



Fenômeno de Transportes A

PROF^ª. PRISCILA ALVES

PRISCILA@DEMAR.EEL.USP.BR

Proposta do Curso

Programa

Introdução: conceito de fluido; propriedades e conceito de contínuo; modelagem de processos de transferência; métodos de análise; dimensões e unidades.

Revisão de estática de fluidos: equação básica da hidrostática, variação de pressão em um fluido estático; princípios de Stevin, de Pascal e de Arquimedes.

Formulação integral das equações de transporte: teorema de transporte de Reynolds; aplicação para os princípios de conservação de massa, quantidade de movimento e energia; equação de Bernoulli.

Formulação diferencial das equações de transporte: descrição do escoamento; forma diferencial: dos princípios de conservação de massa, quantidade de movimento e energia; formulação adimensional, análise dimensional e semelhança. Grupos adimensionais: número de Reynolds e número de Grashoff.

Escoamento incompressível interno: equações de Euler; lei de Newton para a viscosidade, tensões de cisalhamento; equação de Navier-Stokes; regimes de escoamento: escoamento laminar e turbulento. Cálculo de perda de carga (distribuída e localizada), coeficiente de atrito.

Escoamento incompressível externo: introdução à camada limite; escoamento ao redor de corpos, força da arraste.

Critérios de Avaliação e Recuperação

Avaliação

Método

Aulas expositivas, seminários e exercícios comentados.

Critério

Média aritmética de duas provas sendo a primeira com peso 1 e a segunda com peso 2.

Norma de Recuperação

Aplicação de uma prova escrita dentro do prazo regimental antes do início do próximo semestre letivo. A nota da segunda avaliação será a média aritmética entre a nota da prova de recuperação e a nota final da primeira avaliação

Outras atividades avaliativas

- ▶ Atividades experimentais:
 - ▶ Será desenvolvida no laboratório de engenharia química da Área 2, cuja forma de avaliação será um relatório que entrará na composição da prova.
 - ▶ Criação de demonstração de diferentes fenômenos relacionado aos temas da aula
 - ▶ Será proposto temas e os grupos apresentarão ao término do curso o experimento, além de um roteiro de como o experimento foi feito, materiais, objetivo e conclusão.

Referências Bibliográfica

- ▶ Mecânica dos fluidos. Franco Brunetti.
- ▶ Introdução a mecânica dos fluidos. Robert W. Fox
- ▶ Fenômeno de transporte: R. Byron Bird, W. E. Stewart e E.D. LightFoot

Horário de atendimento aos
alunos:

Quinta: 16 h as 18 h (área 2)

Planejamento da aulas

1. Apresentação do curso. Comportamento e propriedades do fluido.
2. Hidrostática: Pressão, Pascal, Arquimedes, Stevin, equações manométricas e lei geral dos gases.
3. Análise dimensional e unidades.
4. Hidrodinâmica: Equação do movimento (conservação da energia mecânica). Conservação da massa e da quantidade de movimento.
5. escoamento incompressível externo e interno.
6. Formulação integral e diferencial das leis de conservação.

O que são fluidos?

- ▶ Os fluidos são formados por moléculas em constante movimento e com ocorrência de colisões entre elas.
- ▶ No entanto estudaremos o movimento **das partículas do fluido** (manifestações médias mesuráveis de um conjunto de moléculas) e não o movimento das moléculas do fluido.

Campo de escoamento


- ▶ CAMPO DE ESCOAMENTO é uma distribuição contínua de quantidade escalares, vetoriais ou tensoriais descritas por funções contínuas em coordenadas espaciais e temporais.

Descrição Euleriana ou Espacial

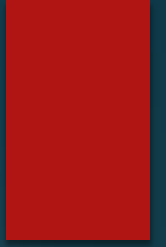
- ▶ Consiste em um método para analisar o movimento dos fluidos fazendo uma descrição completa dos seus parâmetros (massa específica, pressão, velocidade) em função das coordenadas espaciais e do tempo.
- ▶ Desta forma obtém-se informações do escoamento em função do que acontece em pontos fixos do espaço enquanto as partículas de fluido escoam por estes pontos.

Descrição Lagrangiana

- ▶ Este método consiste no qual as partículas de fluidos são rotuladas (identificadas) e suas propriedades são determinadas acompanhado seu movimento.
- ▶ Neste caso estuda-se a posição de uma ou várias partículas em função do tempo.

- 
- ▶ Em nosso curso faremos a abordagem dos dois métodos.
 - ▶ Começaremos com a Euleriana, para o caso mais geral. Terminando com a Lagrangiana para a análise diferencial e integral do comportamento do fluido.

Análise geral do comportamento do fluido



“Tipos” de escoamento

- ▶ Em mecânica dos fluidos a classificação de um fluido pode ser dada quanto ao “tipo” do fluido, dependência temporal e espacial, segundo a superfície onde escoar, segundo a seção do escoamento e segundo a compressibilidade do fluido.

