

Introdução à Mecânica dos Fluidos

Transporte de Calor e Massa

Professor: Adriano Possebon Rosa

Departamento de Engenharia Mecânica
Faculdade de Tecnologia
Universidade de Brasília

Sumário

- 1 Conceitos Iniciais
- 2 A Hipótese do Meio Contínuo
- 3 Condição de Não Escorregamento
- 4 Densidade
- 5 Tensão
- 6 Sistema e Volume de Controle
- 7 Viscosidade
 - Escoamento Entre Placas Paralelas
 - Efeito da Temperatura
 - Fluidos Newtonianos e Não Newtonianos
- 8 Classificação dos Escoamentos

A **Mecânica dos Fluidos** estuda fluidos em repouso e em movimento.

A **Mecânica dos Fluidos** pode ser dividida (ou está presente) em diferentes áreas. Algumas delas são:

- hidrodinâmica / hidráulica
- dinâmica dos gases
- aerodinâmica / aeroacústica
- meteorologia
- oceanografia
- hemodinâmica
- reologia

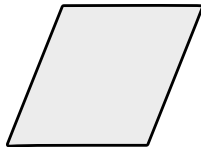
Fluidos são substâncias no estado líquido ou gasoso.

Fluido é uma substância que se deforma continuamente sob a ação de um esforço (tensão) tangencial, não importando o quão pequeno seja esse esforço. Um **sólido** também se deforma, mas não indefinidamente.

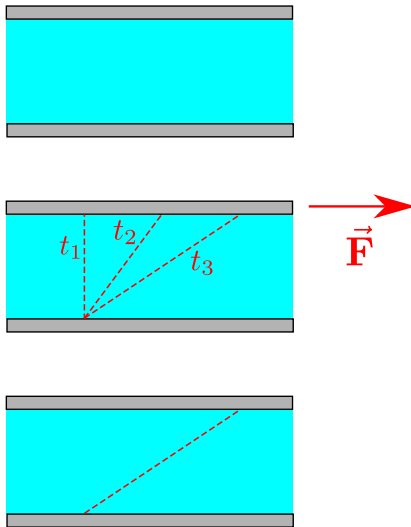
No regime elástico, o **sólido** retorna à sua configuração inicial quando a força é removida. O **fluido** não.

No estado **sólido** as moléculas estão fixas às suas vizinhas. Nos **fluidos** há uma liberdade maior, permitindo que uma camada de **fluido** possa se mover com relação a outra.

Sólido.



Fluido.



Sumário

- 1 Conceitos Iniciais
- 2 A Hipótese do Meio Contínuo
- 3 Condição de Não Escorregamento
- 4 Densidade
- 5 Tensão
- 6 Sistema e Volume de Controle
- 7 Viscosidade
 - Escoamento Entre Placas Paralelas
 - Efeito da Temperatura
 - Fluidos Newtonianos e Não Newtonianos
- 8 Classificação dos Escoamentos

Vamos tratar qualquer fluido como uma substância que pode ser dividida indefinidamente, um **contínuo**, sem nos preocuparmos com o comportamento individual de cada molécula. Assim, qualquer propriedade do fluido (densidade ρ , temperatura T , velocidade \vec{V} , etc.) tem valor definido em cada ponto do espaço, podendo ser tratada como uma função matemática.

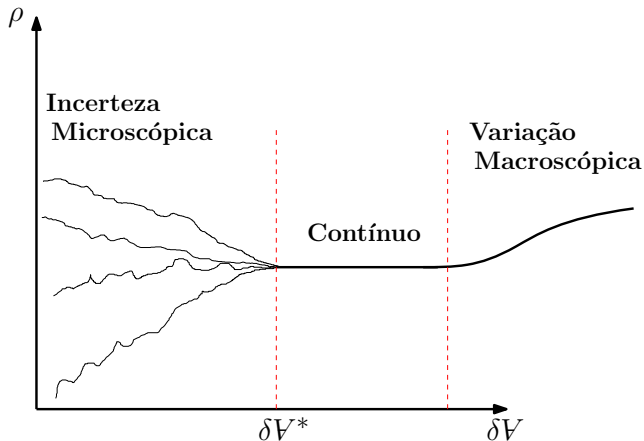
Observação: aqui na parte de fluidos vamos usar a letra V para velocidade e \mathcal{V} para volume.

