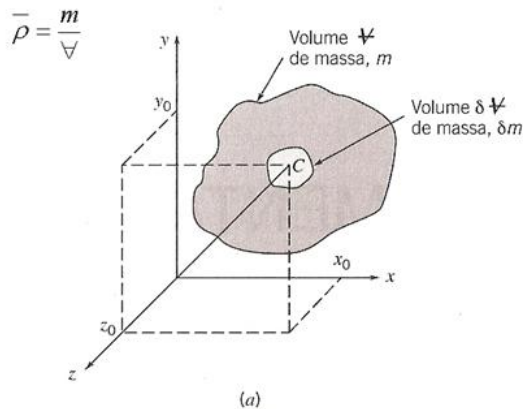


ENG 275 – Fenômenos de Transporte

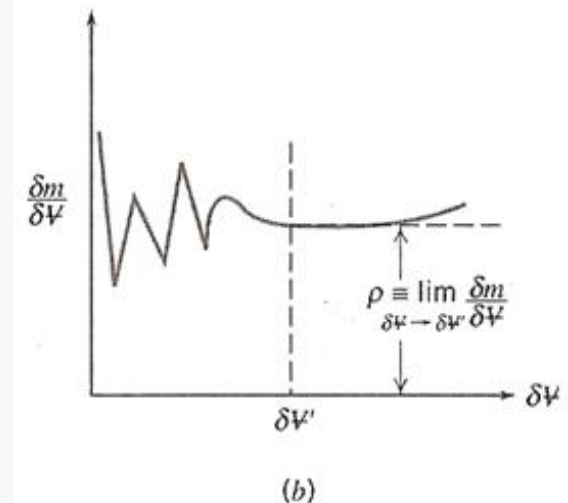
Capítulo 2- Conceitos Fundamentais

O fluido é um meio contínuo?

Sob o ponto de vista microscópico não. Os fluidos possuem espaços vazios entre suas moléculas, não apresentando, portanto, uma massa continua no espaço. Para a maioria das aplicações práticas este aspecto não é relevante. Desta forma as propriedades dos fluidos são consideradas como funções contínuas da posição e do tempo.



Determinação da massa específica em um ponto.



Campo de massa específica

Refere-se a distribuição da massa específica em função das coordenadas espaciais. Caso a massa específica em um determinado ponto varia com o tempo, a representação do campo (campo escalar) é dada por:

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

Gravidade específica (specific gravity - SG) ou densidade relativa

É a razão entre a massa específica do material e a massa específica da água a 4°C (1000 kg.m⁻³).

Ex. Qual a massa específica do mercúrio sabendo-se que sua densidade é 13,6 ?

$$d_{Hg} = \frac{\rho_{Hg}}{\rho_{agua}}$$

$$\rho_{Hg} = 13,6 \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} = 13600 \frac{kg}{m^3}$$

Peso específico γ

É o peso do fluido por unidade de volume

$$\gamma = \frac{P}{V} \quad \therefore \gamma = \frac{m.g}{V} = \rho.g$$

Campo de Velocidade

Dentro de um campo de escoamento uma partícula fluida apresentará uma velocidade num determinado instante e posição. A velocidade da partícula pode ser determinada conhecendo-se o campo de velocidade (**campo vetorial**), ou seja, como a velocidade das partículas varia em cada posição e com o tempo dentro do campo de escoamento.

$$\vec{V} = \vec{V}(x, y, z, t)$$

$$\vec{V} = u \vec{i} + v \vec{j} + w \vec{k}$$

Escoamento permanente

Quando as propriedades em cada ponto de um campo de escoamento não varia com o tempo, o escoamento é dito **PERMANENTE**.

ATENÇÃO: as propriedades podem variar de ponto para ponto.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = 0, \quad \text{onde } \eta \text{ representa uma propriedade qualquer do fluido}$$

$$\text{Se } \eta = \rho$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad \text{ou } \rho = \rho(x, y, z)$$

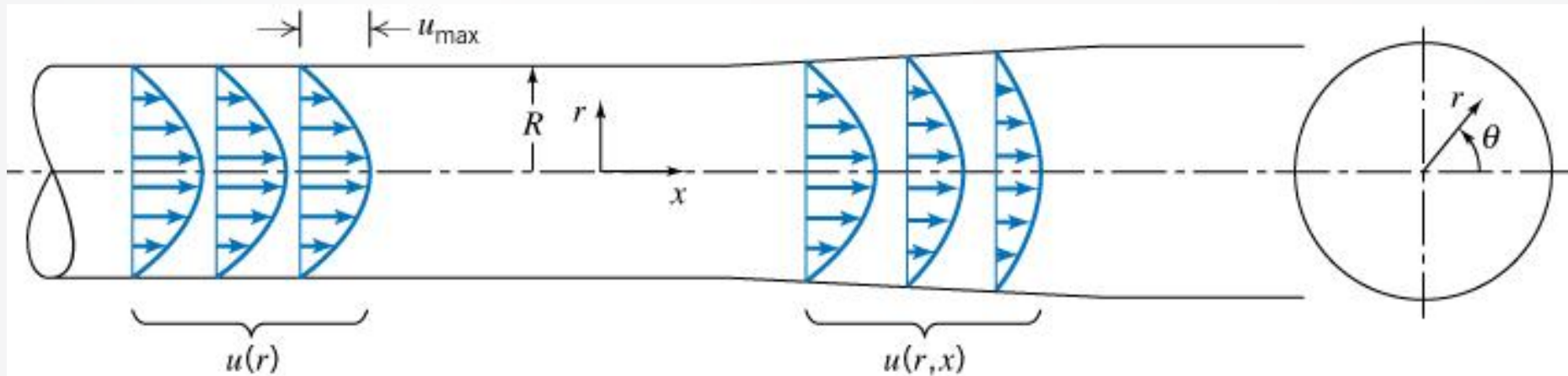
$$\text{Se } \eta = \vec{V}$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = 0 \quad \text{ou } \vec{V} = \vec{V}(x, y, z)$$

Caso $\frac{\partial \eta}{\partial t} \neq 0$, **o escoamento é dito TRANSIENTE**

Escoamento Uni, bi e tridimensional

Aquele em que o campo de velocidade é caracterizado por uma, duas ou três coordenadas espaciais respectivamente.



$$u = u_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

Escoamento Bidimensional –
função de duas coordenada, $u = u(r, x)$. Note que a velocidade decresce no sentido positivo de x .

Escoamento Unidimensional –
função apenas de uma
coordenada, $u = u(r)$

Escoamento uniforme

Aquele em que a velocidade é constante através de qualquer seção normal ao escoamento.

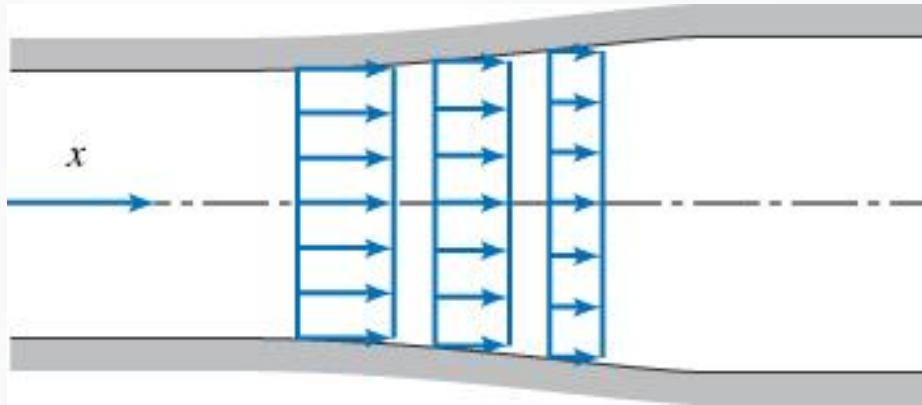


Fig. 6 – Escoamento uniforme em uma seção

Note que a velocidade é constante ao longo de uma mesma seção, mas varia na direção x (escoamento unidimensional).

