



UNIVERSIDADE
FEDERAL DE GOIÁS

Instituto de Química

IQ - UFG



ENGENHARIA QUÍMICA

Universidade Federal de Goiás

Conceito de Fluido e Reologia

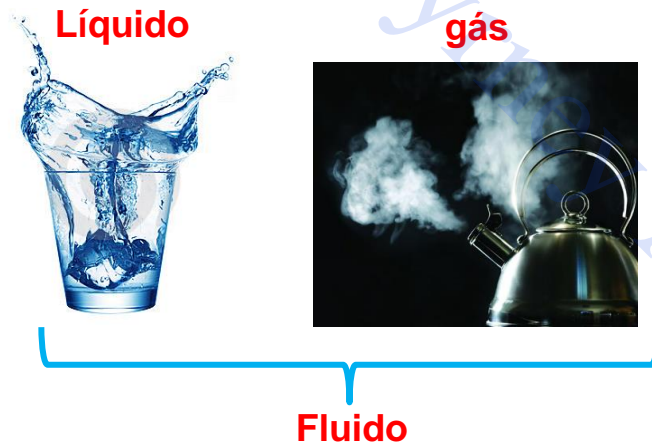
Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
Disciplina: Fenômenos de Transporte 1
site: www.dyrney.com

2. Conceito de Fluido e Reologia

2.1 O Conceito de Fluido

Considerações Preliminares

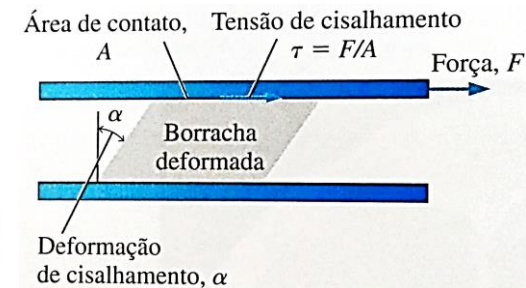
Do ponto de vista da mecânica dos fluidos, toda a matéria encontra-se em somente dois estados: **fluido e sólido**



- um fluido não resiste a aplicação de uma tensão de cisalhamento e escoar, deformando-se continuamente, não importando o quão pequena ela for;
- nos fluidos, a tensão é proporcional à taxa de deformação (variação da deformação ou deslocamento angular com o tempo);
- sob uma tensão de cisalhamento constante, um fluido nunca para de deformar-se, porém a taxa de deformação tende para um valor constante;



sólido



Fonte: Çengel e Cimbala (2015)

- um sólido resiste à tensão de cisalhamento aplicada deformando-se e pode retornar ao seu estado inicial caso a força não ultrapasse o regime elástico;
- nos sólidos, a tensão é proporcional à deformação (deslocamento angular);
- sob uma tensão de cisalhamento constante, o sólido para de deformar-se num certo ângulo de deformação fixo;

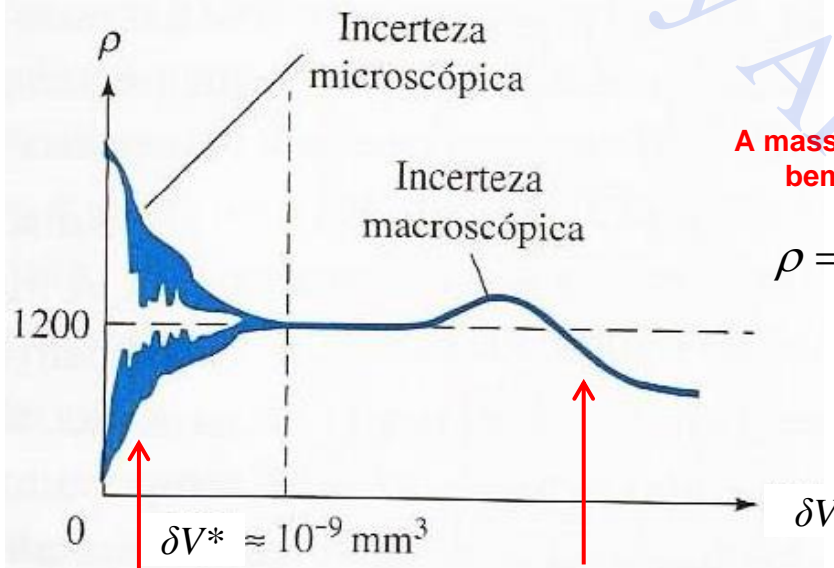
2. Conceito de Fluido e Reologia

2.1 O Conceito de Fluido

O Fluido como um meio Contínuo

Hipótese do Contínuo: Apesar de um fluido ser composto por moléculas que podem estar bem espaçadas, considera-se que qualquer propriedade do fluido (densidade, etc.) varia continuamente no espaço sem saltos de descontinuidade. Logo, o fluido é tratado não a nível molecular mas a nível de partícula ou elemento de fluido, onde neste pequeno volume composto por várias moléculas, o fluido preserva todas as características físicas do material.

Fonte: White (2011)



Variações moleculares tornam-se importantes

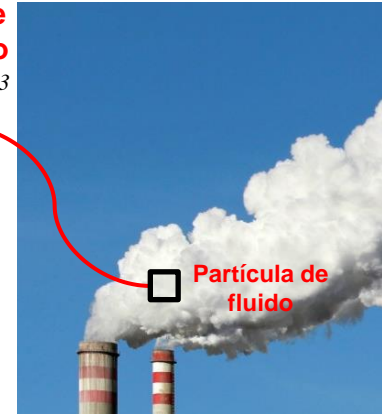
Variações de agregações tornam-se importantes

Ordem de grandeza de uma partícula de fluido

$$\delta V^* \approx 10^{-9} \text{ mm}^3$$

A massa específica é mais bem definida como

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



OBS.: 1 mol de gás ($T=25^\circ\text{C}$ e $P=1\text{atm}$) ocupa 24,5 L e contém **6×10^{23} moléculas.**

1 partícula de fluido (gás), nas mesmas condições, possui **$2,45 \times 10^{13}$ moléculas**

Logo, o conceito de contínuo pela média das moléculas é justificado pelo grande número de moléculas

