

Mecânica dos Fluidos: Noções, Laboratório e Aplicações (PME 3332)

Docente: Jorge Luis Baliño, PME, jlbalino@usp.br

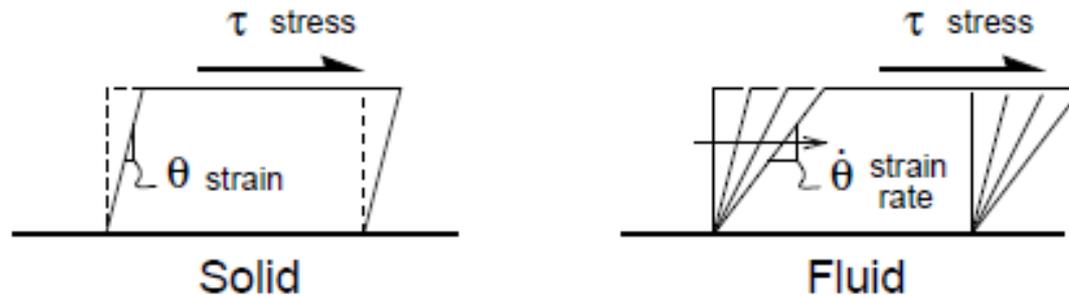
Tel. 3091 5640 / 5646

Bibliografia:

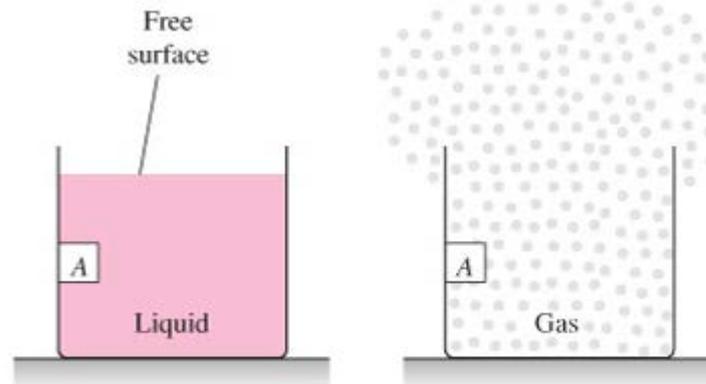
- White, F. M., “Mecânica dos Fluidos”, 6ª edição, Bookman Mc Graw-Hill, 2011.
- Çengel, Y. A. & Cimbala, J. M., “Mecânica dos Fluidos. Fundamentos e Aplicações”, Bookman Mc Graw-Hill.
- Potter, M. C. & Wiggert, D. C., “Mecânica dos Fluidos”, 3ª edição, Editora Thomson Pioneira, São Paulo, 2004.
- Fox, R. W., Pritchard, P. J. & McDonald, A. T., “Introdução à Mecânica dos Fluidos”, 7ª edição em inglês, Grupo Editorial Nacional, Rio de Janeiro, 2010.
- Munson, B. R., Young, D. F. & Okiishi, T. H., “Fundamentos da Mecânica dos Fluidos”, 4ª edição, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 2004.
- Bistafa, S. R., “Mecânica dos Fluidos – Noções e Aplicações”. Blucher, São Paulo, 2010.
- Brunetti, F., “Mecânica dos Fluidos”, 2ª edição, Pearson – Prentice Hall, São Paulo, 2008.
- Instruções de Laboratório de Mecânica dos Fluidos: disponíveis no Moodle da disciplina.

Conceito de fluido

- Toda a materia encontra-se em dois estados: sólido e fluido.
- Diferença: sólido reage a uma estado de tensão tangencial com uma deformação estática, enquanto o fluido reage com uma deformação continua (taxa de deformação).



- Fluidos podem ser líquidos (mantém superfície) ou gases (expandem continuamente).