Trajectoria – Caminho traçado por uma partícula fluida em movimento.

Linha de emissão – Quando concentramos a atenção em um local fixo do espaço e marcamos todas as partículas que passam por ali.

Linha de corrente – Linha formada pela tangente de cada ponto no escoamento.



Linhas de corrente

É uma linha desenhada no campo de escoamento tal que em todos os seus pontos ela é tangente ao vetor velocidade (Fig. 7a)

Tubo de corrente

É o tubo formado pelo conjunto de todas as linhas de corrente que passam por uma pequena curva fechada (Fig. 7b).

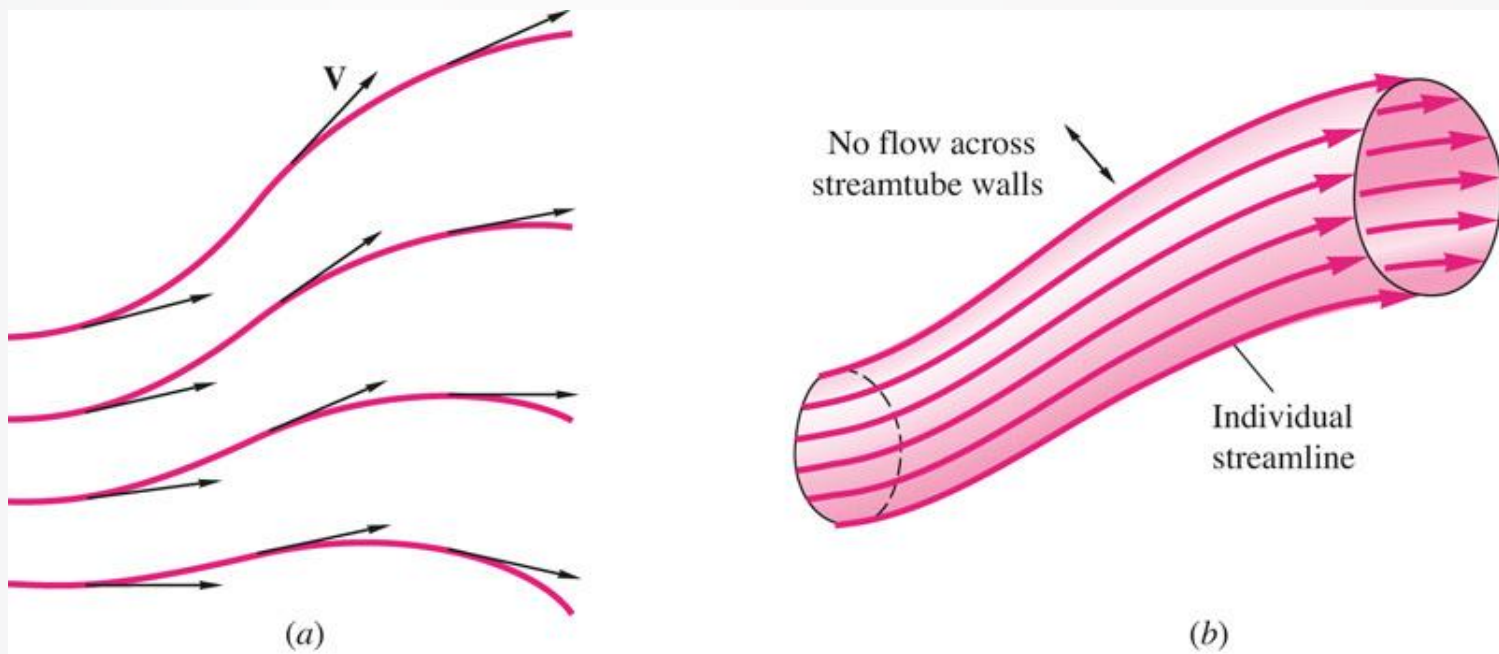


Figura - 7 (a) Linhas de corrente num campo de escoamento. (b) Tubo de corrente

Forças de Superfícies

São aquelas que surgem devido ao contato de uma partícula de fluido com outras partículas, ou com uma superfície sólida. Exemplo: forças devido ao atrito (forças viscosas) e de pressão.

Obs.: As forças de superfícies agindo sobre uma partícula fluida geram **TENSÕES**.

Forças de Campo ou de Corpo

São as que atuam sobre o corpo sem contato direto. Exemplo: *força gravitacional, força eletromagnética*.

$$P = dm \cdot g$$

$$P = \rho \cdot g \cdot dV$$

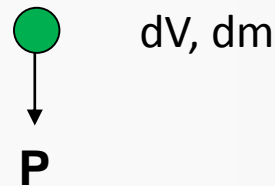


Fig 8 – Força de campo sobre uma partícula de fluido de massa dm

Força normal (δF_n)

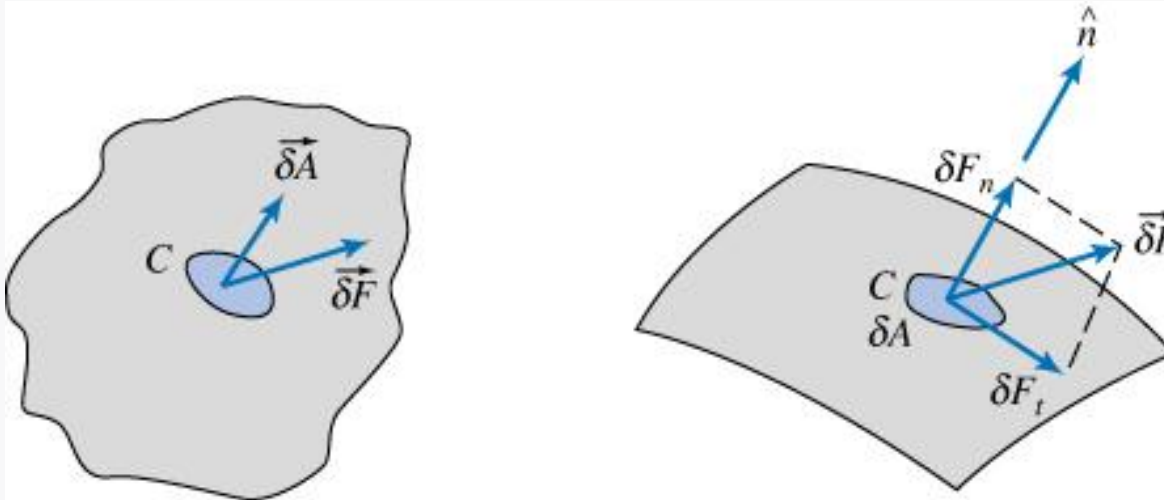


Fig 9 – Tensão sobre um elemento de fluido de área δA

Aquela que atua normal à superfície do corpo (δF_n). Esta força dá origem a uma tensão normal dada por:

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

Força cisalhante (δF_t)