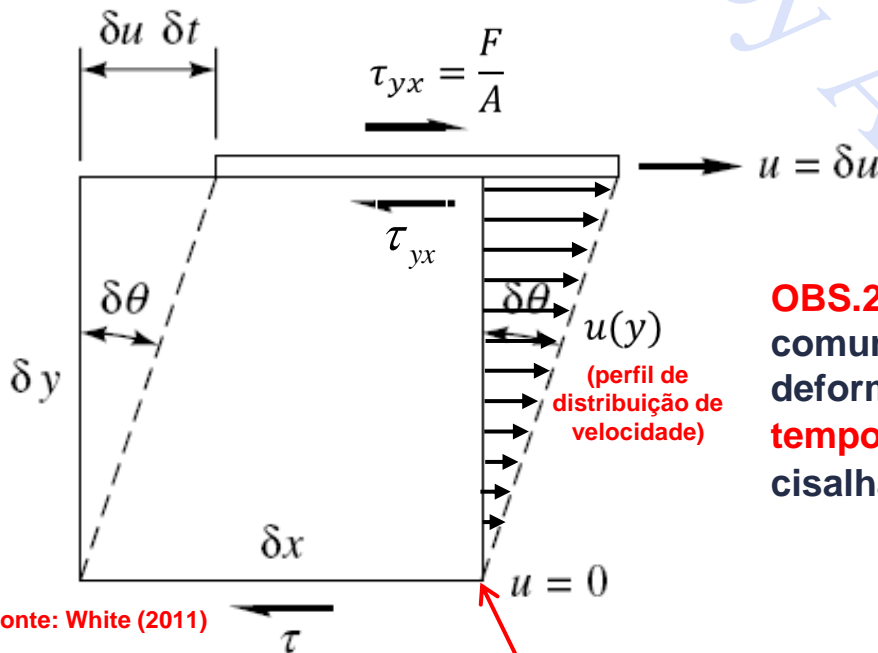
Meio Contínuo: a variação de suas propriedades é tão suave que o **cálculo diferencial** pode ser usado para analisar a substância.

2. Conceito de Fluido e Reologia

2.2 Tensão Aplicada a Fluidos

Reologia: parte da ciência que estuda o comportamento da deformação dos fluidos frente à tensão cisalhante aplicada.

Considere abaixo uma camada de fluido entre duas placas paralelas separadas por uma distância δy . Aplica-se então uma tensão de cisalhamento τ na placa superior, enquanto a placa inferior é mantida fixa.



OBS.1: o ângulo de deformação $\delta\theta$ cresce continuamente com o tempo enquanto a tensão τ_{yx} for mantida.

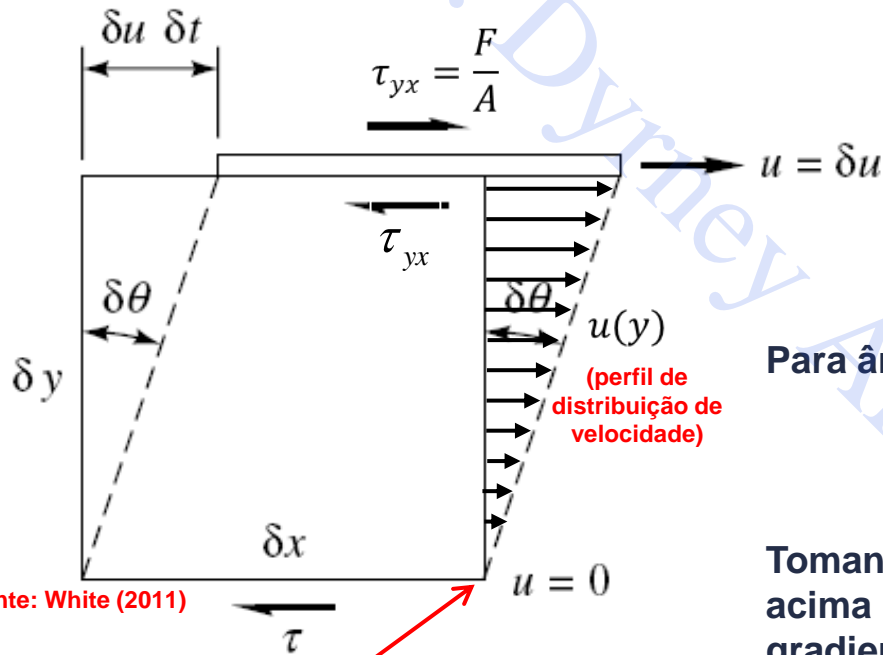
OBS.2: observa-se experimentalmente que, para fluidos comuns como água, gasolina, óleos e ar, a taxa de deformação (variação do ângulo de deformação com o tempo, $\delta\theta / \delta t$) é diretamente proporcional à tensão de cisalhamento aplicada (τ_{yx}). Logo:

$$\tau_{yx} \propto \frac{\delta\theta}{\delta t}$$

Condição de não-deslizamento: o fluido em contato direto com uma fronteira sólida adquire sua velocidade (**velocidade relativa nula**), ou seja, “gruda” na superfície e não há escorregamento.

2. Conceito de Fluido e Reologia

2.2 Tensão Aplicada a Fluidos



Aplicando a tangente sobre o ângulo $\delta\theta$ da figura ao lado, tem-se:

$$\operatorname{tg} \delta\theta = \frac{\delta u \delta t}{\delta y}$$

Para ângulos pequenos, tem-se:

$$\operatorname{tg} \delta\theta \approx \delta\theta$$

Tomando-se o limite da variação infinitesimal, a equação acima se torna a relação entre a taxa de deformação e o gradiente de velocidade:

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

OBS.3: Desta forma, a tensão de cisalhamento aplicada é também proporcional ao gradiente de velocidade para os fluidos lineares comuns.

Condição de não-deslizamento: o fluido em contato direto com uma fronteira sólida adquire sua velocidade (velocidade relativa nula), ou seja, “gruda” na superfície e não há escorregamento.

2. Conceito de Fluido e Reologia

2.2 Tensão Aplicada a Fluidos

Logo,

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

A constante de proporcionalidade é denominada **coeficiente de viscosidade** ou **viscosidade dinâmica** (μ).