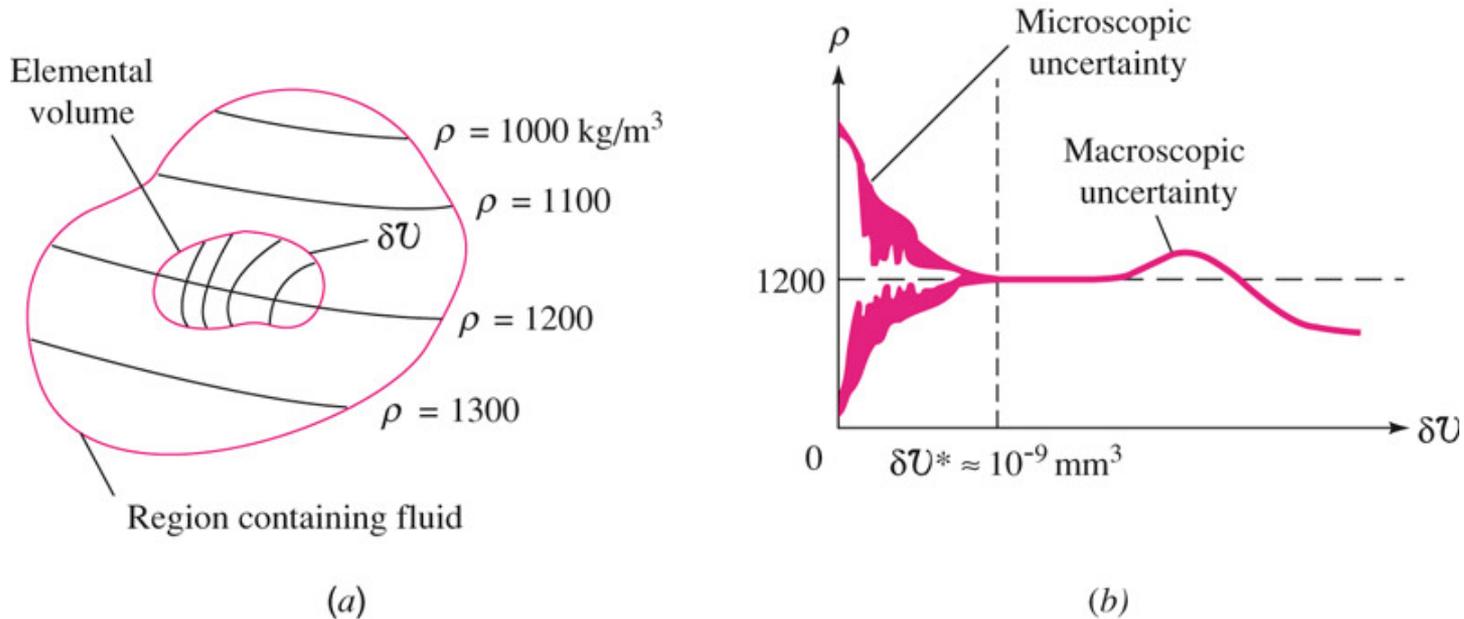


Leis de conservação e relações constitutivas

- Leis de conservação, são válidas sempre:
 - Conservação da massa;
 - Conservação do momento linear (quantidade de movimento);
 - Conservação do momento angular (momento da quantidade de movimento);
 - Conservação da energia;
 - Segundo Princípio da Termodinâmica.
- Relações constitutivas, tem validade restrita e representam relações funcionais entre entes matemáticos. São necessárias para fechar a formulação matemática de um problema.
 - Exemplo do Eletromagnetismo:
 $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$; $\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi \mathbf{E}$; $\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E} = \epsilon \mathbf{E}$; $\epsilon_r = 1 + \chi$
onde \mathbf{D} , \mathbf{E} e \mathbf{P} são respectivamente os vectores deslocamento elétrico, campo elétrico e polarização, ϵ_0 é a permissividade do vácuo, χ é a susceptibilidade elétrica do material, ϵ_r é a permissividade relativa e ϵ é a permissividade do material. A relação constitutiva é válida somente para um dielétrico linear, homogêneo e isotrópico.
 - Outros exemplos:
 $\mathbf{q} = -\kappa \nabla T$ (“lei” de Fourier)
 $\mathbf{j} = -D \nabla C$ (“lei” de Fick)

Massa específica e hipótese do contínuo

Todas as variáveis intensivas variam continuamente.



$$\rho = \lim_{\delta v \rightarrow \delta v^*} \frac{\delta m}{\delta v}$$

O volume crítico depende do caminho livre médio das partículas λ . Número de Knudsen: $Kn = \frac{\lambda}{L}$; deve ser $Kn \ll 1$, caso contrário teoria molecular.