$V \rightarrow$ **Velocidade**

$\mathcal{V} \rightarrow$ **Volume**

Exemplo: densidade ρ .

$$\rho = \lim_{\delta V \rightarrow \delta V^*} \frac{\delta m}{\delta V} \quad (1)$$



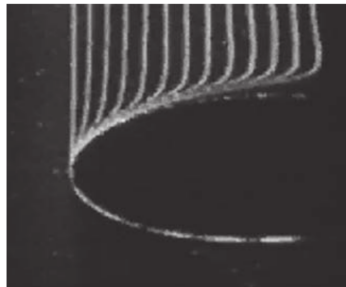
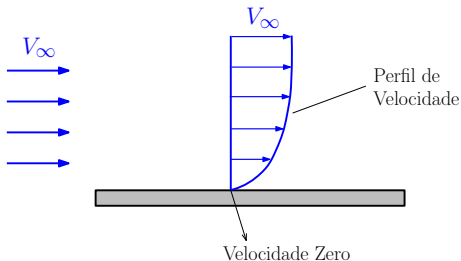
Para o ar, um volume $\delta V = 10^{-9} \text{ mm}^3$ contém 3×10^7 moléculas, o suficiente para definir uma média.

A hipótese do meio contínuo não é válida para gases rarefeitos, com grande espaçamento molecular.

Sumário

- 1 Conceitos Iniciais
- 2 A Hipótese do Meio Contínuo
- 3 **Condição de Não Escorregamento**
- 4 Densidade
- 5 Tensão
- 6 Sistema e Volume de Controle
- 7 Viscosidade
 - Escoamento Entre Placas Paralelas
 - Efeito da Temperatura
 - Fluidos Newtonianos e Não Newtonianos
- 8 Classificação dos Escoamentos

Todas as observações experimentais indicam que um fluido em movimento para completamente em uma superfície sólida e assume velocidade zero (nula) em relação a essa superfície.



Condição de contorno de velocidade para o fluido:

$$\vec{V}_{fluido} = \vec{V}_{parede} \quad (2)$$

Sumário

- 1 Conceitos Iniciais
- 2 A Hipótese do Meio Contínuo
- 3 Condição de Não Escorregamento
- 4 Densidade**
- 5 Tensão
- 6 Sistema e Volume de Controle
- 7 Viscosidade
 - Escoamento Entre Placas Paralelas
 - Efeito da Temperatura
 - Fluidos Newtonianos e Não Newtonianos
- 8 Classificação dos Escoamentos

A **densidade** ρ é definida com sendo a massa do fluido por unidade de volume.

$$[\rho] = kg/m^3$$

Volume específico é o inverso da densidade, ρ^{-1} .

A densidade dos gases é muito variável.

Equação de estado dos Gases Ideais:

$$P = \rho RT \quad (3)$$

Em que P é a pressão absoluta, ρ é a densidade, T é a temperatura e R é a constante do gás.

A densidade dos líquidos, em uma determinada temperatura, é praticamente constante.

Água no estado líquido: se a pressão vai de 1 atm a 210 atm , então a densidade muda 1% .

No ar atmosférico, se a pressão muda $0,01 \text{ atm}$, então a densidade muda 1% .

Exemplos (20°C , 1 atm):

- água: $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$
- ar: $\rho = 1,20 \text{ kg/m}^3$
- mercúrio (fluido mais denso): $\rho = 13590 \text{ kg/m}^3$
- hidrogênio (fluido menos denso): $\rho = 0,0838 \text{ kg/m}^3$

Densidade relativa, d , é definida como a razão entre a densidade de uma substância e a densidade de alguma substância padrão a uma temperatura especificada (usualmente água a 4°C , para a qual $\rho_{\text{água}} = 1000 \text{ kg/m}^3$).

$$d = \frac{\rho}{\rho_{\text{água}}} \quad (4)$$

O peso de uma unidade de volume de uma substância é chamado de **peso específico**, γ , definido como $\gamma = \rho g$.