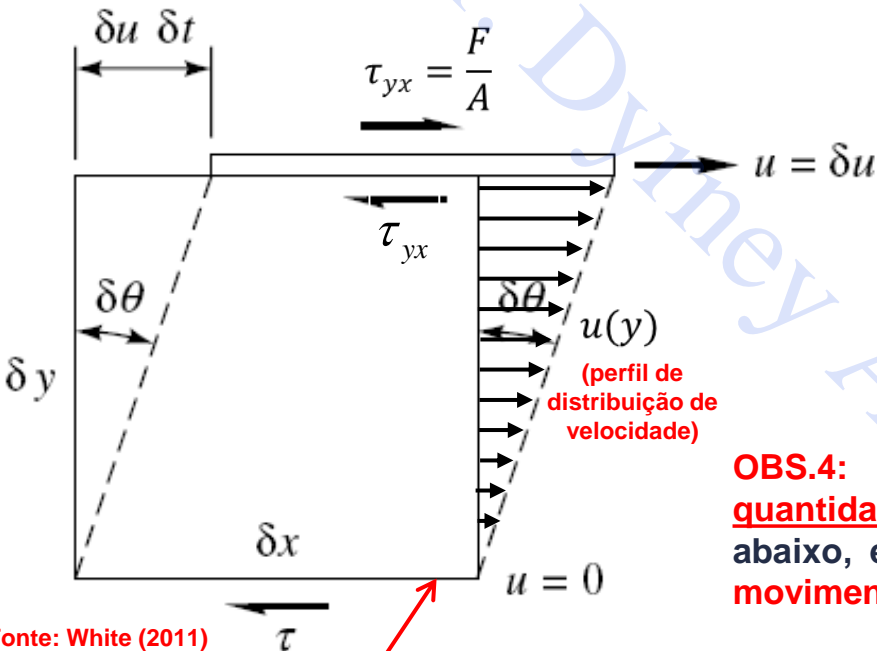
Logo,

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

OBS.4: a tensão também pode ser tratada como **fluxo de quantidade de movimento** (“mesma dimensão”), escrita como abaixo, e o sinal negativo indica que o **fluxo de quantidade de movimento** se dá de forma contrária ao gradiente de velocidade.

$$\tau_{yx} = \frac{\text{massa} \times \text{velocidade}}{\text{área} \times \text{tempo}} = -\mu \frac{du}{dy}$$

OBS.5: No caso da placa ao lado, o fluxo de quantidade de movimento vai da placa superior para a inferior, visto que o gradiente de velocidade “aponta” da inferior para a superior



Condição de não-deslizamento: o fluido em contato direto com uma fronteira sólida adquire sua velocidade (**velocidade relativa nula**), ou seja, “gruda” na superfície e não há escorregamento.

OBS.6: Os fluidos lineares que seguem esta equação são chamados de **Fluidos newtonianos** em homenagem a **sir. Isaac Newton (1642-1727)**

2. Conceito de Fluido e Reologia

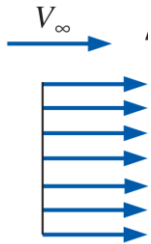
2.2 Tensão Aplicada a Fluidos

Comentários gerais sobre a distribuição de tensão viscosa no interior de escoamentos de fluidos newtonianos

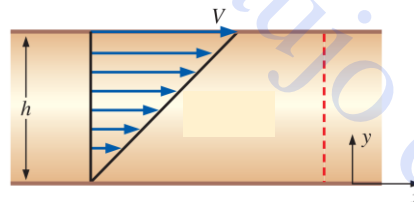
1) Lembre-se que o gradiente de velocidade presente na lei de Newton (Ex.: du/dy) é a tangente que passa pela função (perfil) de distribuição de velocidade em um determinado ponto no interior do escoamento (**conceito de derivada**).

2) A Lei de Newton diz que a tensão viscosa (**força viscosa dividida pela área superficial de contato entre as camadas de fluido ou entre uma camada de fluido e uma superfície sólida**) é proporcional ao gradiente de velocidade

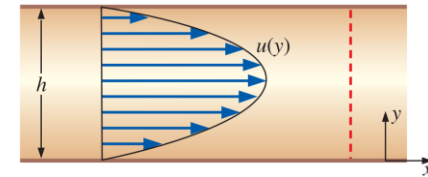
Alguns exemplos (Fonte das imagens: Çengel e Cimbala (2015)):



a) Perfil uniforme de velocidade: não existe tensão viscosa neste tipo de escoamento, pois o gradiente é nulo em qualquer posição em seu interior. Neste caso, ou o fluido é ideal, ou o escoamento está longe de paredes sólidas



b) Perfil linear de velocidade: a tensão viscosa é constante em qualquer posição no interior do escoamento, pois o gradiente é constante (inclinação constante)



c) Perfil parabólico de velocidade: a tensão viscosa varia com a posição no interior do escoamento, tendo um valor máximo na parede e um valor nulo na metade do perfil (centro)

3) Quanto maior for a tensão viscosa necessária para produzir o mesmo gradiente de velocidade, maior será a viscosidade do fluido

2. Conceito de Fluido e Reologia

2.3 Viscosidade

Conceito de viscosidade de um fluido

Conceito macroscópico: A viscosidade dinâmica (μ) é uma medida quantitativa da resistência de um fluido ao escoamento.

Conceito microscópico: A viscosidade dinâmica (μ) tende a homogeneizar as velocidades relativas entre as camadas de fluido. A viscosidade resulta da força de atrito interno entre as diferentes camadas de fluidos.