“Tipo” de fluidos

```
graph TD; A["'Tipo' de fluidos"] --> B["Fluido Viscoso"]; A --> C["Fluido não Viscoso"]; B --> D["escoamento laminar"]; B --> E["escoamento Externo"];
```

Fluido Viscoso

Fluido não Viscoso

escoamento laminar

escoamento Externo

Dependência Temporal

```
graph TD; A[Dependência Temporal] --> B[Escoamento Permanente ou Estacionário]; A --> C[Escoamento não Permanente];
```

Escoamento
Permanente ou
Estacionário

Escoamento
não
Permanente

**Dependência
Espacial**

Escoamento
1-D, 2-D e 3-D


```
graph TD; A[Superfície] --- B[Escoamento Interno]; A --- C[Escoamento Turbulento];
```

Superfície

Escoamento
Interno

Escoamento
Turbulento

```
graph TD; A[Escoamento numa Seção] --> B[Escoamento Uniforme]; A --> C[Escoamento Não Uniforme];
```

**Escoamento
numa Seção**

Escoamento
Uniforme

Escoamento
Não
Uniforme

```
graph TD; A[compressibilidade] --> B[Escoamento Compressível]; A --> C[Escoamento Incompressível];
```

compressibilidade

Escoamento
Compressível

Escoamento
Incompressível

Escoamento uniforme

- ▶ Quando a velocidade não sofre nenhum tipo de alteração na sua direção, sentido e módulo durante o intervalo de tempo analisado.

Escoamento estacionário ou permanente

- ▶ Um escoamento é denominado estacionário ou permanente quando as propriedades do fluido (velocidade, pressão e também a seção transversal) não variam com o tempo.

Linhas de Corrente e Tubo de Corrente

- ▶ A forma do escoamento é feito desenhando linhas de mesma velocidade – contornos de velocidade. Essas linhas são conhecidas como LINHAS DE CORRENTES.
- ▶ Estas linhas são tangentes ao vetor velocidade em cada ponto (Figura 1a - b).

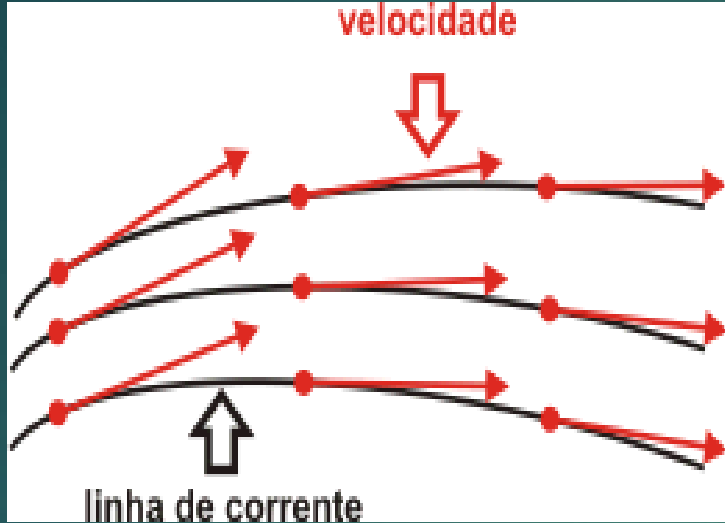


Figura 1a.

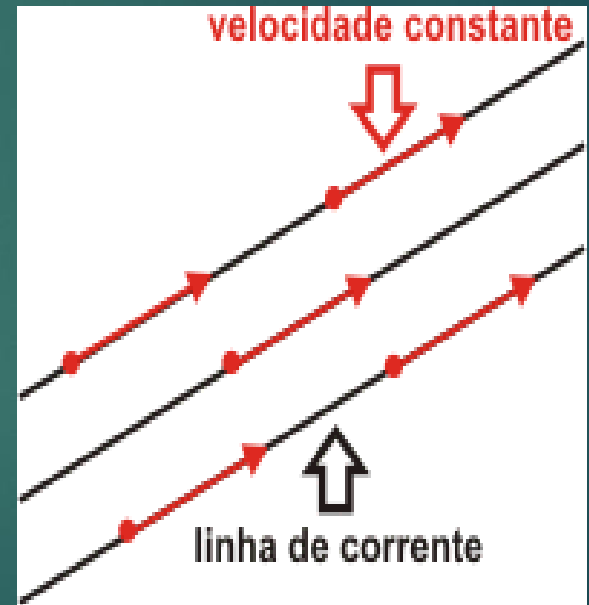


Figura 1b.

- ▶ Próximas das fronteiras sólidas as linhas de correntes são paralelas aquela fronteira (Figura 2).