Exemplos:

- água:

$$\gamma = \left(998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \times \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = 9790 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

- ar:

$$\gamma = \left(1,20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \times \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = 11,8 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

Observação: alguns autores chamam de **massa específica** a razão entre a massa e o volume.

Sumário

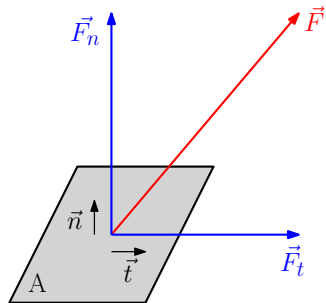
- 1 Conceitos Iniciais
- 2 A Hipótese do Meio Contínuo
- 3 Condição de Não Escorregamento
- 4 Densidade
- 5 Tensão**
- 6 Sistema e Volume de Controle
- 7 Viscosidade
 - Escoamento Entre Placas Paralelas
 - Efeito da Temperatura
 - Fluidos Newtonianos e Não Newtonianos
- 8 Classificação dos Escoamentos

Tensão é força por unidade de área.

$$\vec{F} = F_n \vec{n} + F_t \vec{t}$$

$$\sigma = \frac{F_n}{A} \quad \rightarrow \quad \text{Tensão Normal}$$

$$\tau = \frac{F_t}{A} \quad \rightarrow \quad \text{Tensão Tangencial ou de Cisalhamento}$$



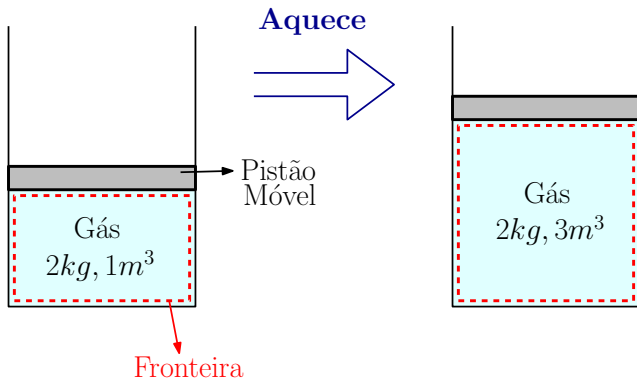
Fluido em repouso: a tensão normal é chamada de **pressão**.

Sumário

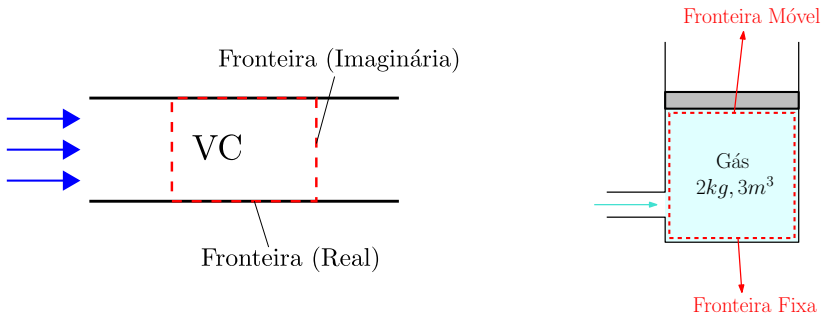
- 1 Conceitos Iniciais
- 2 A Hipótese do Meio Contínuo
- 3 Condição de Não Escorregamento
- 4 Densidade
- 5 Tensão
- 6 Sistema e Volume de Controle**
- 7 Viscosidade
 - Escoamento Entre Placas Paralelas
 - Efeito da Temperatura
 - Fluidos Newtonianos e Não Newtonianos
- 8 Classificação dos Escoamentos

Duas maneiras diferentes de analisar problemas. Na Mecânica dos Fluidos geralmente utilizamos Volume de Controle.