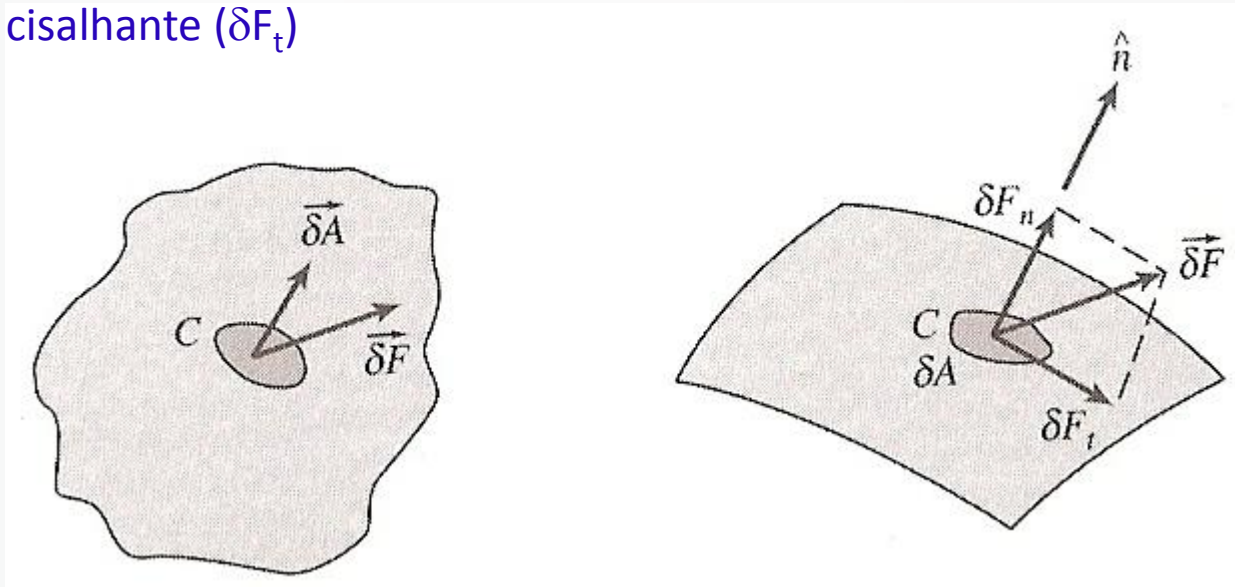


Fig 9 – Tensão sobre um elemento de fluido

Aquela que atua tangente a superfície do corpo (δF_t). Esta força da origem a tensão cisalhante:

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

Notação

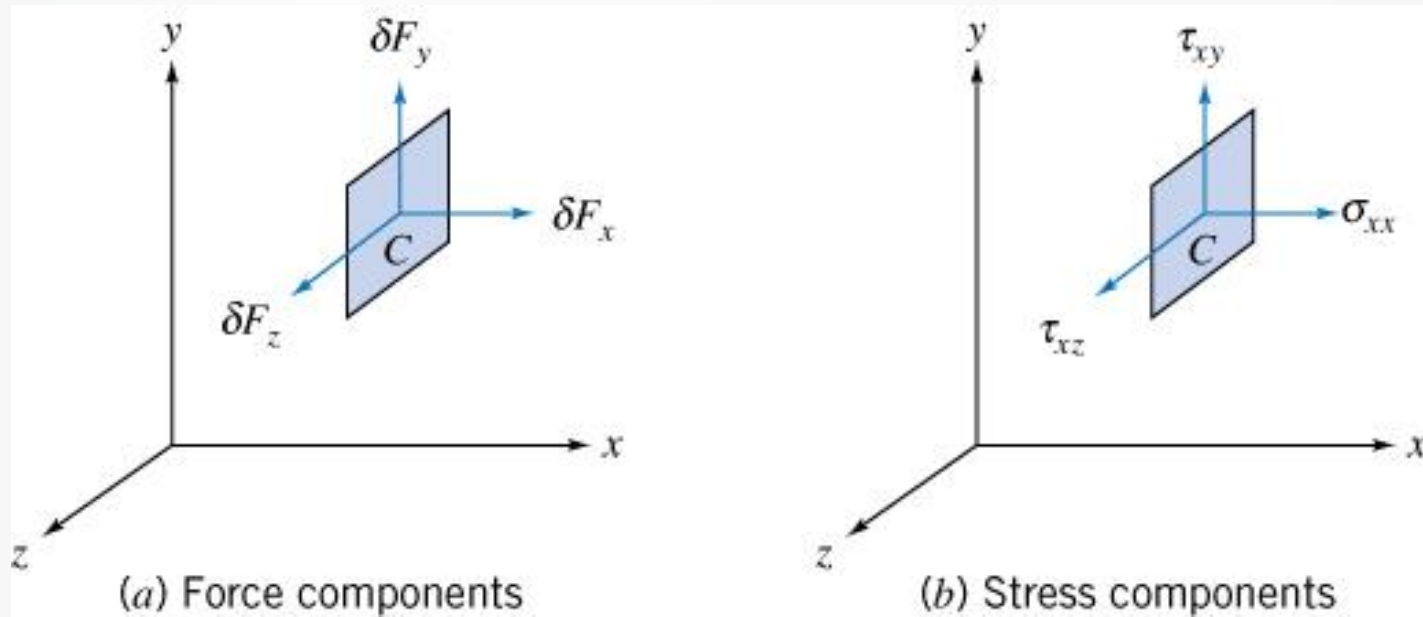


Fig 10 – Componentes de força e tensão em um elemento de área δA_x

$$\sigma_{xx} = \lim_{\delta A_x \rightarrow 0} \frac{\delta F_x}{\delta A_x}$$

$$\tau_{xy} = \lim_{\delta A_x \rightarrow 0} \frac{\delta F_y}{\delta A_x}$$

$$\tau_{xz} = \lim_{\delta A_x \rightarrow 0} \frac{\delta F_z}{\delta A_x}$$

Observações:

O primeiro índice indica o plano no qual atua a tensão (é sempre perpendicular ao eixo que lhe dá o nome);

O segundo índice indica a direção em que atua a tensão.

Uma tensão positiva indica que o sentido da tensão e o plano são ambos positivos, ou ambos negativos.

Uma tensão é negativa quando seu sentido tem sinal oposto ao sinal do plano no qual atua.