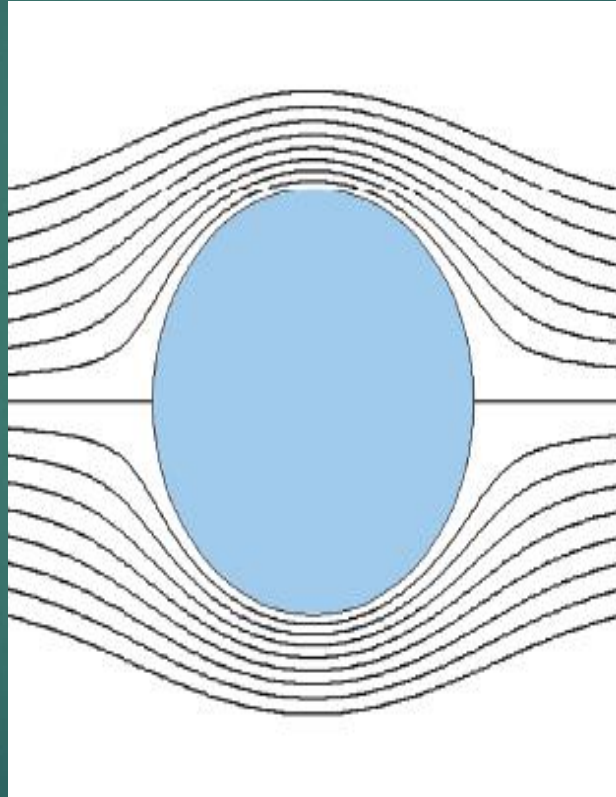


Figura 2

Tubo de Corrente

- ▶ Consiste em uma técnica utilizada para analisar o escoamento de fluidos isolando uma parte do fluido (Figura 3).

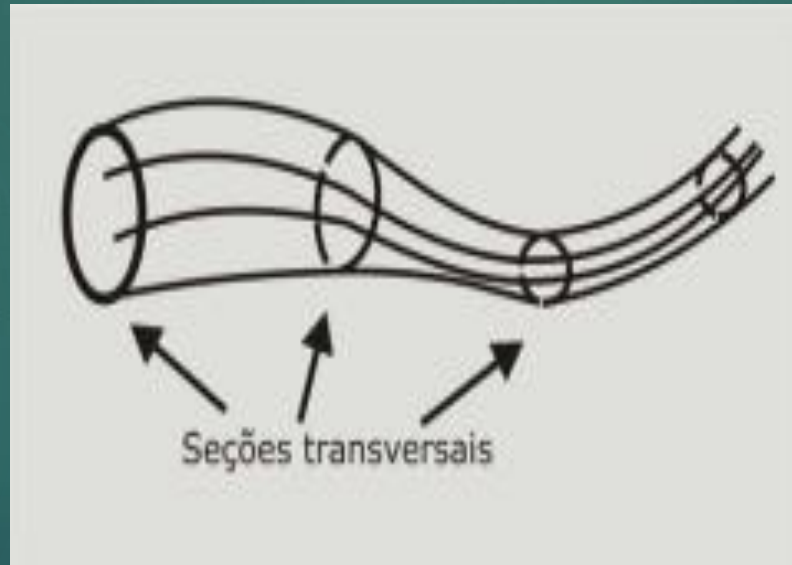



Figura 3



Escoamento Compressível e Incompressível

- ▶ INCOMPRESSÍVEIS: São escoamentos em que as variações da massa são desprezíveis.
- ▶ COMPRESSÍVEIS: Quando existem variações da massa específica que não são desprezíveis.



▶ Os gases com transferência de calor desprezível podem ser considerados incompressíveis quando a velocidade é pequena comparada com a velocidade do som. A relação entre a velocidade do fluido e a velocidade do som é denominado de NÚMERO DE MACH (M).

▶ $M = \frac{V}{v}$ onde $V =$ velocidade do escoamento e v a velocidade do som.
Quando $M < 0,3$ considera-se o escoamento como incompressível.


Escoamento Uni, Bi e Tridimensional



Figura 4: Escoamento 2-D irrotacional.



Figura 5: Escoamento 2-D Rotacional.

- 
- ▶ Embora em geral todos os fluidos escoem de forma tridimensional, com pressões e velocidades e outras propriedades de fluxo variando em todas as direções, em muitos casos as maiores mudanças ocorrem unicamente em duas direções ou até mesmo numa única direção.

Escoamento não estacionário (2-D)



Figura 6



Figura 7

Escoamento Viscoso e não Viscoso

- ▶ Num **fluido real** (FLUIDO VISCOSO) são geradas forças viscosas dependentes da viscosidade do fluido e da variação da velocidade numa determinada seção transversal, denominada *gradiente de velocidade*. Em uma tubulação com um fluido real a velocidade é zero nas paredes do tubo e máxima no centro (Figura 8).

