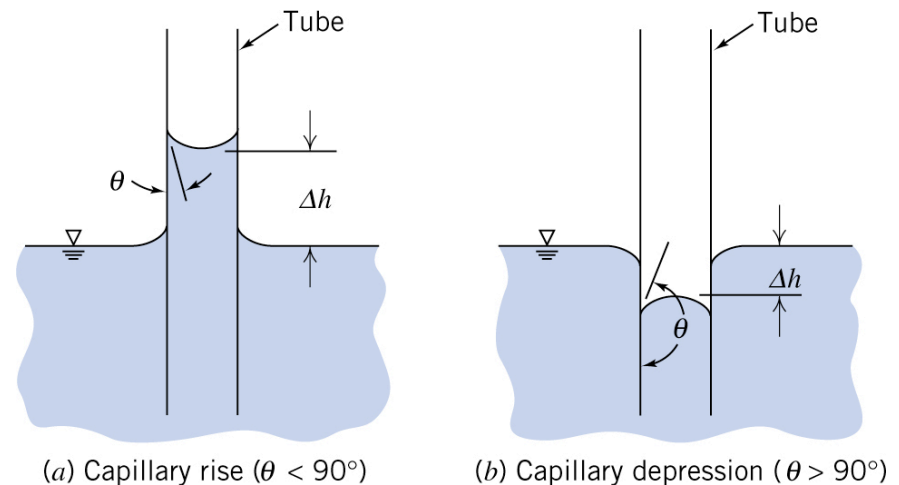
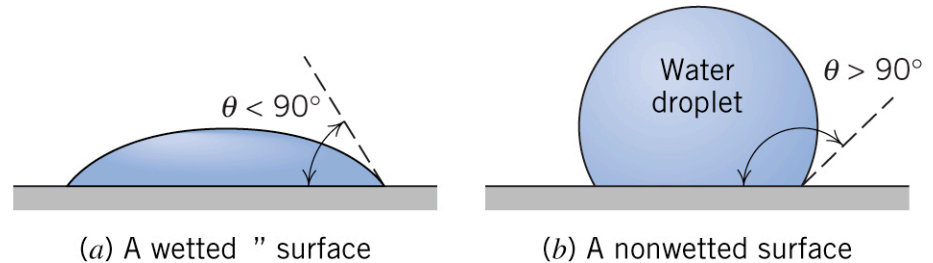
Tensão superficial

- É uma propriedade que resulta de forças atrativas entre as moléculas.
- Quando um líquido está em contato com outro fluido imiscível, uma interface se desenvolve agindo como uma membrana elástica esticada.