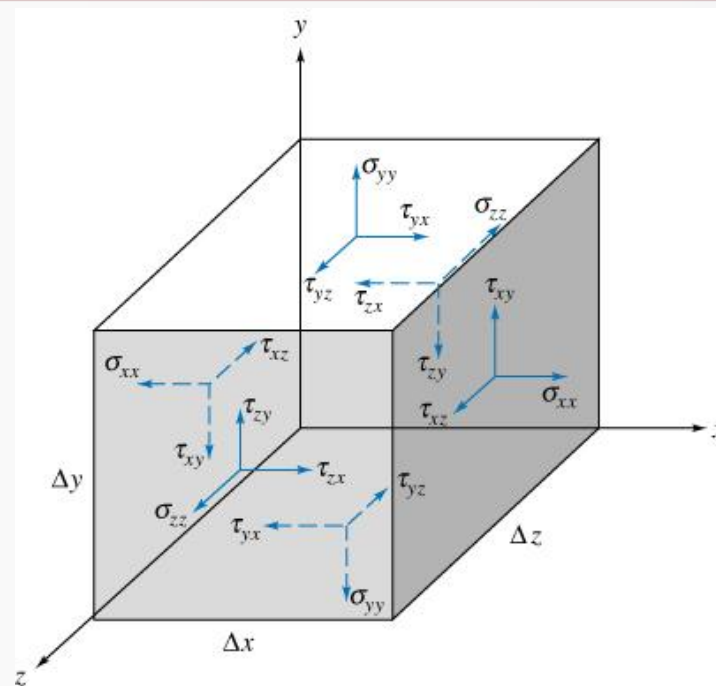
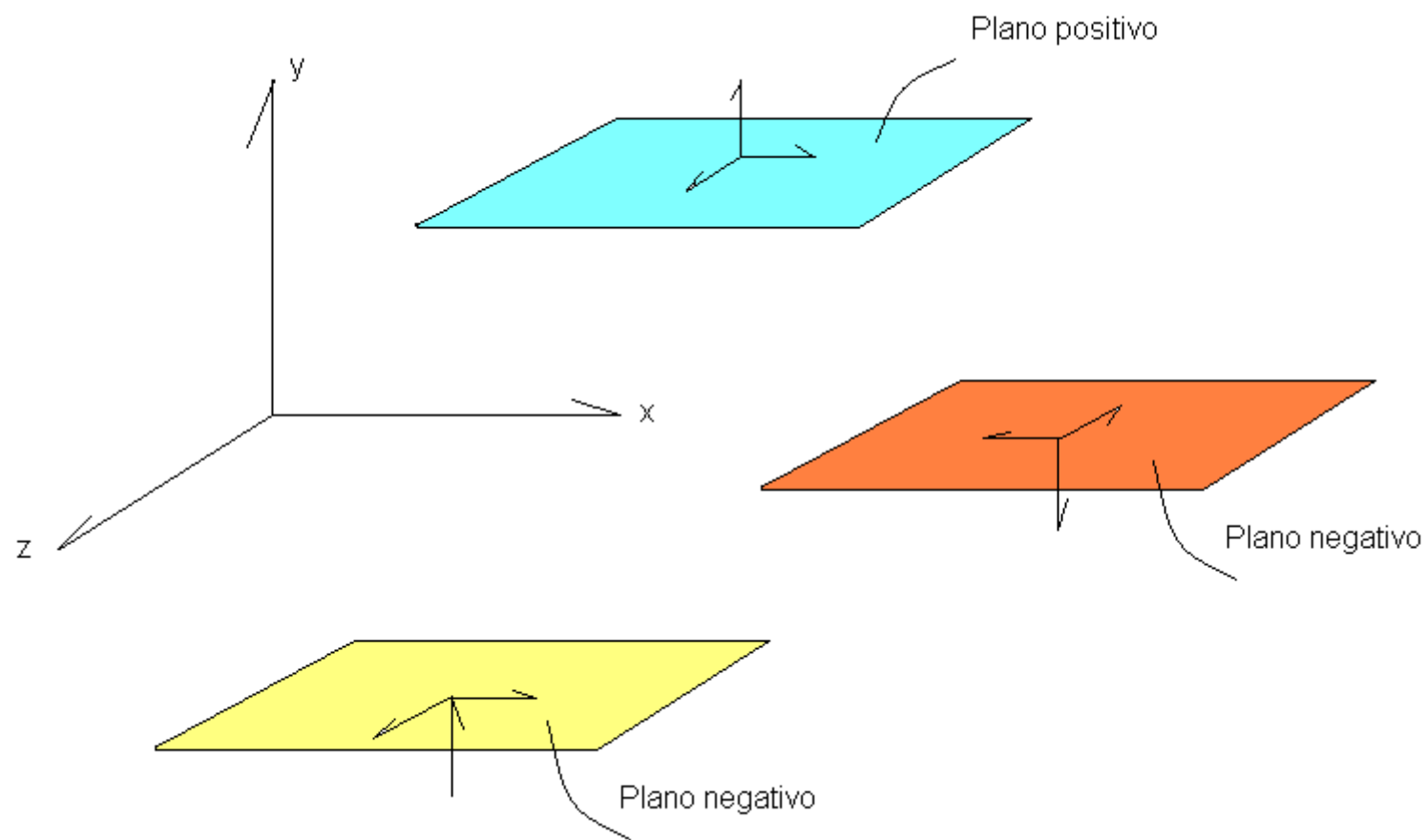


Fig 11 – Representação de tensões normais e cisalhante



Viscosidade

É a propriedade que o fluido apresenta que lhe confere resistência ao movimento de cada camada do fluido sobre a camada vizinha.

O fato de alguns fluidos resistirem mais ao movimento do que outros é porque apresentam viscosidade mais elevadas.

Qual a origem das tensões de cisalhamento nos fluidos ?

As tensões de cisalhamento correm devido ao escoamento viscoso dos fluidos.

Observações:

- 1) Ao escoarem os fluidos sofrem transformações irreversíveis. A energia mecânica não é recuperável, sendo transformada em escoamento viscoso e em energia térmica.
- 2) Um fluido em repouso, mesmo sendo viscoso, não apresenta tensão de cisalhamento.

Como podemos saber se um fluido é mais viscoso que outro?

Observe a Figura 12:

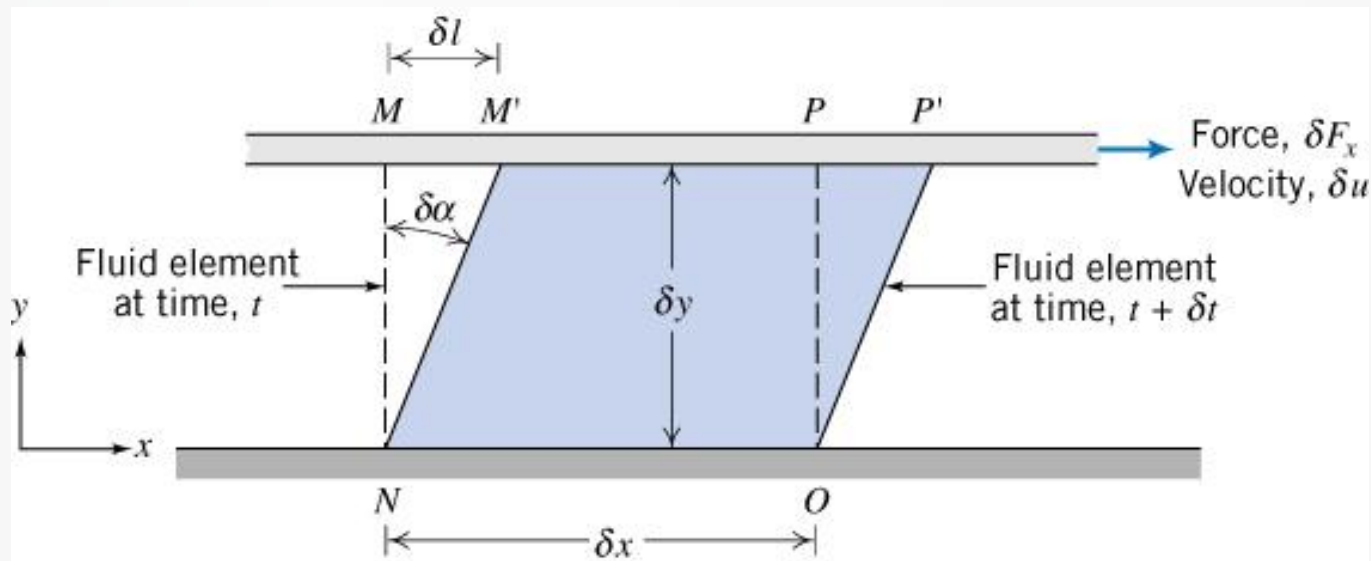
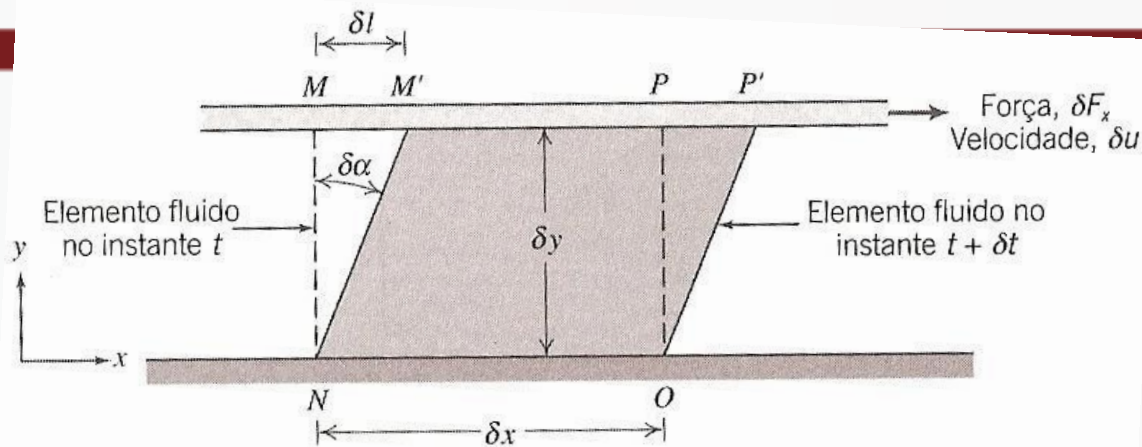