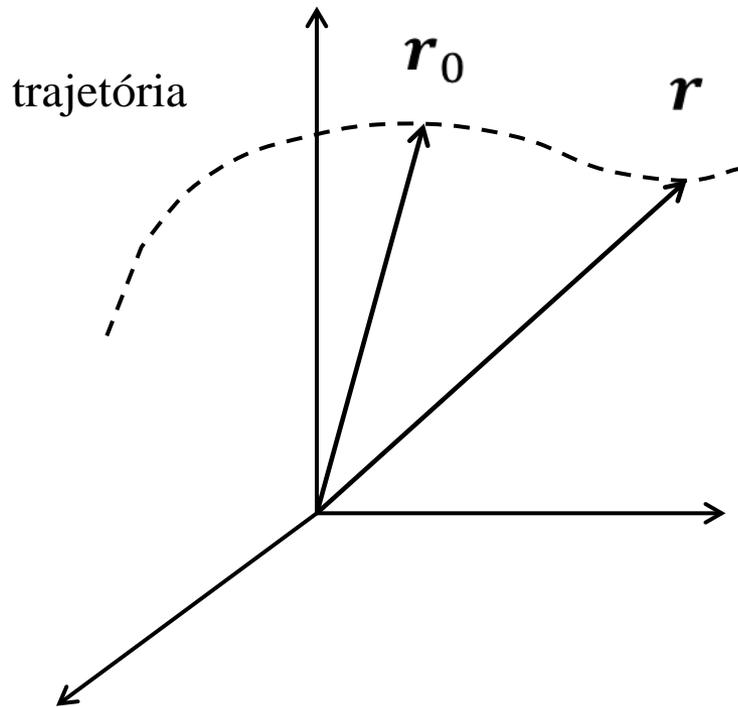
Propriedade termodinâmica (tabelada): $\rho = \rho(p, T)$.

Massa específica está relacionada com as propriedades inerciais do fluido.

Descrição Lagrangeana

Descrição Lagrangeana: acompanhando às partículas ou sistema de partículas. As leis de conservação estão naturalmente enunciadas em uma descrição lagrangeana.

Função incógnita: $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t, \mathbf{r}_0)$, onde \mathbf{r} é a posição no tempo t da partícula que esteve em \mathbf{r}_0 no tempo de referência t_0 (usualmente $t_0 = 0$, condição inicial).



$$\mathbf{V}(t, \mathbf{r}_0) = \left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t} \right)_{\mathbf{r}_0} \text{ (velocidade)}$$

$$\mathbf{a}(t, \mathbf{r}_0) = \left(\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} \right)_{\mathbf{r}_0} = \left(\frac{\partial^2 \mathbf{r}}{\partial t^2} \right)_{\mathbf{r}_0} \text{ (aceleração)}$$

Para qualquer variável intensiva χ ,
 $\chi = \chi(t, \mathbf{r}_0)$.

Para uma partícula de identidade fixa, a posição e o tempo não são variáveis independentes.

Descrição Euleriana

Descrição Euleriana: em termos de campo. Não estamos interessados no que acontece com uma partícula (pois existem muitas delas) senão com o que acontece em uma determinada região do escoamento.

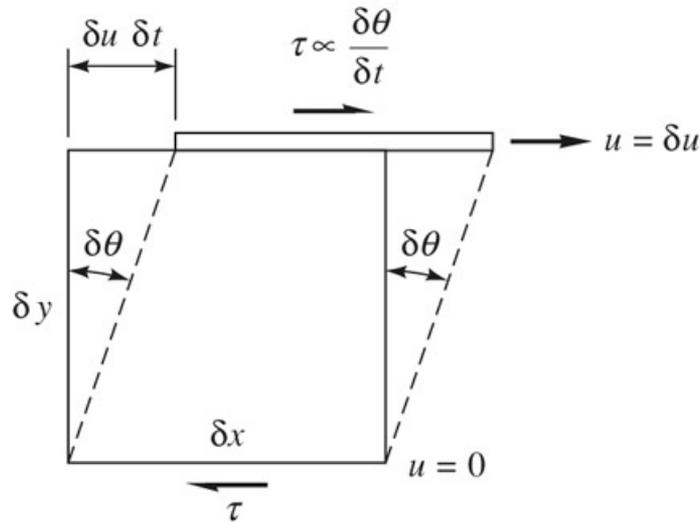
Para qualquer variável intensiva, $\chi = \chi(\mathbf{r}, t)$, onde a posição e o tempo são variáveis independentes. Exemplos: massa específica, velocidade, pressão, temperatura, tensor de tensões, etc.