Mel

Alta

Baixa



Água

Unidades comuns da viscosidade dinâmica (μ)

Sistema Internacional (S.I.): $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}) = \text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2 = \text{Pa}\cdot\text{s}$

Sistema CGS: $\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}) = \text{poise (P)}$

OBS.7: A viscosidade da água a 20°C é igual a $1,002 \text{ cP}$ (centipoise) = $1,002 \times 10^{-2} \text{ P}$. Desta forma, a unidade centipoise serve como uma referência útil

OBS.8: A razão entre a viscosidade dinâmica (μ) e a densidade (ρ) é denominada de **viscosidade cinemática** ($\nu = \mu/\rho$). Duas unidades comuns são m^2/s e **stoke** ($1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2/\text{s}$)

2. Conceito de Fluido e Reologia

2.3 Viscosidade

Conceito de viscosidade de um fluido


- **Efeito da temperatura sobre a viscosidade dinâmica: Forte**
- **Efeito da pressão sobre a viscosidade dinâmica: Moderado, considera-se desprezível para $P \leq 100\text{atm}$**

A viscosidade dos gases **umenta** com a temperatura, visto que as colisões moleculares aumentam, aumentando, desta forma, a resistência ao escoamento.



$$\frac{\mu}{\mu_0} \approx \begin{cases} \left(\frac{T}{T_0}\right)^n & \text{Lei de Potência} \\ \frac{(T/T_0)^{3/2} (T_0 + S)}{T + S} & \text{Lei de Sutherland} \end{cases}$$

A viscosidade dos líquidos **diminui** com a temperatura, visto que moléculas mais energizadas opõem-se mais intensamente às forças intermoleculares coesivas, diminuindo, desta forma, a resistência ao escoamento.


$$\ln\left(\frac{\mu}{\mu_0}\right) \approx a + b\left(\frac{T_0}{T}\right) + c\left(\frac{T_0}{T}\right)^2$$

OBS.9: μ_0 é uma viscosidade conhecida a uma temperatura de referência T_0 . As constantes n e S e a , b e c são ajustadas aos dados empíricos e depende do fluido

2. Conceito de Fluido e Reologia

2.3 Viscosidade

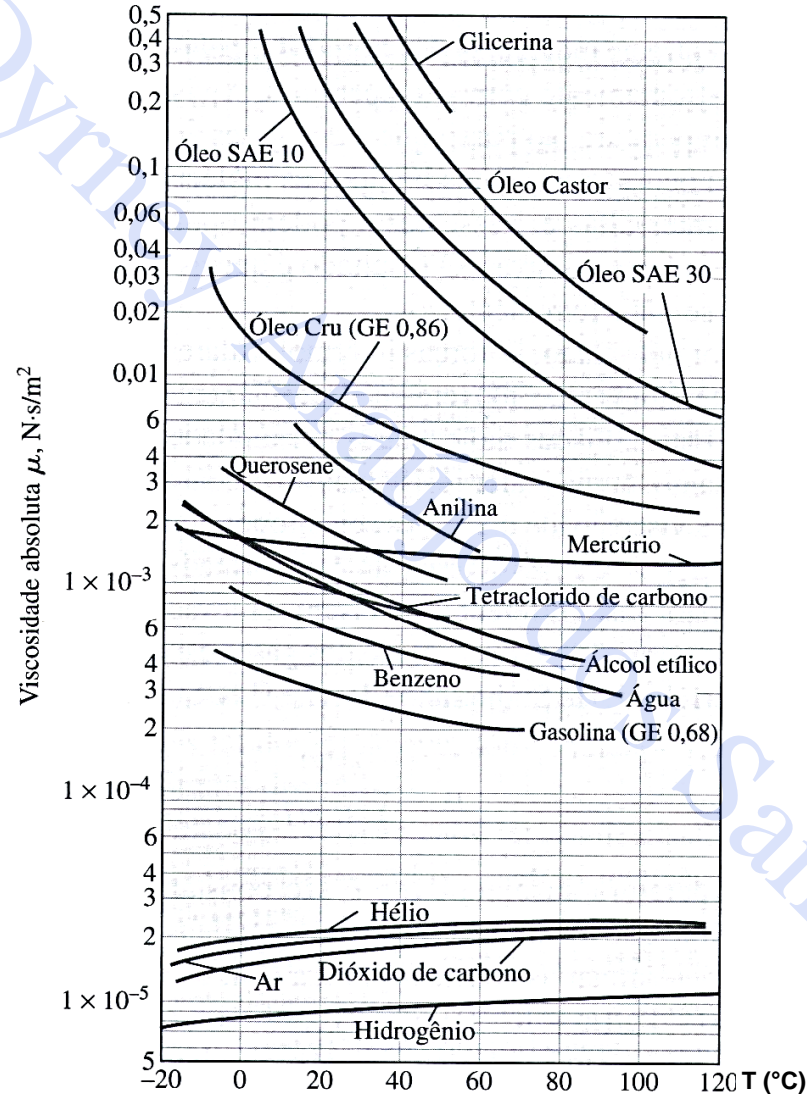
Valores de viscosidade dinâmica para o ar e a água em função da temperatura a 1 atm

Ar		Água	
Temperatura	μ (kg/m.s) x 10 ⁵	Temperatura	μ (kg/m.s) x 10 ⁴
0	1,72	0	17,5
10	1,77	10	13,0
20	1,81	20	10,2
30	1,86	30	8,0
40	1,91	40	6,51
50	1,95	50	5,41
60	1,99	60	4,60
70	2,04	70	4,02
80	2,09	80	3,50
90	2,19	90	3,11
100	2,30	100	2,82

2. Conceito de Fluido e Reologia

2.3 Viscosidade

Variação de viscosidades dinâmicas de fluidos comuns com a temperatura a 1 atm

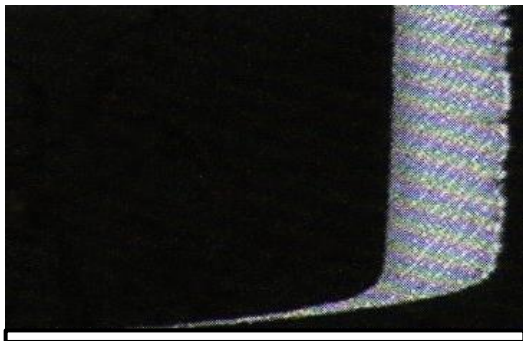


2. Conceito de Fluido e Reologia

2.4 Classificação dos Fluidos

Os fluidos podem ser classificados segundo várias terminologias. De acordo com a reologia, destacam-se:

a) **Fluidos Ideais ou invíscidos:** são aqueles cuja viscosidade dinâmica é nula ($\mu = 0$). Fisicamente, nenhum fluido possui essa propriedade mas, às vezes, é uma hipótese simplificadora útil em Engenharia como mostrado na imagem abaixo onde é mostrado o perfil de distribuição de velocidades em um fluido escoando sobre uma placa plana:



Região do escoamento onde os efeitos viscosos podem ser desprezados (**região longe das paredes sólidas**)

Região do escoamento onde os efeitos viscosos são importantes (**somente aqui há a presença de gradiente de velocidade**)

Fonte: Çengel e Cimbala (2015)

Placa plana

OBS.10: A região de escoamento adjacente à parede, na qual os efeitos viscosos e, portanto, os gradientes de velocidade, são significativos, é chamada de **camada limite hidrodinâmica**. Esta camada é formada devido à condição de não deslizamento e será vista com maiores detalhes no decorrer do curso.

b) **Fluidos newtonianos:** como dito anteriormente, são aqueles cuja taxa de deformação é proporcional à tensão aplicada (Lei de Newton). Adicionalmente, a viscosidade independe da tensão (viscosidade depende somente da pressão e da temperatura)

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

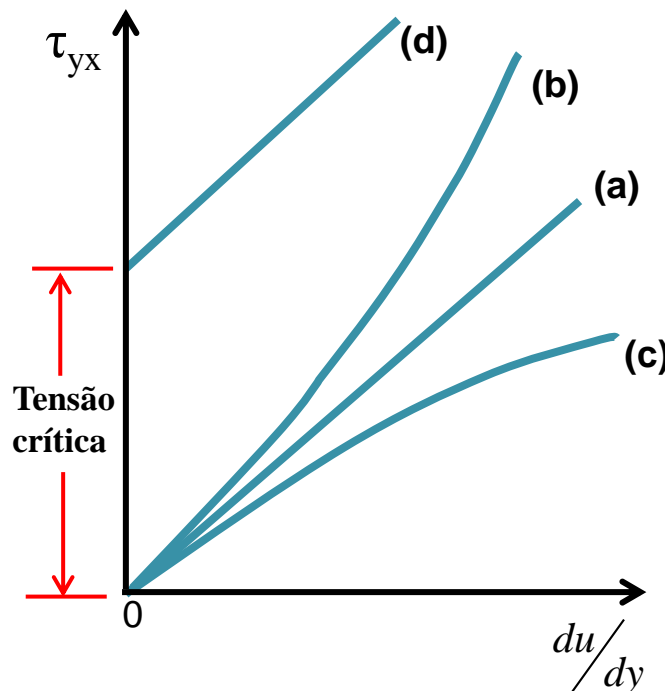
2. Conceito de Fluido e Reologia

2.4 Classificação dos Fluidos

Os fluidos podem ser classificados segundo várias terminologias. De acordo com a reologia, destacam-se:

c) Fluidos não-newtonianos: são aqueles que não seguem a lei linear de Newton. A viscosidade destes fluidos depende da tensão aplicada, além da temperatura e da pressão.

Representação Gráfica do Comportamento de Alguns tipos de Fluidos



(a) Fluido newtoniano (ou linear): a taxa de deformação é proporcional à tensão.
Ex.: água, ar, gasolina etc.

(b) Dilatante: a viscosidade “aparente” aumenta com o aumento da tensão aplicada.
Ex.: suspensões de amido, etc.

(c) Pseudoplástico: a viscosidade “aparente” diminui com o aumento da tensão aplicada.
Ex.: suspensões de polímeros, tintas etc.

(d) Fluido de Bingham: requer uma determinada tensão para começar a escoar.
Ex.: pasta de dente, ketchup, maionese, asfalto, etc.

2. Conceito de Fluido e Reologia

2.5 Representação Matemática de Fluidos Não-Newtonianos

Os fluidos **não-newtonianos** podem ser matematicamente descritos de forma similar aos fluidos newtonianos como:

$$\tau_{yx} = \eta \frac{du}{dy} \quad \text{ou} \quad \tau_{ij} = \eta D \quad \text{sendo } \eta \text{ a viscosidade aparente e } D \text{ a taxa de deformação (gradiente de velocidade)}$$

OBS.11: enquanto que nos fluidos newtonianos a viscosidade é constante a uma dada temperatura e pressão, nos fluidos não-newtonianos a viscosidade varia de acordo com a deformação sofrida

$$\eta = f(D)$$

Segundo a **Lei de Potência** (**Power-Law** ou **fluidos de Ostwald de Waele**), a viscosidade aparente pode ser correlacionada à taxa de deformação (D) da seguinte maneira:

$$\eta = \eta_0 D^{n-1} \quad \text{sendo} \quad \left\{ \begin{array}{l} \eta_0 = \text{viscosidade aparente inicial} \\ n = \text{índice de comportamento do escoamento} \end{array} \right.$$

2. Conceito de Fluido e Reologia

2.5 Representação Matemática de Fluidos Não-Newtonianos

Logo, tem-se:

$$\tau_{ij} = \eta D = (\eta_0 D^{n-1}) D = \eta_0 D^n \quad \text{visto que } \eta, \text{ é dado por (Lei de Potência)} \quad \eta = \eta_0 D^{n-1}$$

De acordo com a equação acima, conclui-se que:

- I – Se $n = 1 \rightarrow \eta = \eta_0$ (constante) e o fluido comporta-se como newtoniano;
- II – Se $n < 1 \rightarrow \eta = \eta_0 / (D^{1-n})$ e o fluido comporta-se como pseudoplástico;
- III – Se $n > 1 \rightarrow \eta = \eta_0 D^{n-1}$ e o fluido comporta-se como dilatante.