Figura 12 – Deformação de um elemento de fluido. O atrito entre o fluido e a superfície móvel causa a torsão do fluido.



A tensão de cisalhamento aplicada ao elemento fluido é dado por: $\tau_{yx} = \lim_{\delta A_y \rightarrow 0} \frac{\delta F_x}{\delta A_y} = \frac{dF_x}{dA_y}$

δA_y - área de contato do elemento fluido com a placa;

δF_x - força constante aplicada a placa superior;

Durante um intervalo δt o elemento de fluido sofre uma deformação $MNOP \rightarrow M'NOP'$, dada por:

$$\text{taxa de deformação} = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta \alpha}{\delta t} = \frac{d\alpha}{dt}$$

Sabemos que: $\delta l = \delta u \cdot \delta t$ e para ângulos pequenos $\delta l = \delta y \cdot \delta \alpha$

Igualando ambas equações: $\frac{\delta \alpha}{\delta t} = \frac{\delta u}{\delta y}$

Tomando o limite de ambos os lados:

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

(TAXA DE DEFORMAÇÃO)

Conclusão

Todo fluido quando submetido a uma tensão de cisalhamento escoará, apresentando uma taxa de deformação denominada taxa de cisalhamento.

Existe alguma relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação?

Fluido Newtoniano (Lei da viscosidade dos fluidos lineares)

São aqueles nos quais as tensão de cisalhamento são diretamente proporcional à taxa de deformação.

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

Como cada fluido apresenta uma resistência diferente ao escoamento devido sua natureza, então:

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

Onde μ é a viscosidade absoluta ou dinâmica

Viscosidade de algumas substâncias à temperatura de 20°C:

Substância	Viscosidade, Pa.s
Ar (0°C)	$17,4 \times 10^{-6}$
Álcool etílico	$0,248 \times 10^{-3}$

Metanol	$0,597 \times 10^{-3}$
Água	$1,0030 \times 10^{-3}$
Óleo de oliva	81×10^{-3}

Glicerol	1,485
----------	-------

Polímero derretido	10^3
Piche	10^7
Vidro	10^{40}

Viscosidade cinemática

É aquela medida por um sistema de geometria que utiliza-se da gravidade para sua obtenção de medida. Medida por copos, tem como método a contagem, através de um cronômetro, do tempo gasto para o fluido escorrer pelo orifício inferior destes copos. É obtido dividindo-se o coeficiente de viscosidade absoluta pela massa específica do líquido:

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

Imagine dois fluidos A e B com igual viscosidade absoluta, os quais são colocados a fluírem verticalmente através de um orifício. O fluido A tem massa específica maior que o fluido B. **Qual fluirá mais rapidamente?**

Exemplo

São dadas duas placas paralelas a distância de 2mm. A placa superior move-se com velocidade de 4m/s enquanto a inferior é fixa. Se o espaço entre as placas for preenchido com óleo (viscosidade cinemática $0,1 \text{ cm}^2/\text{s}$ e massa específica 830 kg/m^3).

Qual será a tensão de cisalhamento que agira no óleo?

Fluido Não Newtoniano

Fluidos nos quais a tensão de cisalhamento não é diretamente proporcional à taxa de deformação.

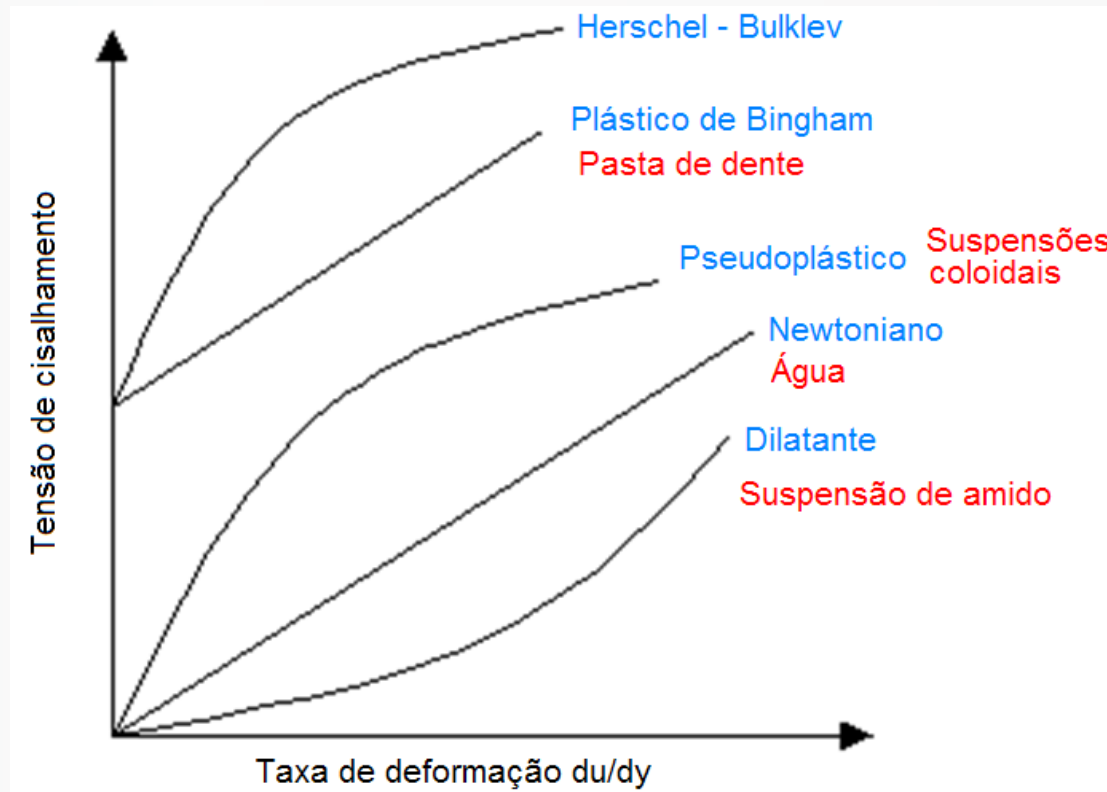


Fig. 14 – Diagrama reológico para fluidos com comportamento independente do tempo

Importância

O entendimento e o controle das propriedades é de importância na **fabricação, manuseio e controle de qualidade** de uma grande quantidade de materiais (borrachas, plásticos, alimentos, cosméticos, tintas, óleos lubrificantes) e **em processos** (bombeamento de líquidos em tubulações, moldagem de plásticos, etc). No estudo do escoamento de fluidos é importante quantificar e tipificar sua resistência à deformação.