Características da tensão superficial

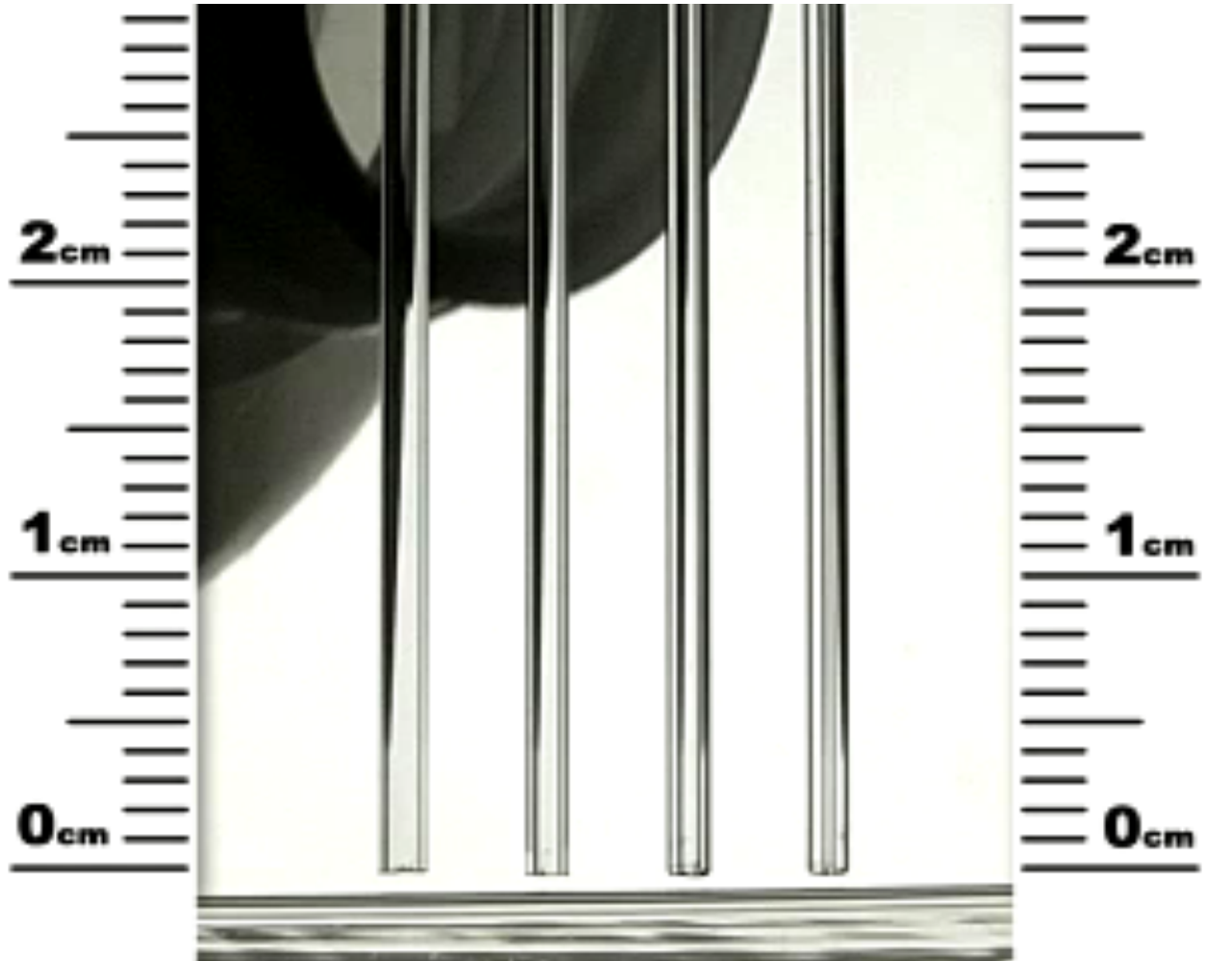
- Duas características: ângulo de contato θ e o módulo da tensão superficial σ [F/L]
- Dependem do próprio líquido e das substância com as quais faz a interface.



Tensão superficial - vídeo 2

© 2004 Gas Dynamics Laboratory
The Pennsylvania State University
with a grant from the National Science Foundation