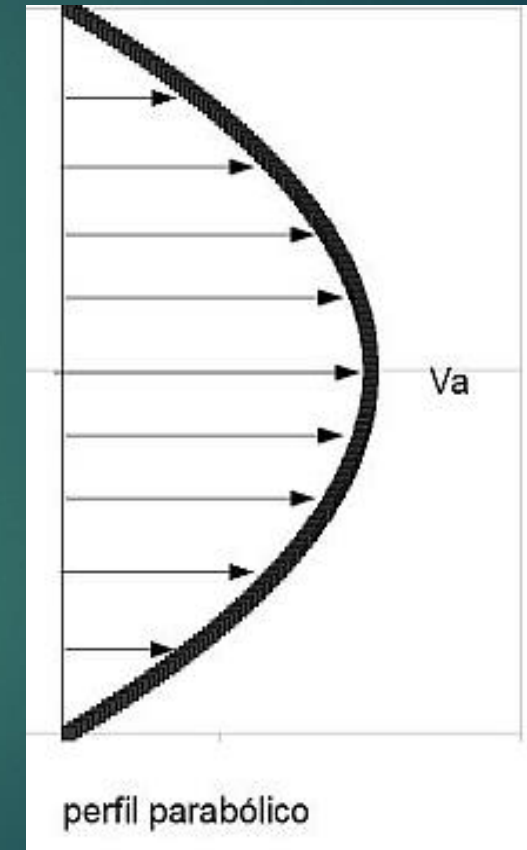


Figura 8

- ▶ Num fluido ideal (NÃO VISCOSO) o perfil da velocidade é uniforme e as tensões de cisalhamento são nulas já que não existe variação da velocidade (gradiente de velocidade nulo).

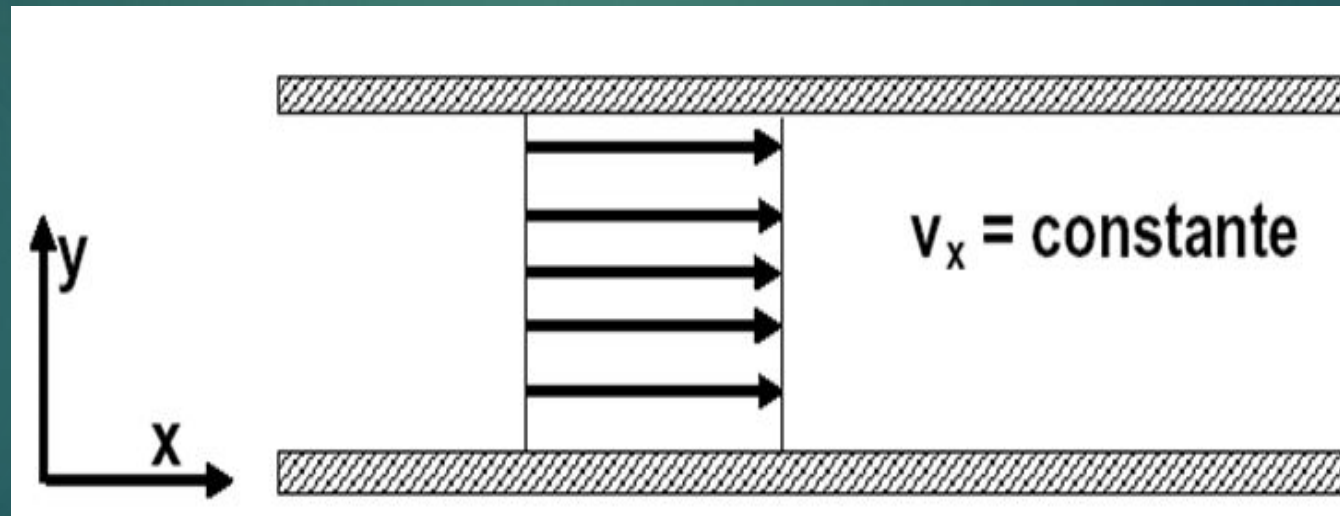
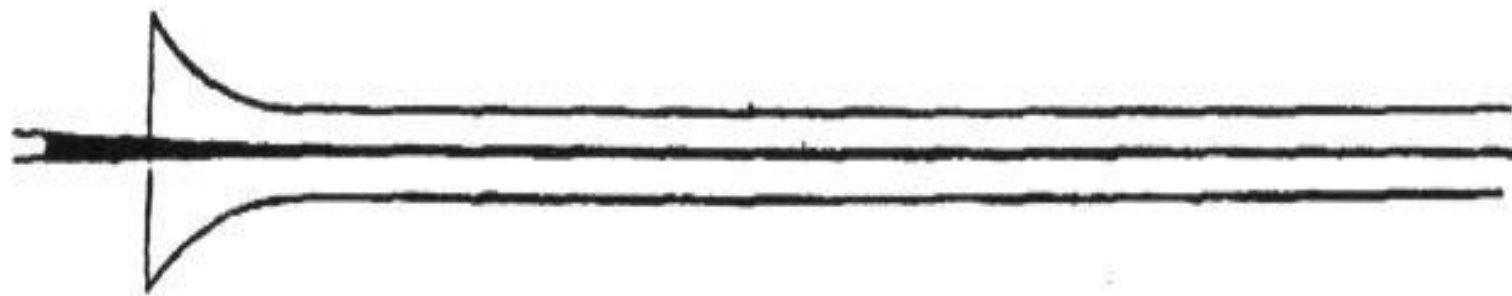