Sistema: quantidade fixa de massa. Nenhuma quantidade de massa pode cruzar a fronteira. Mas energia pode cruzar a fronteira por meio de trabalho ou calor.



Volume de Controle: volume selecionado no espaço, de acordo com o problema. Tanto massa quanto energia podem cruzar a fronteira do Volume de Controle. Qualquer região arbitrária no espaço pode ser selecionada como um Volume de Controle.



Obs.: **vizinhança** é a região fora do sistema (ou volume de controle). A superfície, real ou imaginária, que separa o sistema (ou volume de controle) de sua vizinhança é chamada de **fronteira**.

Sumário

- 1 Conceitos Iniciais
- 2 A Hipótese do Meio Contínuo
- 3 Condição de Não Escorregamento
- 4 Densidade
- 5 Tensão
- 6 Sistema e Volume de Controle
- 7 Viscosidade**
 - Escoamento Entre Placas Paralelas
 - Efeito da Temperatura
 - Fluidos Newtonianos e Não Newtonianos
- 8 Classificação dos Escoamentos

Quando duas camadas de fluido movem-se uma em relação à outra, desenvolve-se uma força de atrito entre elas, e a camada mais lenta tenta reduzir a velocidade da camada mais rápida.

Tal resistência interna ao movimento (escoamento) é quantificada pela propriedade do fluido chamada **viscosidade**.

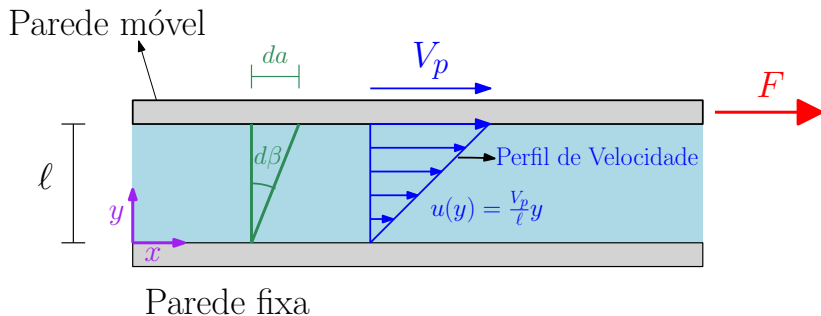
A viscosidade tem origem nas forças coesivas entre as moléculas em um líquido e nas colisões moleculares em um gás.

A viscosidade é uma medida da resistência do fluido ao escoamento. É uma medida da “fluidez”.

Sumário

- 1 Conceitos Iniciais
- 2 A Hipótese do Meio Contínuo
- 3 Condição de Não Escorregamento
- 4 Densidade
- 5 Tensão
- 6 Sistema e Volume de Controle
- 7 Viscosidade
 - **Escoamento Entre Placas Paralelas**
 - Efeito da Temperatura
 - Fluidos Newtonianos e Não Newtonianos
- 8 Classificação dos Escoamentos

Considere um fluido entre duas placas paralelas. Vamos usar esse escoamento para definir a viscosidade.



F é a força aplicada na placa superior; V_p é a velocidade da placa superior; ℓ é o espaçamento entre as placas; $d\beta$ é a deformação em um intervalo de tempo dt ; da é o deslocamento da placa superior durante dt ($da = V_p dt$).

Deformação de um corpo é qualquer mudança na configuração geométrica do corpo que leve a uma variação de suas formas ou dimensões.