Comportamento dos fluidos

Elasticidade

As substâncias sólidas podem apresentar um comportamento elástico ideal. Denomina-se elasticidade a toda deformação reversível. As substâncias que apresentam um comportamento elástico ideal sofrem deformação instantânea sob ação de uma força, que desaparece quando a tensão é eliminada. **Caso a tensão aplicada exceda um certo limite, ocorre uma deformação plástica.**

Muitos sistemas apresentam um comportamento intermediário entre esses dois extremos, apresentando tanto características viscosas como elásticas. Esses materiais são chamados de **viscoelásticos**.

Classificação dos fluidos

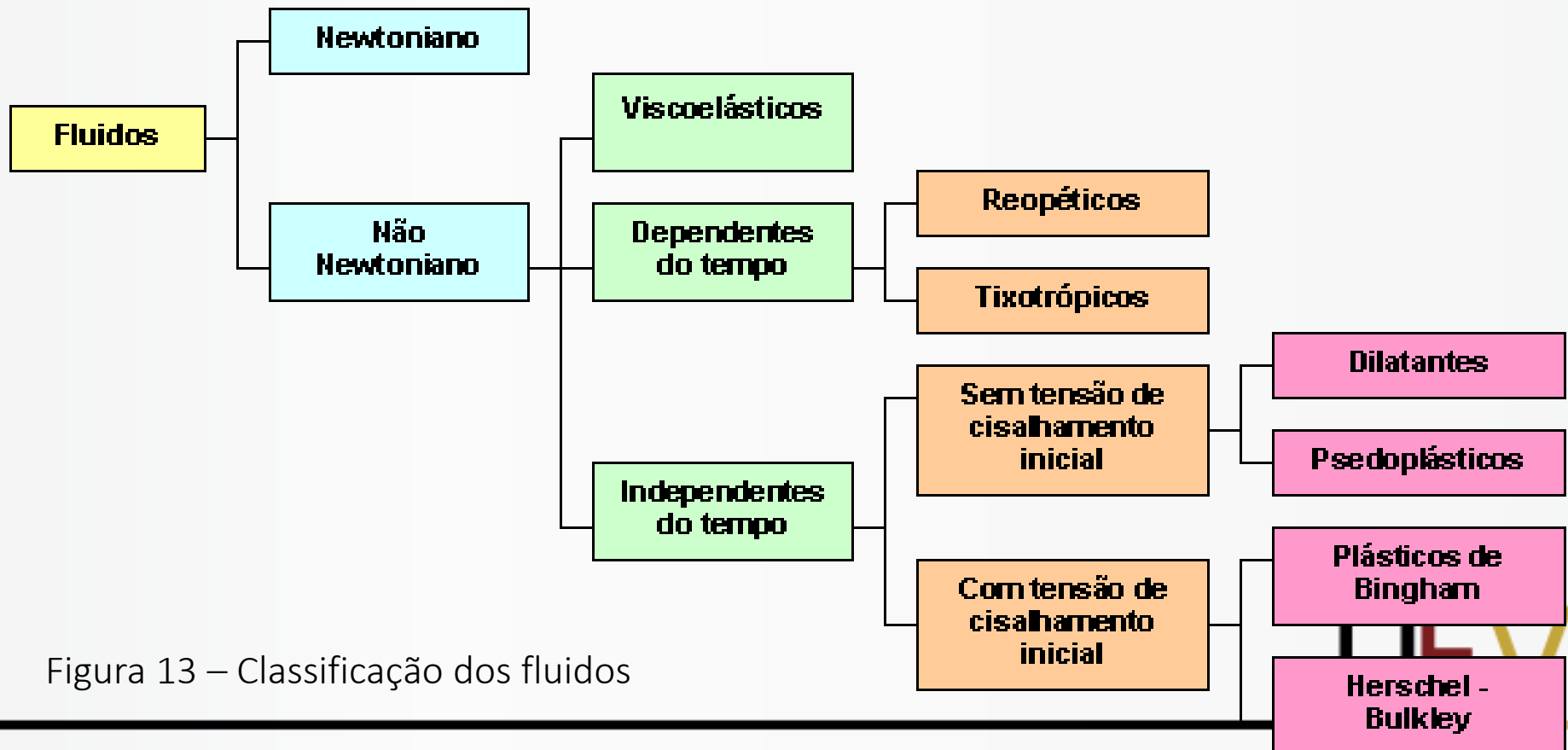


Figura 13 – Classificação dos fluidos

Exercício 2.41

Uma fita adesiva, de espessura 0,015 in e largura de 1 in, deve ser revestida em ambos os lados com cola. Para isso, ela é puxada em posição centrada através de uma ranhura retangular estreita, sobrando um espaço de 0,012 in em cada lado. A cola, de viscosidade $\mu = 0,02 \text{ slug}/(\text{ft}\cdot\text{s})$, preenche completamente os espaços entre a fita e a ranhura. Se a fita pode suportar uma força máxima de 25 lbf, determine o comprimento máximo através da ranhura até onde ela pode ser puxada a uma velocidade de 3 ft/s.

Fluidos viscosos e não viscosos

Ao jogar uma bola para o ar, a bola fica sujeita a ação da gravidade e também ao arrasto aerodinâmico (força de arrasto).

Qual a natureza da força de arrasto do ar sobre a bola?

- . O arrasto é devido ao atrito do ar escoando sobre a bola – forças viscosas;
- . O arrasto é devido ao aumento da pressão do ar na região frontal da bola – forças de pressão;

Qual contribuição é maior ? Como saber?

Número de REYNOLDS

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

Onde V e D são a velocidade e o diâmetro da bola e μ e ρ propriedades do fluido.

Se Re for grande os efeitos viscosos são desprezíveis;

Se Re for pequeno os efeitos viscosos são predominantes;

Imagine uma bola de futebol e uma partícula de poeira caindo no ar. Analise o arrasto em cada um deles. Em qual os efeitos viscosos são mais acentuados?

Escoamento não viscoso ou invíscido

Aquele em que o escoamento é sem atrito, ou seja o fluido apresenta viscosidade nula. **A velocidade das partículas é a mesma em todo o fluido.** Não há atrito viscoso. Na prática não ocorre.

Considere um objeto esférico em movimento em um fluido invíscido

Arrasto zero!