Figura 9

Escoamento Laminar e Turbulento

- ▶ Osborne Reynolds realizou experiências que permitiram visualizar os diferentes regimes de escoamento numa tubulação, a partir da regulagem da vazão.
- ▶ Vazão “baixa” o fluido se comporta como uma lâmina sem perturbações, sendo o escoamento denominado de *laminar* (Figura 10)



Fluxo laminar

Figura 10

- ▶ Para “grandes” vazões o líquido mostra-se com flutuações aleatórias típicas de um escoamento *turbulento* (Figura 11)

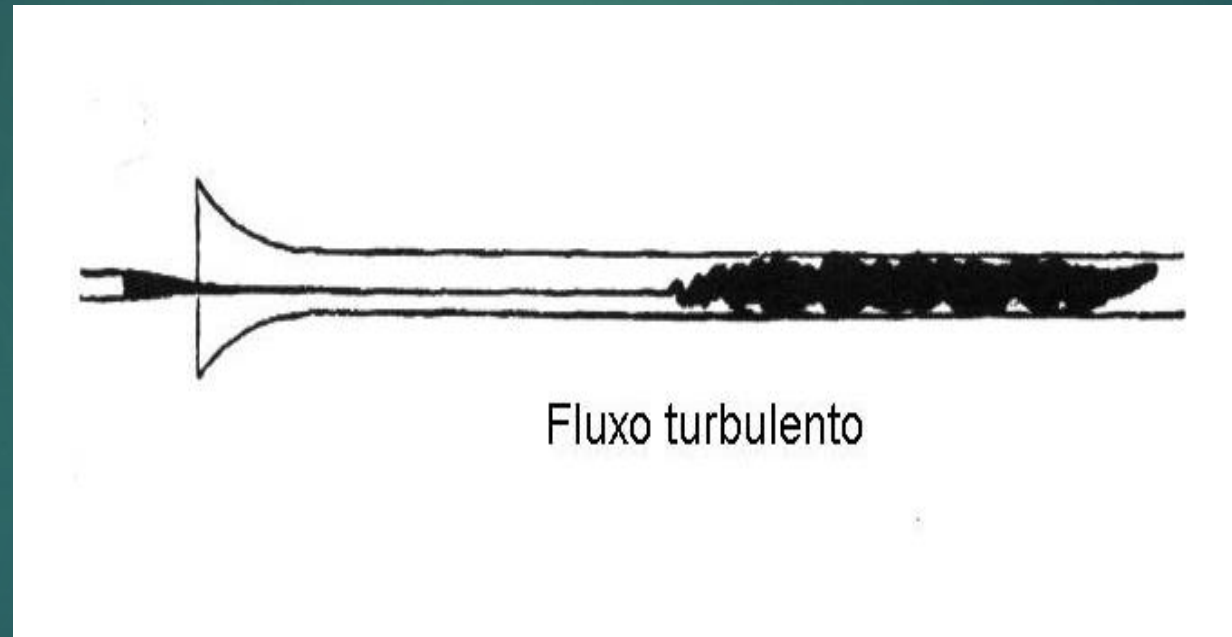


Figura 11

- ▶ Para vazões intermediárias o fluido apresenta leves flutuações no espaço e tempo, neste caso o escoamento esta numa fase de *transição* entre laminar e turbulento (Figura 12).