Queremos determinar a força F em função dos outros parâmetros.

$$F = ??? \quad (5)$$

$$F \propto A \frac{V_p}{\ell} \quad (6)$$

$$F = \mu A \frac{V_p}{\ell} \quad (7)$$

Velocidade, no caso mais geral:

$$\vec{V} = u(x, y, z, t)\hat{i} + v(x, y, z, t)\hat{j} + w(x, y, z, t)\hat{k} \quad (8)$$

No presente caso:

$$\vec{V} = u(y)\hat{i} + 0\hat{j} + 0\hat{k} \quad (9)$$

Em um escoamento laminar estacionário, o perfil de velocidade é linear:

$$u(y) = C_1 y + C_2 \quad (10)$$

As condições de contorno são as condições de não escorregamento:

$$\begin{cases} u(y = 0) = 0 \\ u(y = \ell) = V_p \end{cases} \quad (11)$$

Resulta:

$$u(y) = \frac{V_p}{\ell} y \quad (12)$$

Esse é o perfil de velocidade, ou seja, o comportamento da velocidade ao longo de y .

O gradiente de velocidade (variação da velocidade no espaço) é dado por

$$\frac{du}{dy} = \frac{V_p}{\ell} \quad (13)$$

Voltando na figura, a deformação (deslocamento angular) $d\beta$ é dada por

$$d\beta \approx \tan d\beta = \frac{da}{\ell} = \frac{V_p}{\ell} dt \quad (14)$$

Ou seja

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{V_p}{\ell} \quad (15)$$

Mas nós vimos que

$$\frac{V_p}{\ell} = \frac{du}{dy} \quad (16)$$

Assim:

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (17)$$

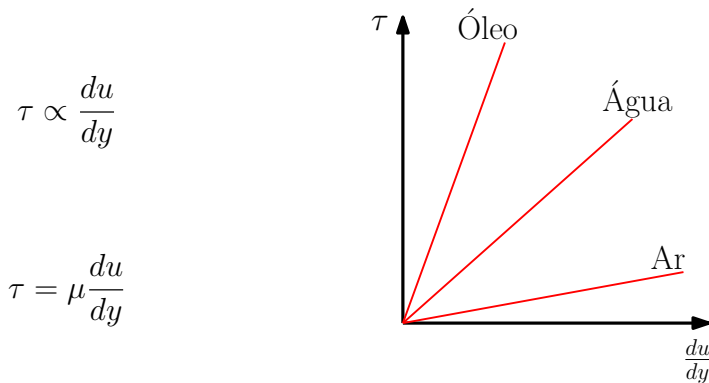
$d\beta/dt$ é chamado de **taxa de deformação** (é a deformação por unidade de tempo), e comumente representado por $\dot{\gamma}$.

Temos, portanto,

$$\dot{\gamma} = \frac{d\beta}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (18)$$

Conclusão: a taxa de deformação de um elemento do fluido é equivalente ao gradiente de velocidade du/dy .

Lei da Viscosidade de Newton: a tensão de cisalhamento é linearmente proporcional à taxa de deformação.



O coeficiente de proporcionalidade é a viscosidade μ , que é uma propriedade do fluido em questão.

Mas

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \text{e} \quad \frac{du}{dy} = \frac{V_p}{\ell} \quad (19)$$

Assim:

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{V_p}{\ell} \quad (20)$$

Resulta:

$$F = \frac{\mu A V_p}{\ell} \quad (21)$$

Essa é a força necessária para manter a placa superior a uma velocidade V_p .

$$\mu = \frac{F\ell}{AV_p} \quad (22)$$

μ é a viscosidade dinâmica ou absoluta. Chamaremos apenas de viscosidade.

$$[\mu] = \frac{kg}{m.s} = Pa.s = 1000 cP \quad (23)$$

Frequentemente no estudo da Mecânica dos Fluidos aparece a razão μ/ρ . Essa razão será chamada de **viscosidade cinemática** e será representada pela letra ν .