Para os **Fluidos de Bingham**, a relação entre a tensão e a taxa de deformação pode ser representada como:

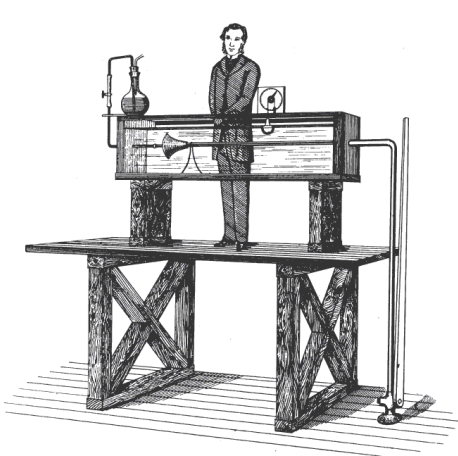
$$\tau_{ij} = \tau_0 + \eta_0 D \quad \text{se } \tau_{ij} > \tau_0 \quad \text{sendo } \tau_0 \text{ a tensão crítica}$$

2. Conceito de Fluido e Reologia

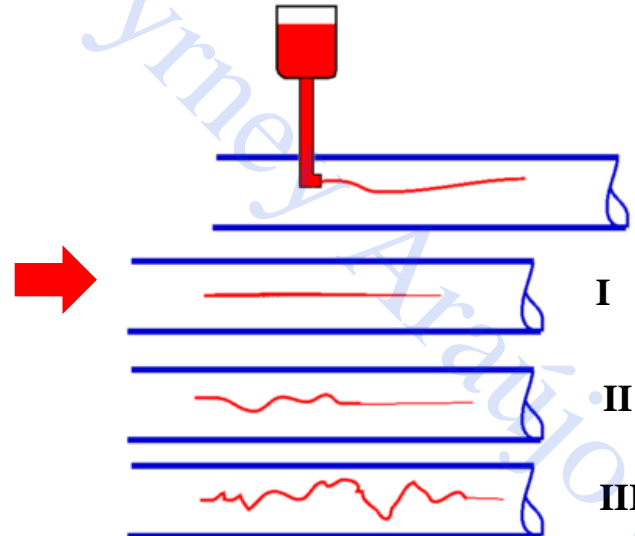
2.6 Classificação dos Escoamentos de Fluidos

Os escoamentos de fluidos podem ser classificados em:

a) Escoamentos Laminar e Turbulento



Experimento de Reynolds



I - Escoamento Laminar: baixas velocidades; fluido escoar como se fosse lâminas sobrepostas; forças viscosas sobressaem em relação às forças inerciais (Baixos Re).

II - Escoamento de Transição: velocidades intermediárias; lâminas de fluido tendem a se perturbar; forças inerciais começam a ser tornar importantes.

III - Escoamento Turbulento: altas velocidades; partículas de fluido se misturam aleatoriamente; escoamento tridimensional e transiente; forças inerciais se sobressaem em relação às forças viscosas (Altos Re).

Fonte (modificado): www-mdp.eng.cam.ac.uk

Número adimensional de Reynolds

$$Re = \frac{\text{força inerciais}}{\text{forças viscosas}} = \frac{Lv\rho}{\mu}$$

Sendo: L , v , ρ e μ um comprimento característico, a velocidade média do fluido, a massa específica e a viscosidade dinâmica do fluido, respectivamente.



Osborne Reynolds
(1842 – 1912)
(Físico e engenheiro irlandês)

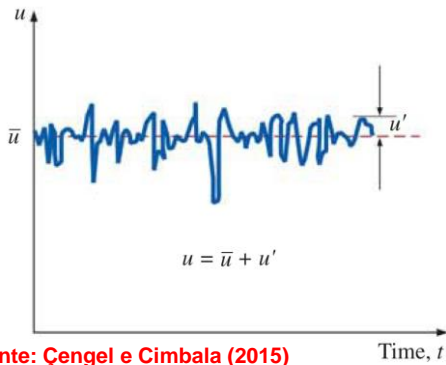
2. Conceito de Fluido e Reologia

2.6 Classificação dos Escoamentos de Fluidos

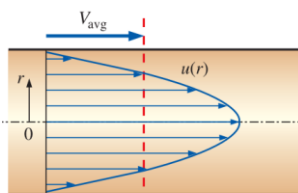
Os escoamentos de fluidos podem ser classificados em:

a) Escoamentos Laminar e Turbulento

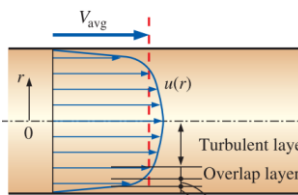
Comentários gerais sobre escoamento laminar e turbulento



1) Em um escoamento turbulento, mesmo em regime “estacionário”, a velocidade (dentre outras variáveis, tais como a temperatura, a concentração, etc.) sofre flutuações ao longo do tempo. Logo, qualquer variável instantânea (u) em um escoamento turbulento é representada como sendo a sua média temporal (\bar{u}) mais a sua flutuação (u'), ou seja $u = \bar{u} + u'$. Esta representação é conhecida como “**Decomposição de Reynolds**”. **OBS.:** o termo “estacionário” dito no início se refere ao escoamento médio, visto que um escoamento turbulento é, por natureza, transiente.



Escoamento laminar



Escoamento turbulento

Viscous sublayer

2) Comparando os perfis de distribuição de velocidades do escoamento laminar e turbulento (**neste caso o perfil médio**), percebe-se que a tensão viscosa na parede é maior para o escoamento turbulento do que para o laminar. Logo, no escoamento turbulento há um maior atrito do fluido sobre a parede, quando comparado com o escoamento laminar. Iremos ver, futuramente neste curso, que o projeto de sistemas de escoamento de fluidos depende fortemente do regime de escoamento em questão (laminar ou turbulento).

Fonte: Çengel e Cimbala (2015)

2. Conceito de Fluido e Reologia

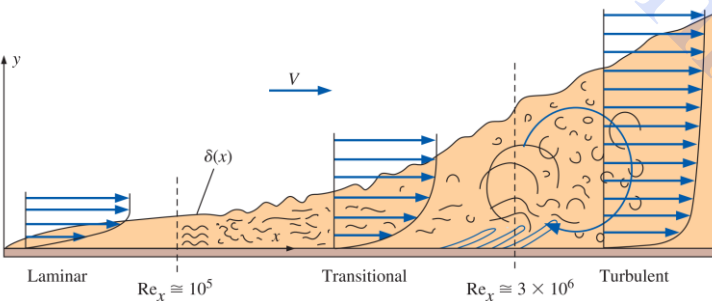
2.6 Classificação dos Escoamentos de Fluidos

Os escoamentos de fluidos podem ser classificados em:

a) Escoamentos Laminar e Turbulento

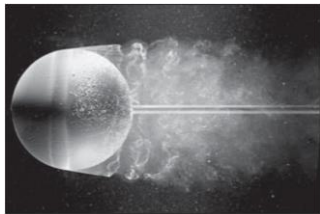
Comentários gerais sobre escoamento laminar e turbulento

3) A figura ao lado mostra um exemplo de transição do regime laminar para o turbulento em um escoamento sobre uma placa plana. Pode-se perceber, novamente, que a tensão viscosa na parede é maior para o escoamento turbulento do que para o laminar. **OBS.:** como comentado anteriormente, a região próxima à parede onde há gradientes de velocidade (região em cor “rosa”) é conhecida como **camada limite hidrodinâmica** (perceba que a sua espessura aumenta no sentido do escoamento) e será vista com maiores detalhes no decorrer do curso.