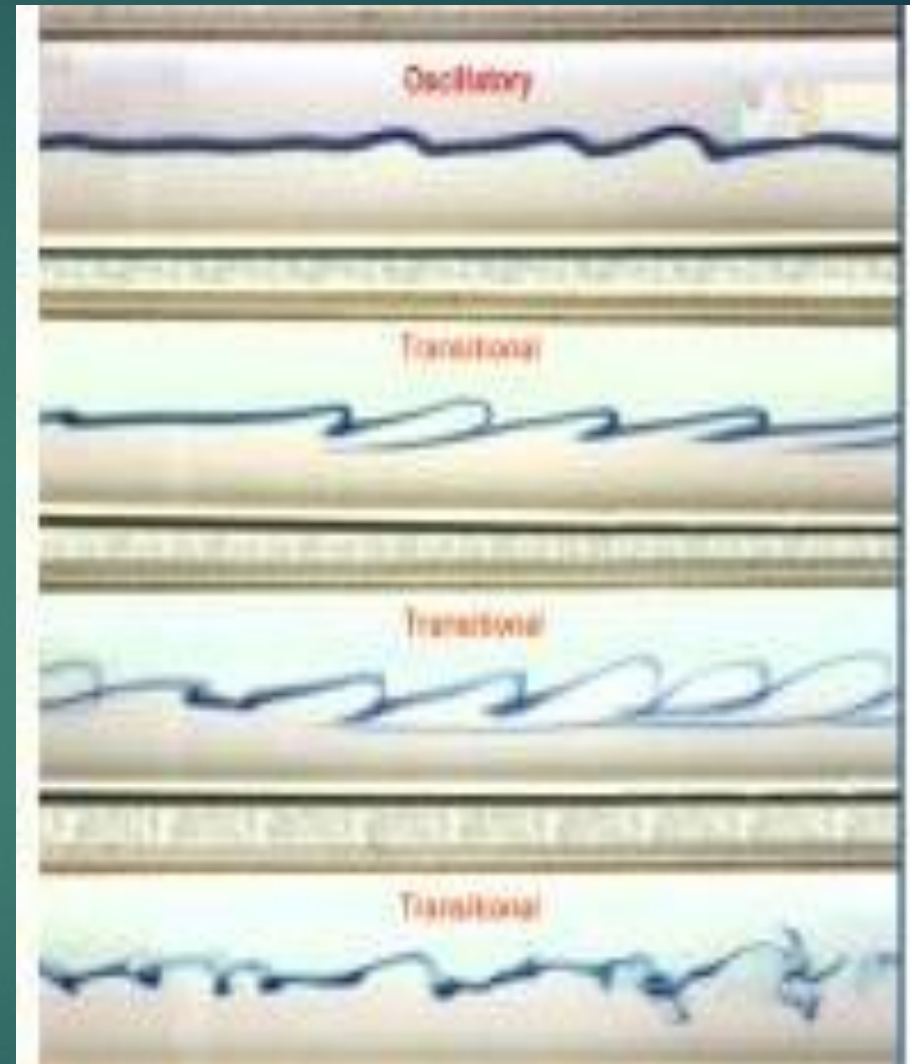



Figura 12

- 
- ▶ Empiricamente conclui-se que a natureza laminar ou turbulenta estava relacionada com o DIÂMETRO (D) da tubulação, a velocidade média de escoamento (V) e a viscosidade cinemática ν . Assim:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

Para $Re < 2300$ o escoamento é LAMINAR

Para $Re > 4000$ o escoamento é TURBULENTO

Escoamento Interno e Externo

- ▶ ESCOAMENTO INTERNO (Figura 14 a – b)
 - ▶ Escoamento em tubulações industriais, dutos de ar condicionado.
 - ▶ Escoamento em peças de transição bocais convergentes e divergentes.
 - ▶ Escoamento em acessórios como curvas, joelhos e válvulas.