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (24)$$

$$[\nu] = \frac{m^2}{s} \quad (25)$$

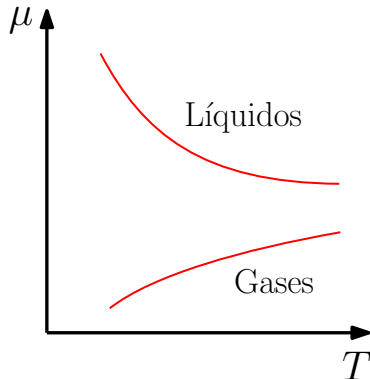
Exemplos (1 atm , 20°C):

| Fluido | $\mu \text{ (kg/(m.s))}$ | $\mu \text{ (cP)}$ | $\nu \text{ (m}^2\text{/s)}$ |
|-------------|--------------------------|----------------------|------------------------------|
| Hidrogênio | $8,8 \times 10^{-6}$ | $8,8 \times 10^{-3}$ | $1,5 \times 10^{-4}$ |
| Ar | $1,8 \times 10^{-5}$ | $1,8 \times 10^{-2}$ | $1,51 \times 10^{-5}$ |
| Água | $1,0 \times 10^{-3}$ | 1,0 | $1,01 \times 10^{-6}$ |
| Óleo SAE 30 | 0,29 | 290 | $3,25 \times 10^{-4}$ |
| Glicerina | 1,5 | 1500 | $1,18 \times 10^{-3}$ |

Sumário

- 1 Conceitos Iniciais
- 2 A Hipótese do Meio Contínuo
- 3 Condição de Não Escorregamento
- 4 Densidade
- 5 Tensão
- 6 Sistema e Volume de Controle
- 7 Viscosidade
 - Escoamento Entre Placas Paralelas
 - **Efeito da Temperatura**
 - Fluidos Newtonianos e Não Newtonianos
- 8 Classificação dos Escoamentos

A viscosidade de um líquido diminui com a temperatura, enquanto a viscosidade de um gás aumenta. Por quê?



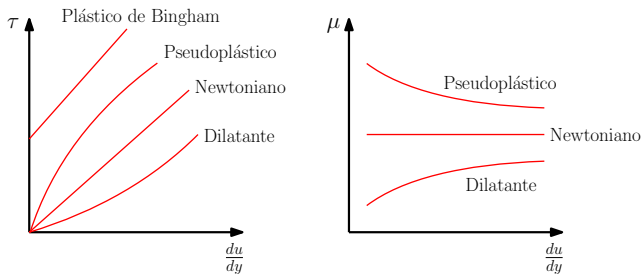
A pressão não interfere significativamente na viscosidade de um fluido.

Sumário

- 1 Conceitos Iniciais
- 2 A Hipótese do Meio Contínuo
- 3 Condição de Não Escorregamento
- 4 Densidade
- 5 Tensão
- 6 Sistema e Volume de Controle
- 7 Viscosidade
 - Escoamento Entre Placas Paralelas
 - Efeito da Temperatura
 - Fluidos Newtonianos e Não Newtonianos
- 8 Classificação dos Escoamentos

Fluidos Newtonianos: μ não varia com a taxa de deformação. Exemplos: água, ar, querosene, gasolina, óleo.

Fluidos Não Newtonianos: μ varia com a taxa de deformação. τ não é linear com du/dy . Exemplos: tinta, creme dental, areia movediça, sangue.



Aqui vamos estudar o comportamento de **Fluidos Newtonianos**. **Fluidos Não Newtonianos** são estudados em uma disciplina chamada **reologia**.

Sumário

- 1 Conceitos Iniciais
- 2 A Hipótese do Meio Contínuo
- 3 Condição de Não Escorregamento
- 4 Densidade
- 5 Tensão
- 6 Sistema e Volume de Controle
- 7 Viscosidade
 - Escoamento Entre Placas Paralelas
 - Efeito da Temperatura
 - Fluidos Newtonianos e Não Newtonianos
- 8 Classificação dos Escoamentos

Há uma grande variedade de problemas de escoamento de fluidos encontrados na prática. É conveniente classificá-los com base em algumas características comuns para estudá-los em grupos.