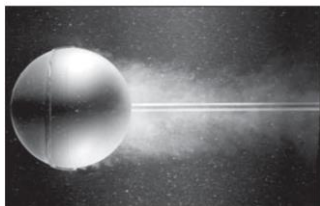


Fonte: Çengel e Cimbala (2015)

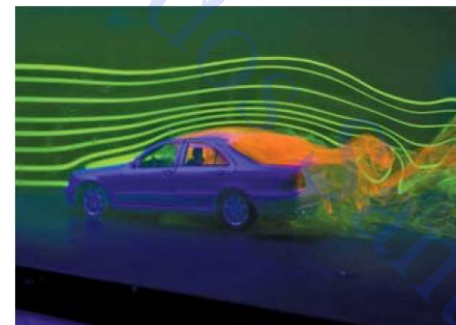
4) A figura ao lado mostra a transição entre o regime laminar e turbulento em um escoamento sobre uma esfera. **OBS.:** quando ocorre a transição para o regime turbulento em um escoamento sobre uma esfera, há uma redução na força de arraste. Logo, as bolinhas de golfe possuem sulcos (“buracos”) sobre a sua superfície para que haja a transição “mais rápida” para o regime turbulento e elas possam ser lançadas a uma maior distância (menor arraste)



(a)



Fonte: Çengel e Cimbala (2015)



Fonte: Çengel e Cimbala (2015)

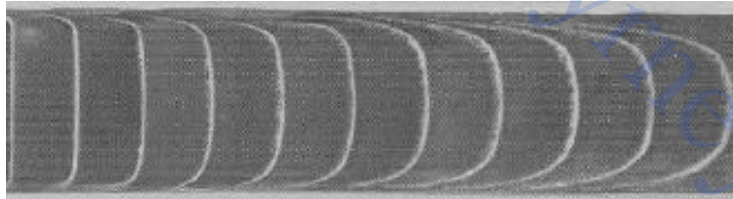
5) A figura ao lado mostra o escoamento turbulento formado atrás de um carro em movimento (este experimento foi realizado no interior de um túnel de vento usando “fumaça” para observar o escoamento).

2. Conceito de Fluido e Reologia

2.6 Classificação dos escoamentos de Fluidos

Os escoamentos de fluidos podem ser classificados em:

b) Escoamentos Interno e Externo



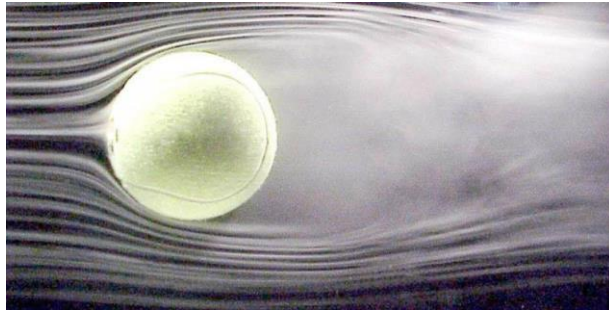
Escoamento Interno: Escoamentos completamente envolvidos por superfícies sólidas. São dominados pela influência da viscosidade em todo o campo de escoamento.

Ex.: escoamento no interior de tubulações. Seguem valores de referência para o número de **Reynolds**:

$$Re \leq 2300 \text{ (Laminar)}$$

$$Re > 2300 \text{ (Turbulento)}$$

Neste caso $L = D_T$
(diâmetro da tubulação)



Escoamento Externo: Escoamentos não confinados de um fluido sobre uma superfície. Os efeitos viscosos estão restritos às camadas-limite próximas das superfícies sólidas e às regiões de esteira a jusante dos corpos.

Ex.: escoamento sobre uma bola de tênis, sobre uma placa, sobre um duto, etc. Seguem valores de referência para o número de **Reynolds** :

$$Re \leq 5 \times 10^5 \text{ (Laminar)}$$

$$Re > 5 \times 10^5 \text{ (Turbulento)}$$

Neste caso $L = D_E$
(diâmetro da bola)

2. Conceito de Fluido e Reologia

2.6 Classificação dos escoamentos de Fluidos

Os escoamentos de fluidos podem ser classificados:

c) Escoamentos Compressível e Incompressível

Escoamento Compressível: escoamentos nos quais as variações na massa específica não são desprezíveis

Escoamento Incompressível: escoamentos nos quais as variações na massa específica são desprezíveis

Número adimensional de Mach



Ernst Waldfried Josef Wenzel Mach
(1838 – 1916)
(Físico e filósofo austríaco)

$$Ma = \frac{v}{c}$$

sendo: **v** e **c** a velocidade do fluido e a velocidade do som no fluido, cujo valor é de **346 m/s** no ar à temperatura ambiente e ao nível do mar, respectivamente

$Ma < 0,3$ (Escoamento pode se considerado incompressível)

$Ma > 0,3$ (Escoamento compressível)