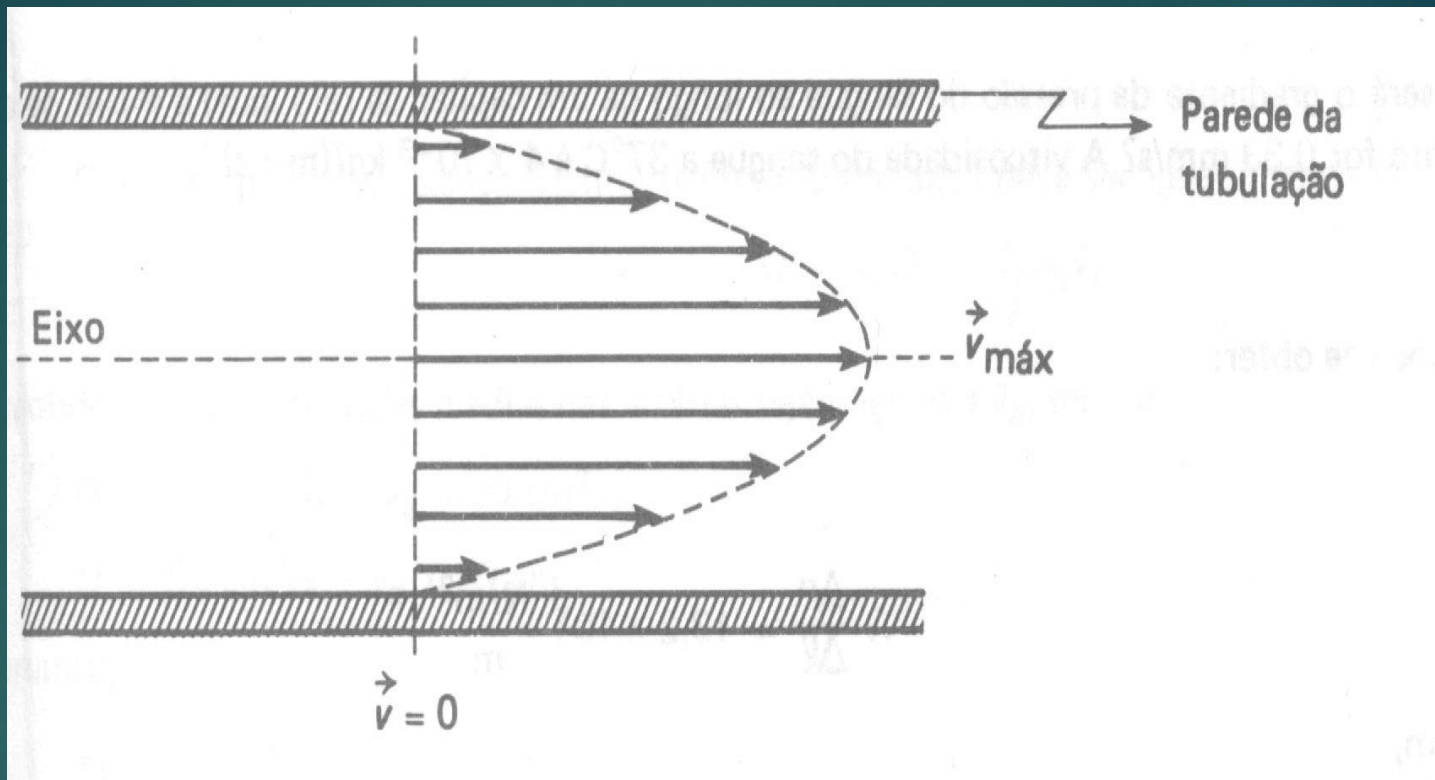


Figura 14 a

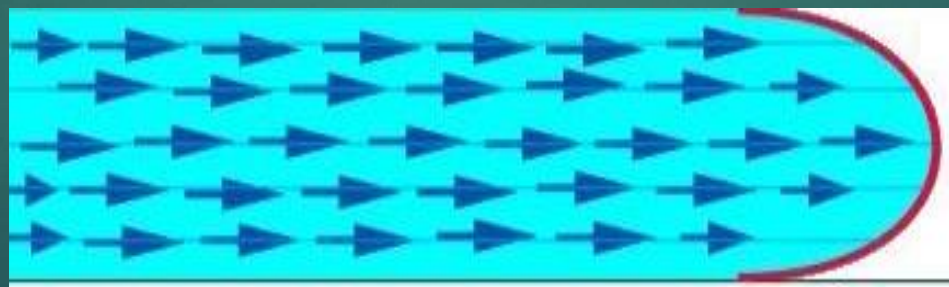
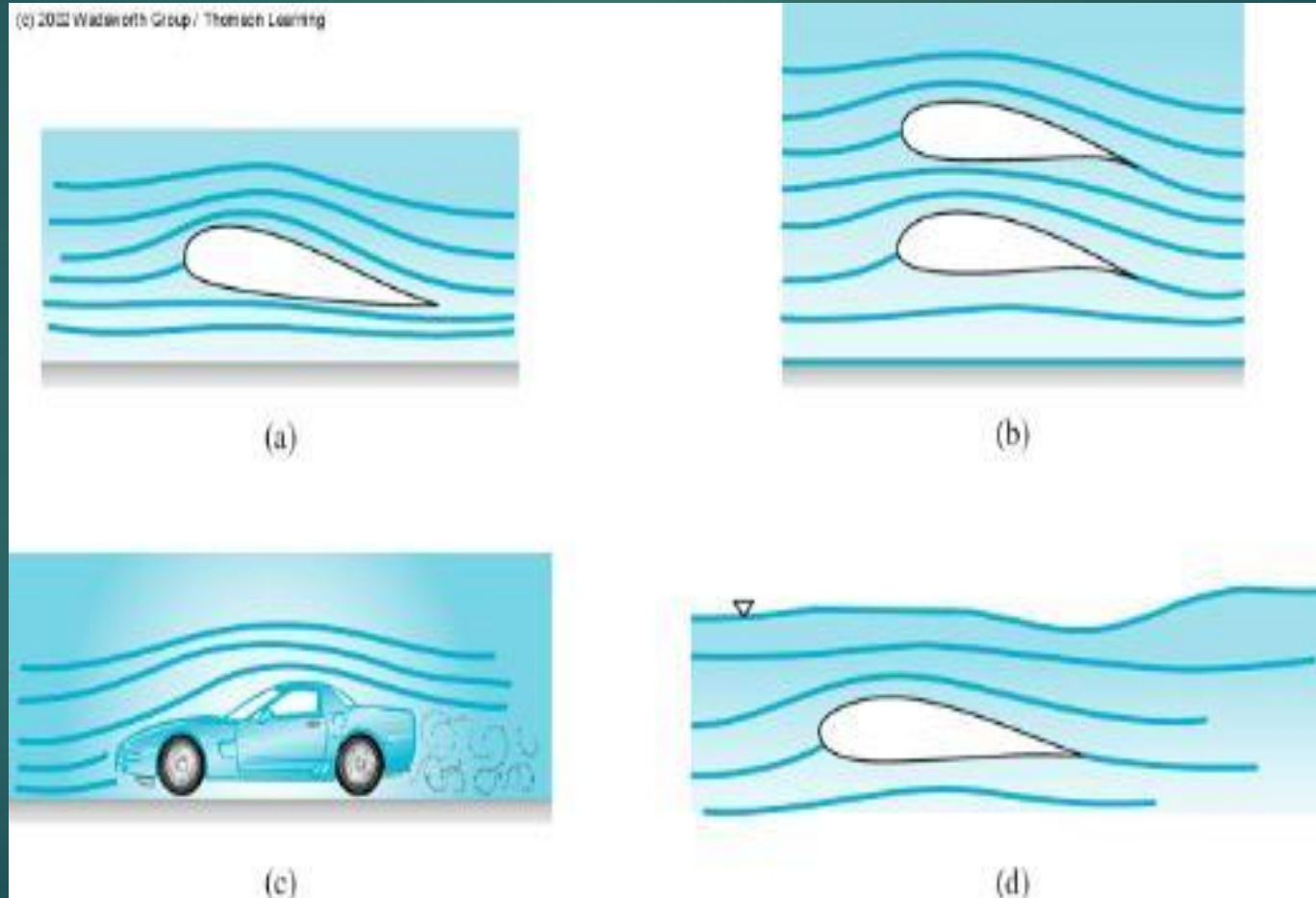