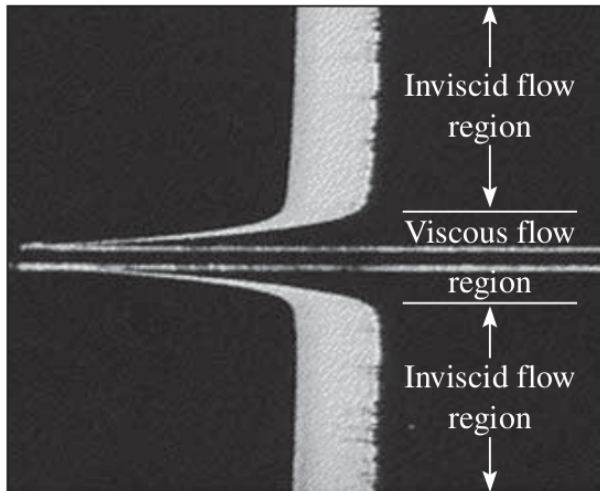
i) **Viscoso X Invíscido**

Não existe fluido com viscosidade nula. Todo escoamento envolve efeitos viscosos.

No entanto em algumas regiões do escoamento os efeitos viscosos são desprezíveis quando comparados às forças inerciais e de pressão.

Escoamento Viscoso: aquele em que os efeitos viscosos (resistência interna, atrito entre camadas de fluido) são significativos.

Escoamento Invíscido: aquele em que os efeitos viscosos são muito pequenos. Nesse caso, os termos viscosos são desprezados.

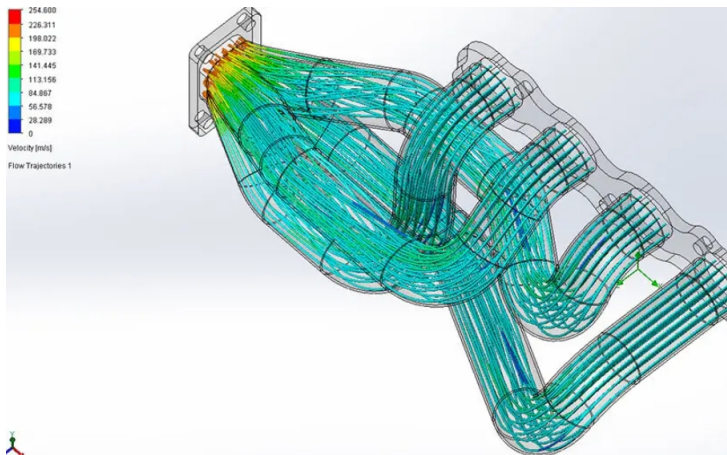


ii) Interno X Externo

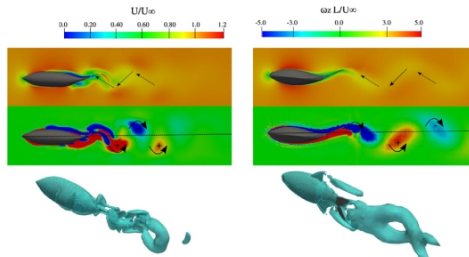
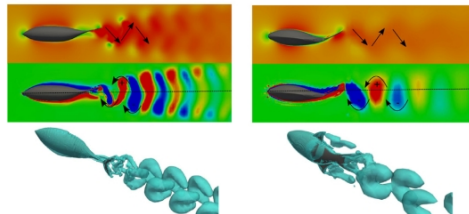
O **escoamento interno** é aquele em que o fluido está confinado por superfícies sólidas. Exemplo: escoamento em um tubo.

O **escoamento externo** é aquele em que o fluido envolve a superfície sólida, ou seja, passa em torno dela. Exemplos: escoamento do ar em torno de um carro ou de um avião.

Escoamento Interno.



Escoamento Externo.

(a) $St = 0.201$; $Re = 7 \times 10^5$ (b) $St = 0.2$; $Re = 9 \times 10^4$ (c) $St = 0.413$; $Re = 7 \times 10^5$ (d) $St = 0.4$; $Re = 9 \times 10^4$

iii) Compressível X Incompressível

Um escoamento é denominado **incompressível** quando a densidade permanece constante em todos os lugares.