$Ma = 1$ **Sônico**

$Ma < 1$ **Subsônico**

$Ma > 1$ **Supersônico**

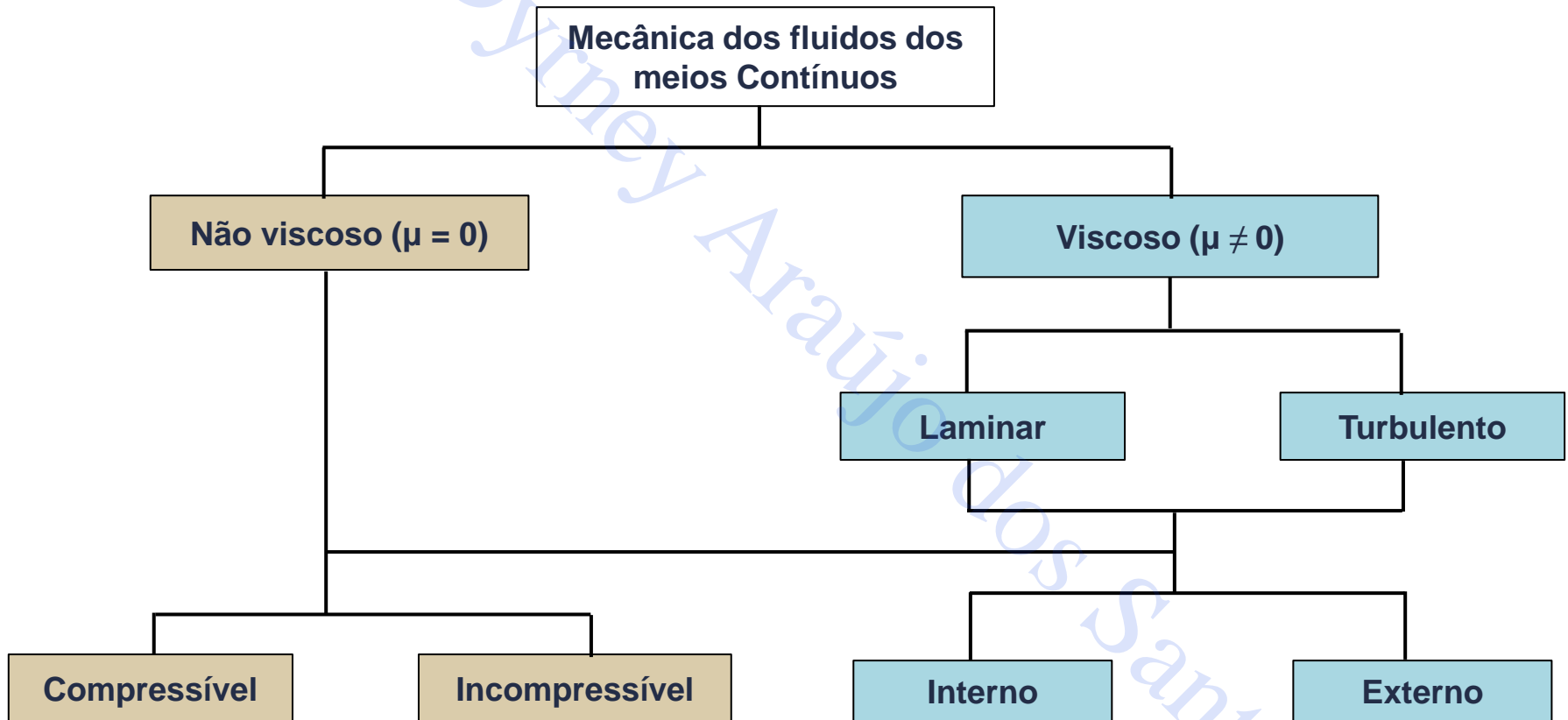
$Ma \gg 1$ **Hipersônico**

OBS.12: não confundir escoamento incompressível com fluido incompressível. O ar escoando a baixas velocidades pode apresentar baixa variação de massa específica apesar de ser considerado um fluido compressível.

2. Conceito de Fluido e Reologia

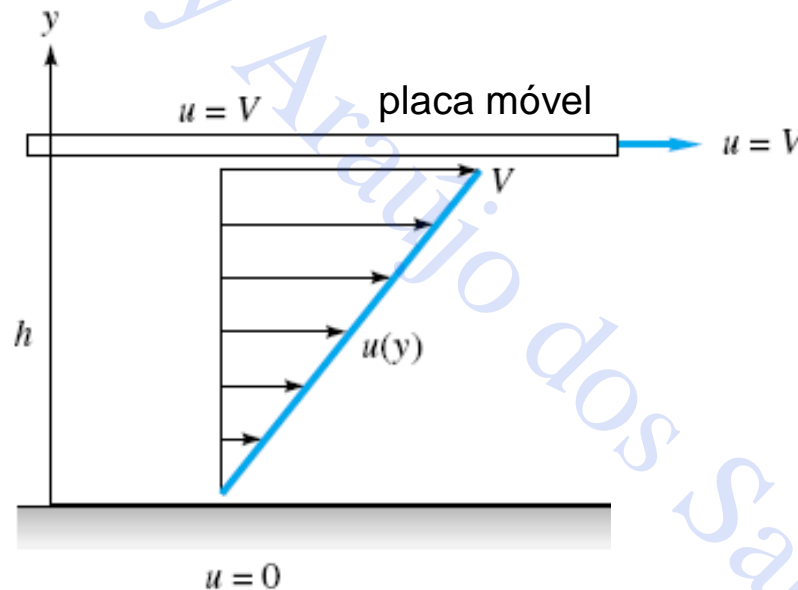
2.6 Classificação dos escoamentos de Fluidos

Possível Classificação da Mecânica dos fluidos de meios Contínuos



2. Conceito de Fluido e Reologia

Exercício proposto: Uma placa infinita move-se sobre uma segunda placa (**em repouso**), havendo entre elas uma camada de líquido (**fluido newtoniano**), como mostrado na figura abaixo. Considerando que a velocidade u varia linearmente com y no interior do fluido no espaço entre as placas (**$u = ay + b$, sendo a e b duas constantes**), determine a distribuição de velocidade com base nas condições de contorno (ou seja, as constantes a e b). Determine, também, a força, em módulo, exercida pela placa superior sobre o fluido para que a mesma se mova com uma velocidade constante V .



Bibliografia

BIRD, R.B.; STEWART, W.E. e; LIGHTFOOT, E.N. Fenômenos de transporte, 2ª ed., LTC, 2004.

ÇENGEL, Y.A e CIMBALA, J.M.; Mecânica dos fluidos, McGraw Hill, 3ª edição, 2015.

WHITE, F. M. Mecânica dos Fluidos. 6ª edição. MCGRAW-HILL, 2011.