Figura 14 b

▶ ESCOAMENTO EXTERNO:

- ▶ escoamento sobre asas de avião, pás de helicópteros, carros (Figura 15).



- ▶ Escoamento em turbo compressor (Figura 16) ou numa turbina eólica (Figura 17).

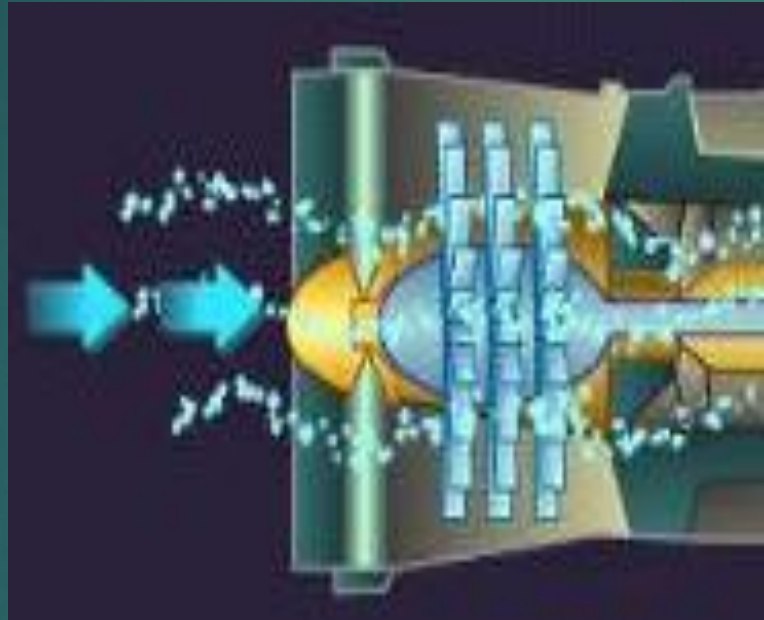


Figura 16

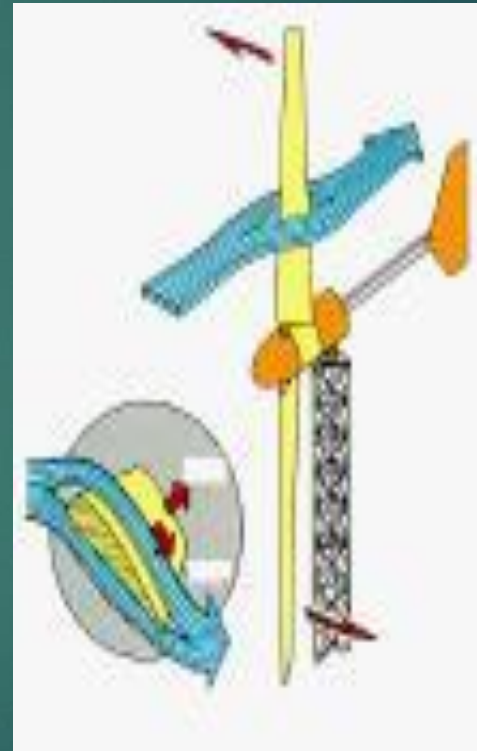



Figura 17

Camada Limite

- ▶ **Hidrodinâmica:** termo adotado para o estudo teórico ou matemático do comportamento de fluidos.
- ▶ **Hidráulica:** foi utilizado para descrever aspectos experimentais do comportamento real dos fluidos.

- 
- ▶ O conceito de CAMADA LIMITE, surgiu a partir da unificação das abordagens *hidrodinâmicas* e de *hidráulicas* para escoamentos viscosos.
 - ▶ Nesta região as forças viscosas são importantes.
 - ▶ Após esta camada (região externa ao corpo) as forças viscosas podem ser desprezadas.

Força de arrasto em escoamento

- ▶ Forças de arrasto são importantes nos escoamentos externos e internos. O ARRASTO é definido, na forma adimensional, pelo coeficientes de arrasto. Existe uma força de arrasto por efeito de pressão e outra por efeito das forças de cisalhamento.