Portanto o volume de cada porção do fluido permanece inalterado durante o movimento, no caso de um escoamento incompressível.

Líquidos são considerados incompressíveis.

Gases podem ser considerados incompressíveis para $Ma < 0,3$, em que

$$Ma = \frac{V}{c} \quad (26)$$

é o número de Mach, com V sendo a velocidade do escoamento e c a velocidade do som no meio (346 m/s no ar).

iv) Laminar X Turbulento

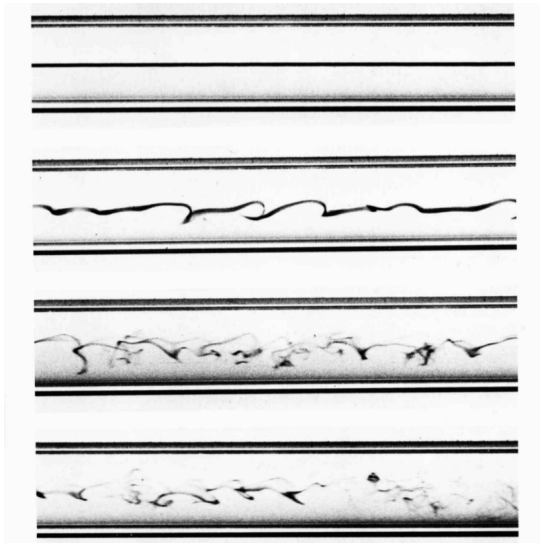
Escoamento Laminar: escoamento altamente ordenado, com camadas (lâminas) suaves de fluido. Ocorre para baixas velocidades.

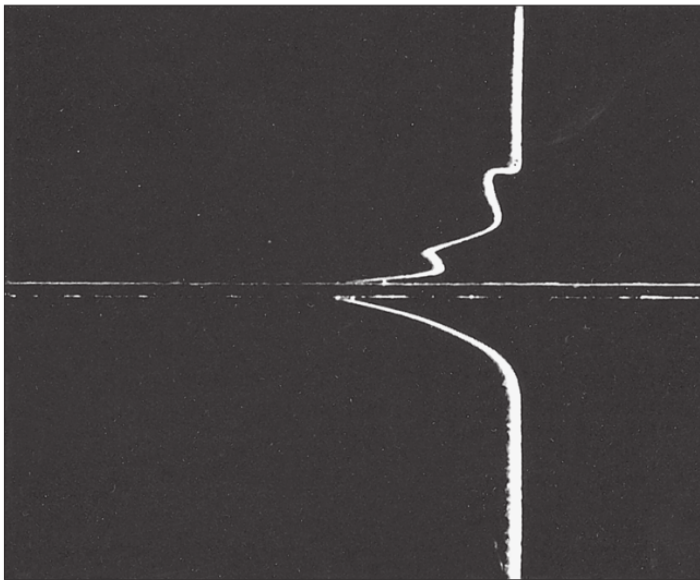
Escoamento Turbulento: escoamento altamente desordenado, com flutuações de velocidade e de pressão.

Em um tubo, por exemplo, o escoamento é laminar se $Re < 2300$ e turbulento de $Re > 4000$, em que

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (27)$$

é o **número de Reynolds**, V é a velocidade e D é o diâmetro do tubo. Para escoamentos com $2300 < Re < 4000$ o escoamento é de transição (ora laminar, ora turbulento).





v) **Natural X Forçado**

No **escoamento forçado** o fluido é impelido a se movimentar com o uso de uma bomba ou de um ventilador, por exemplo.

No **escoamento natural** movimento causado pelo aquecimento do fluido, que se manifesta pela elevação do fluido mais quente e pela descida do fluido mais frio.

vi) Permanente X Transiente

Escoamento permanente é aquele em que não há mudanças com o passar do tempo.

vii) Uni X Bi X Tridimensional

Um escoamento é uni, bi ou tridimensional se a velocidade do escoamento varia em uma, duas ou três dimensões.