Notar que mantendo o tempo fixo, temos uma fotografia instantânea de χ em todo lugar.

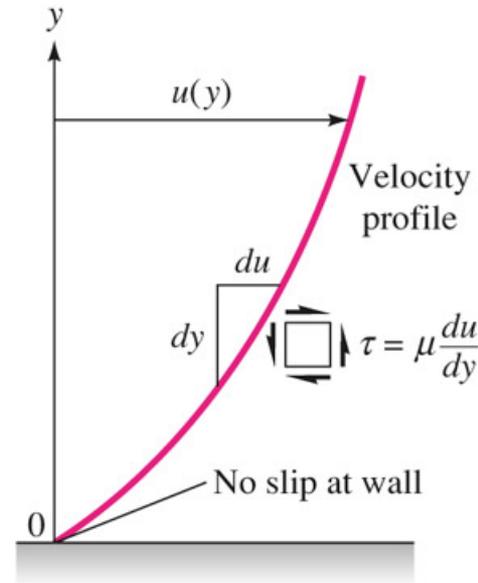
Notar que mantendo a posição fixa, temos a evolução temporal em um ponto (medidor ideal de χ).

Nenhum dos casos anteriores se corresponde com a descrição Lagrangeana. Para expressar variações temporais lagrangeanas (acompanhando às partículas ou sistemas de partículas) quando as variáveis estão expressadas em termos de campo, devemos realizar operações matemáticas (teorema de transporte de Reynolds).

Viscosidade dinâmica



(a)



(b)

$$\operatorname{tg} \delta\theta \cong \delta\theta = \frac{\delta u \delta t}{\delta y} \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy}$$

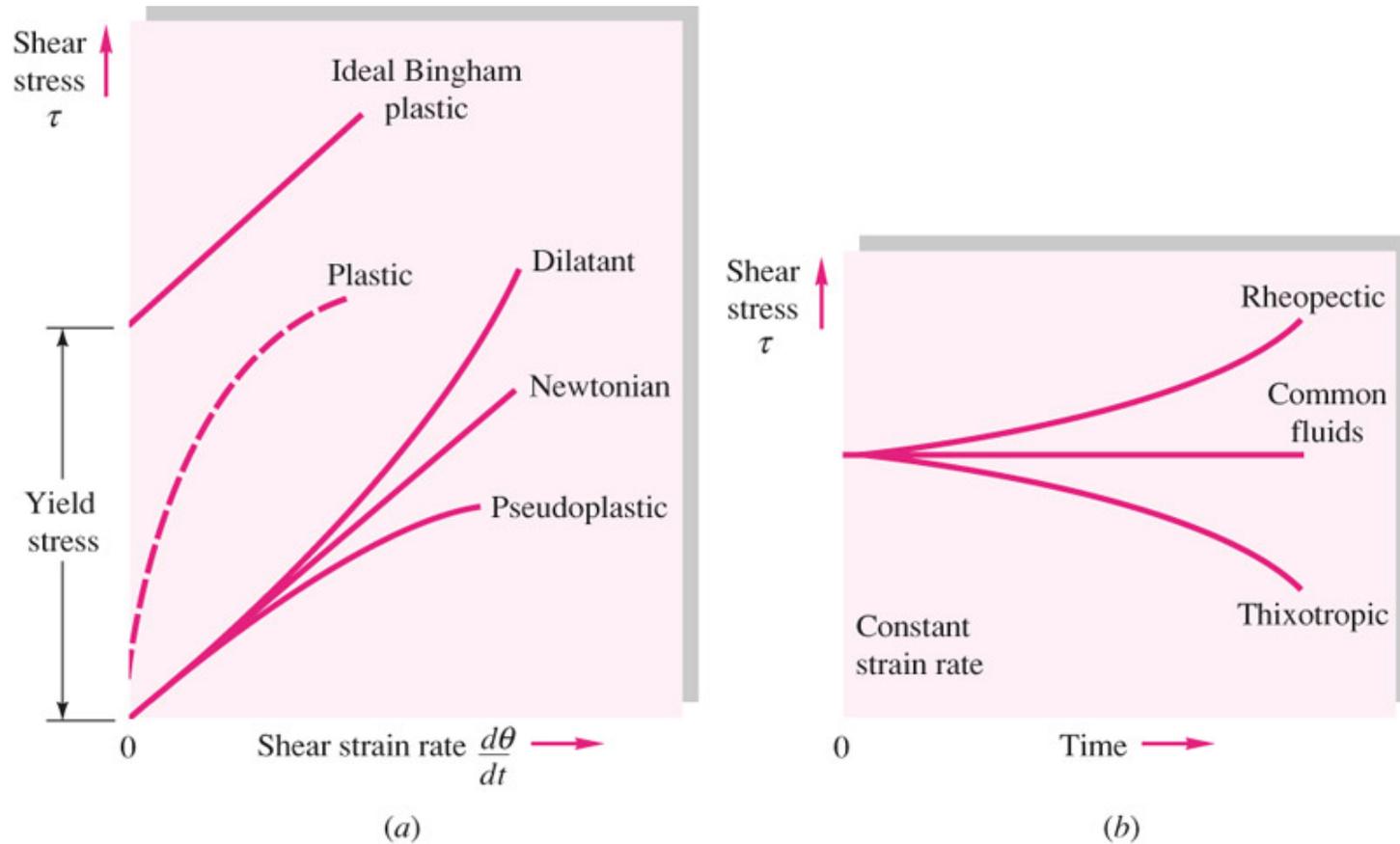
$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (\text{"lei" de viscosidade de Newton})$$