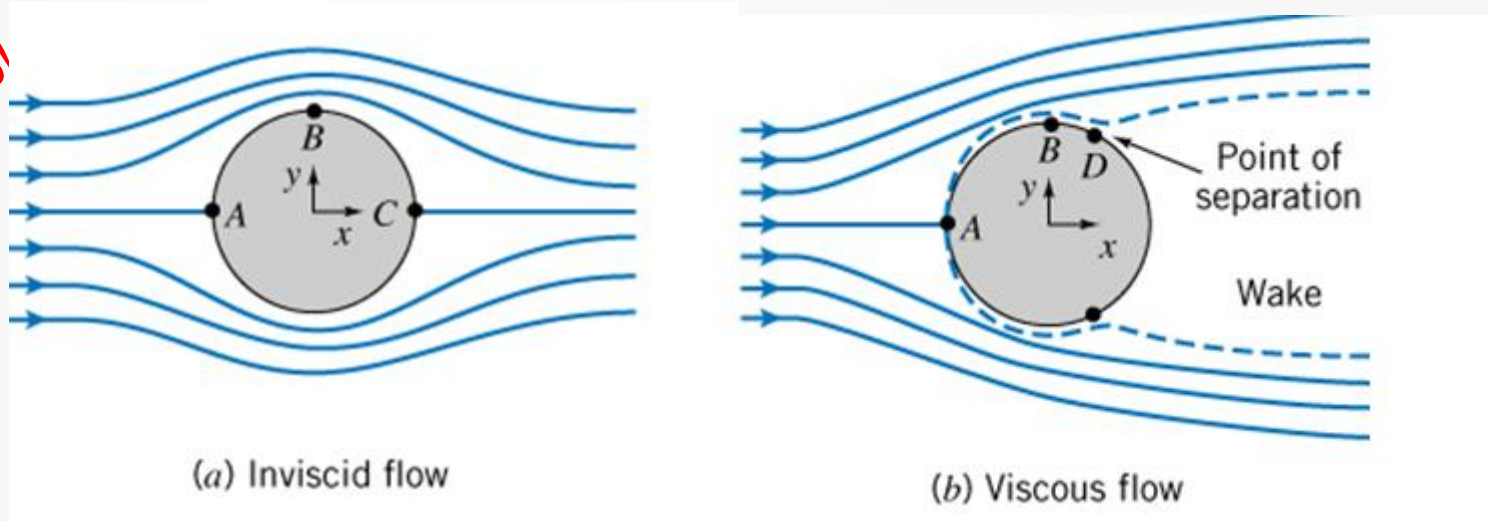


Fig. 16 – Escoamento invíscido (a) e viscoso (b).

A e C – ponto de estagnação. Velocidade nula e pressão elevada. Em (a) a distribuição de pressão sobre a bola é simétrica o que implica dizer que não existe força líquida de arrasto devido a pressão. Por ser o fluido invíscido, o objeto também não experimenta arrasto de atrito. Logo, a bola não experimenta arrasto nenhum (de pressão e de atrito!). Isto significa que uma partícula na superfície da esfera no ponto B teria uma velocidade grande, isto é, sua velocidade não seria reduzida pelo atrito (Paradoxo de d’Alambert, de 1752).

Camada limite

Introduzida por Prandtl em 1904.

Próximo a uma fronteira sempre existe uma camada limite delgada na qual o atrito é significativo, e dentro dela a velocidade aumenta rapidamente de zero (na superfície) até um valor em que o escoamento pode ser considerado invíscido (os efeitos viscosos sobre a borda externa da camada limite pode ser desprezado). Logo, na camada limite sempre existirá arrasto de atrito por menor que seja a viscosidade do fluido. Isto explica o perfil de velocidade neste camada.

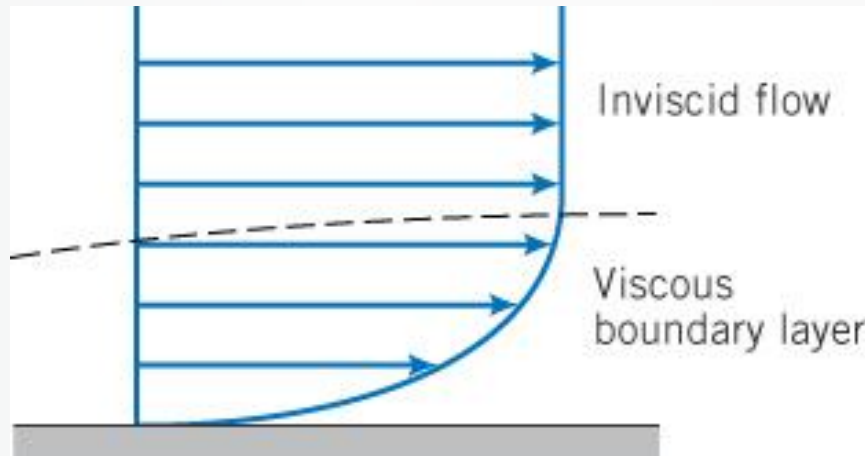
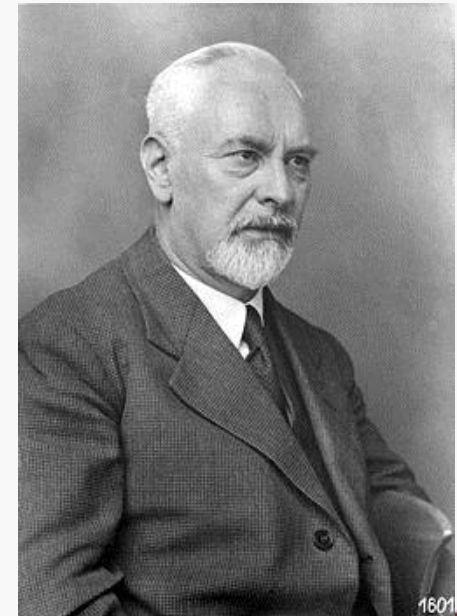
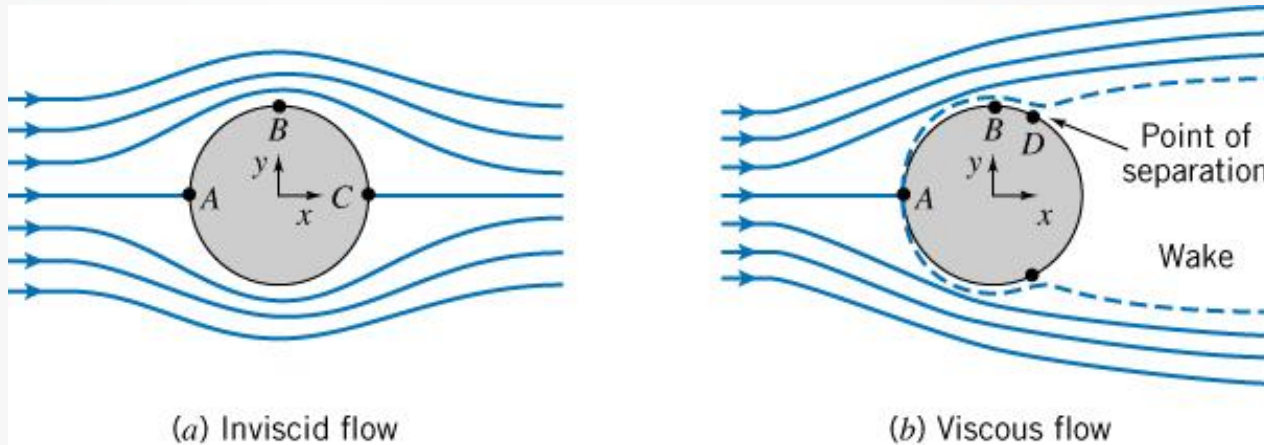


Fig 15 – Representação de uma camada limite.