Subida de fluido em tubo capilar



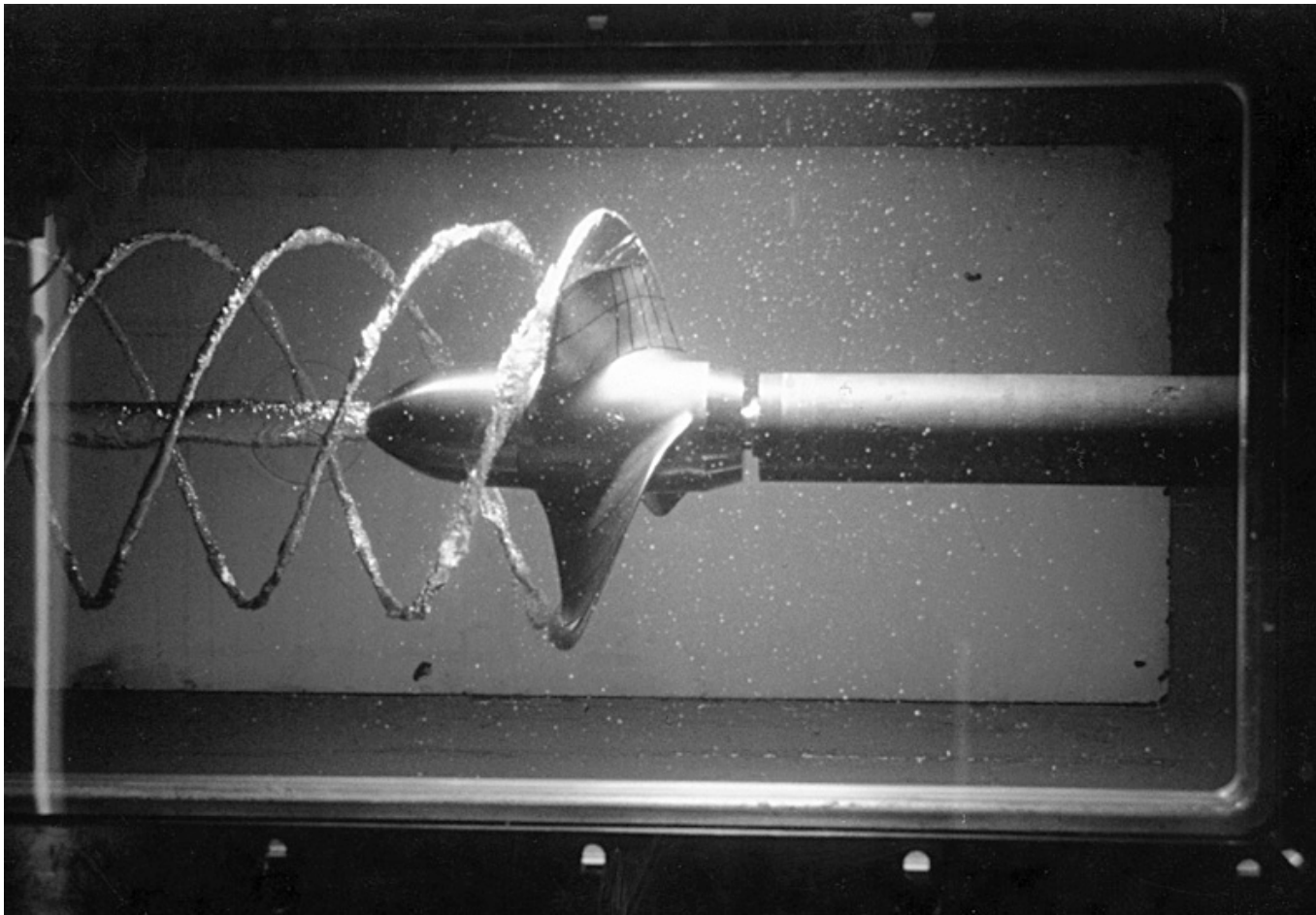
Pressão de vapor

- É a pressão resultante das moléculas na fase gasosa quando há um equilíbrio entre o transporte de moléculas da fase líquida para a gasosa e vice-versa.
- Difere de um líquido para outro e é altamente dependente da pressão e da temperatura.
- A ebulição acontece quando a pressão de vapor é igual à pressão ambiente.