Propriedade termodinâmica (tabelada): $\mu = \mu(p, T)$

Viscosidade cinemática (difusividade de momento): $\nu = \frac{\mu}{\rho}$.

Viscosidade responsável do atrito e processos de dissipação de energia.

Fluido newtoniano



Comportamento reológico de vários materiais viscosos. Em geral, podem existir efeitos não-lineares e de história (histerese).

Para um fluido newtoniano, a viscosidade dinâmica é constante.

Algumas propriedades (1 atm, 20 °C)

Fluid	μ , kg/(m · s) [†]	Ratio $\mu/\mu(\text{H}_2)$	ρ , kg/m ³	ν m ² /s [†]	Ratio $\nu/\nu(\text{Hg})$
Hydrogen	9.0 E-6	1.0	0.084	1.05 E-4	910
Air	1.8 E-5	2.1	1.20	1.50 E-5	130
Gasoline	2.9 E-4	33	680	4.22 E-7	3.7
Water	1.0 E-3	114	998	1.01 E-6	8.7
Ethyl alcohol	1.2 E-3	135	789	1.52 E-6	13
Mercury	1.5 E-3	170	13,550	1.16 E-7	1.0
SAE 30 oil	0.29	33,000	891	3.25 E-4	2,850
Glycerin	1.5	170,000	1,260	1.18 E-3	10,300

[†]1 kg/(m · s) = 0.0209 slug/(ft · s); 1 m²/s = 10.76 ft²/s.

Compressibilidades

Representam a variação da massa específica (ou volume específico) causada pelo escoamento. São propriedades termodinâmicas, relacionadas com as propriedades elásticas do fluido.

$$\text{Compressibilidade isotérmica: } \beta_T = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T$$

$$\text{Compressibilidade isentrópica: } \beta_s = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_{\hat{s}} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_{\hat{s}}$$

$$\text{Velocidade do som: } c = \left[\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_{\hat{s}} \right]^{1/2}; c \cong 1450 \text{ m/s (água)}, c \cong 320 \text{ m/s (ar)},$$

Número de Mach: $Ma = \frac{V}{c}$; como regra geral, para $Ma \leq 0,3$ os efeitos de compressibilidade podem ser desprezados (escoamentos líquidos e de gás de baixa velocidade). Nesse caso, o escoamento é considerado incompressível.