Ludwig Prandtl
Físico alemão (1875 – 1953)



No escoamento viscoso, na camada limite em D (ponto de deslocamento ou de separação), as forças viscosas na camada limite (atrito) reduz a velocidade das partículas até atingirem o repouso. Estas partículas são afastadas da superfície da esfera pelas partículas seguintes, formando uma esteira.

A presença de uma esteira não é bom porque cria um gradiente de pressão adverso aumentando o arrasto de pressão.

Como reduzir o arrasto de pressão?

Adicionando à esfera uma carenagem as linhas de corrente se abrirão gradualmente. O gradiente de pressão aumentará lentamente segurando as partículas sobre uma extensão maior. A esteira será menor, fazendo com que a pressão não seja tão baixa como no caso anterior, reduzindo portanto o gradiente de pressão e conseqüentemente o arrasto de pressão.

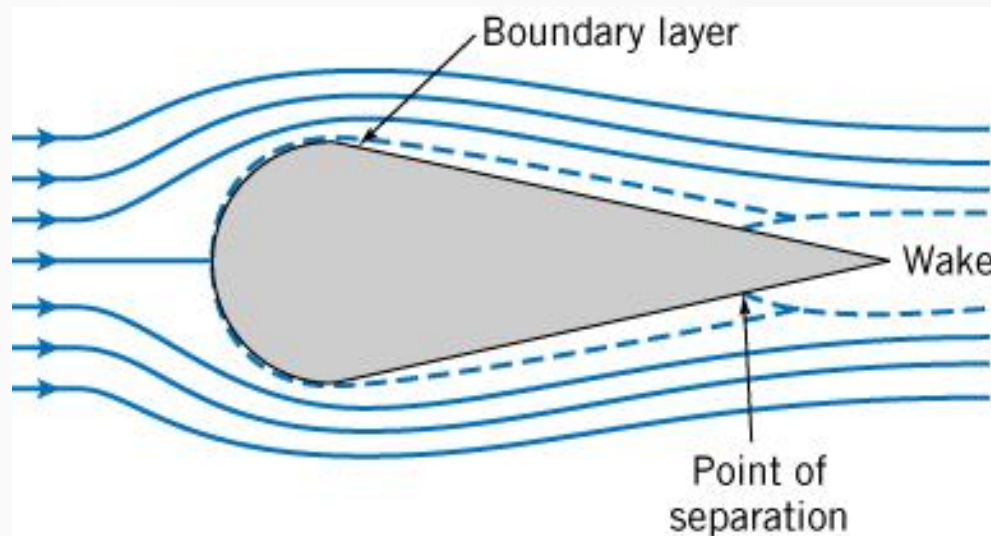


Fig. 17 – Escoamento sobre uma carenagem.

Escoamento **viscoso** laminar e turbulento

Escoamento laminar – aquele em que as partículas movem-se em camadas ou lâminas. ($Re < 2300$).

Escoamento turbulento – aquele em que as partículas, em razão de flutuações no campo de velocidade, se misturam rapidamente (movimento desordenado). Este tipo de escoamento, muito comum, apresenta maior resistência exigindo maior energia para se deslocar.

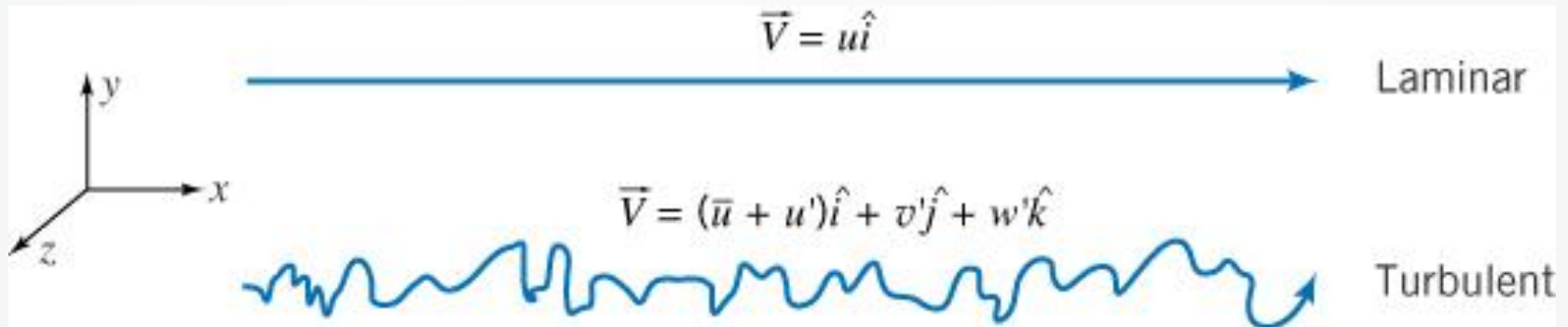


Fig. 18 – Trajetória de partículas em escoamento unidimensional laminar e turbulento.

Escoamento compressível e incompressível

Escoamento incompressível – aquele em que as variações na massa específica de um fluido em escoamento pode ser desprezada. Ex. : líquidos em escoamento.

Obs.: sob altas pressões os líquidos sofrem efeitos de compressibilidade.

Escoamento compressível – aquele em que as variações na massa específica de um fluido não podem ser desprezada. Ex.: sistemas que utilizam ar comprimido, viagem do ônibus espacial.

Número Mach

É a razão entre a velocidade do escoamento (V) e a velocidade local do som no gás (c).

$$M = \frac{V}{c}$$

Para $M < 0,3$ escoamento incompressível;

Para $M > 1$ escoamento supersônico;

Para $M < 1$ escoamento subsônico.

Escoamento interno

Aquele envolto por superfícies sólidas. Este escoamento pode ser *compressível ou incompressível, laminar ou turbulento*. Ex.: escoamento de um líquido em uma tubulação.

Escoamento externo

Escoamento sobre corpos imersos num fluido não-contido. Este escoamento pode ser *compressível ou incompressível, laminar ou turbulento*. Ex.: ar escoando sobre a asa de um avião.

Escoamento em canal aberto

Escoamento em um duto em que o mesmo não fica completamente preenchido, ou seja, verifica-se uma superfície livre no seu interior. Ex.: escoamento num aqueduto (canal aberto).

Exercício 2.81

Óleo SAE 30 a 100°C escoa através de um tubo de aço inoxidável com 12 mm de diâmetro. Qual é a gravidade específica e o peso específico de óleo?

Se o óleo descarregado do tubo enche um cilindro graduado com 100ml em 9 segundos, o escoamento é laminar ou turbulento?

Exercícios propostos – 7 ed.

Capítulo 2

32, 33, 34, 35, 36, 38, 40, 41, 42, 44, 47,
51, 52, 53, 54, 74, 80, 81

Itens excluídos: 2.5 e exemplos 2.1 e 2.3

Problema Equivalente

<u>7ed</u>	<u>6ed</u>
2.32	2.26
2.33	2.27
2.34	2.28
2.35	2.29
2.36	2.30
2.38	2.33
2.40	2,34
2.41	2.35
2.42	-
2.44	2.36
2.47	2.39
2.51	2.41
2.52	2.40
2.53	2.43
2.54	2.42
2.74	2.61
2.80	-
2.81	-