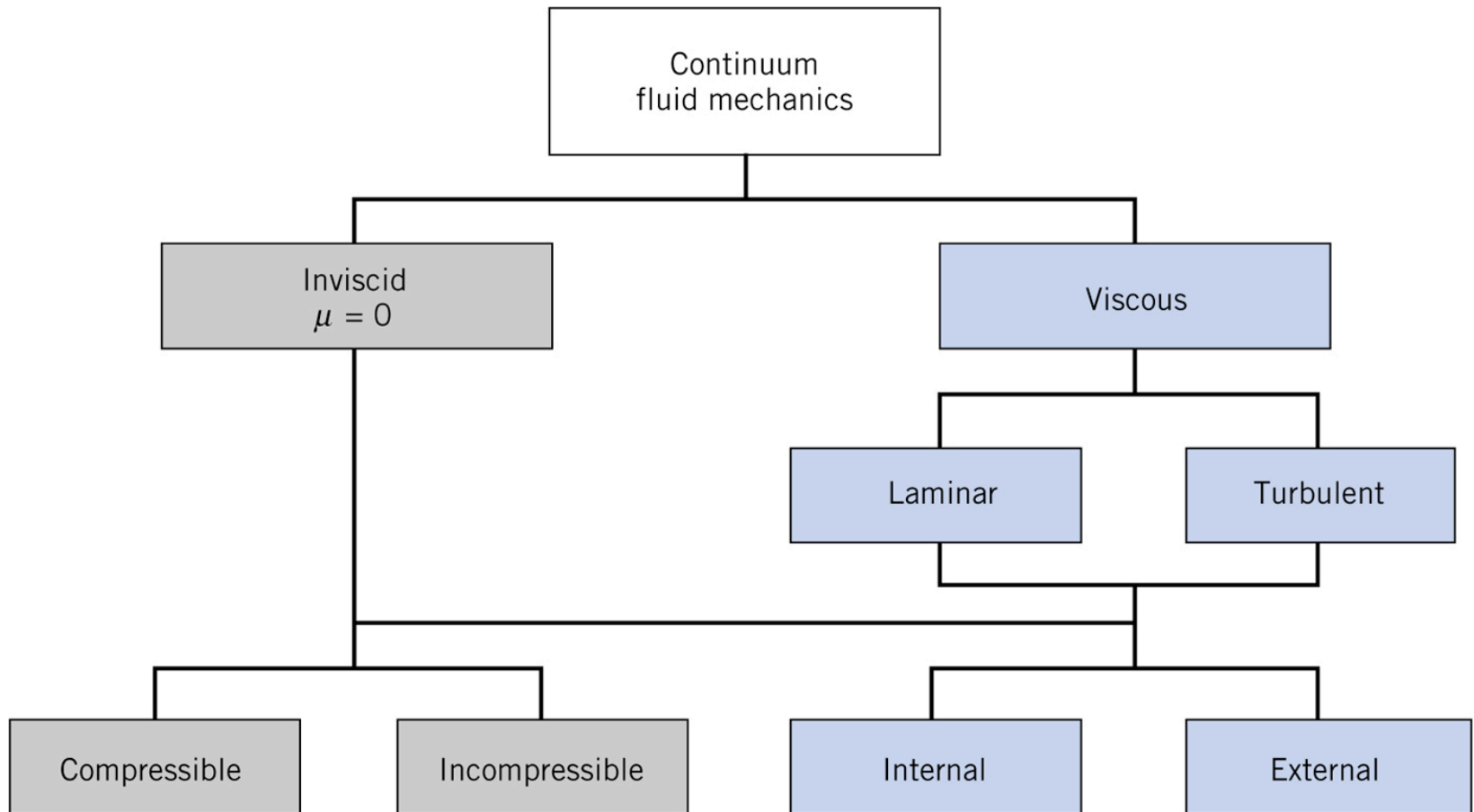
Cavitação

- Pode ocorrer em escoamentos de líquidos onde a pressão local atinge valores menores que a pressão de vapor.
- Formam-se bolhas que podem ser transportadas para regiões de pressão mais elevadas, colapsando e criando picos de pressão locais.
- Estes picos podem danificar as paredes sólidas de hélices ou válvulas.

Cavitação em hélice



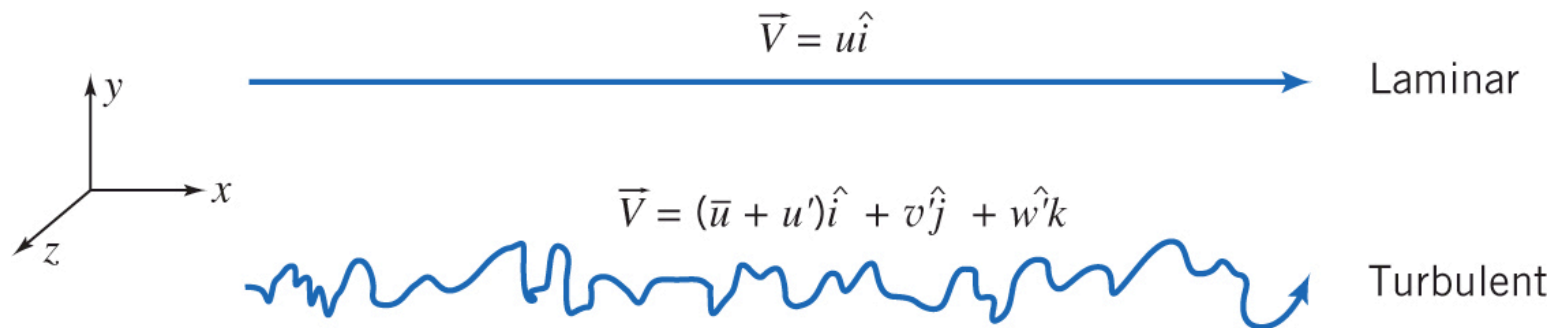
Classificação de escoamentos



Escoamento viscoso vs não viscoso

- Escoamentos não viscosos são chamados de *ideais*.
- Condição de não escorregamento não se aplica a escoamentos não viscosos.
- A única força de superfície em escoamentos não viscosos são forças de pressão (normais).
- Não ocorrem perdas em escoamentos não viscosos.

Escoamento laminar vs turbulento



Escoamento compressível vs incompressível

- Escoamentos incompressíveis são aqueles nos quais as variações de massa específica são desprezíveis.
- Escoamentos de líquidos, no geral, podem ser tratados como incompressíveis.
- Módulo de compressibilidade:

$$E_v \equiv \frac{dp}{(d\rho/\rho)}$$

Velocidade do som

- Perturbações de pressão se propagam no meio fluido com a velocidade do som, c .
- Para gases ideais, $c = (kRT)^{1/2}$, onde k é a razão entre os calores específicos a pressão constante e a volume constante.
- Definição do número de Mach, Ma : $Ma = V / c$.
- O escoamento de um gás com $Ma < 0,3$ pode ser considerado incompressível (ρ varia menos que 5%).

Escoamento interno vs externo

- Escoamentos internos são aqueles confinados por fronteiras sólidas. Ex: escoamento no interior de um tubo.
- Escoamentos externos são aqueles que acontecem ao redor de um corpo imerso na corrente fluida. Ex: escoamento ao redor de um avião.