

# Mecânica de Fluidos

Physics for Scientists and Engineers, R. A. Serway and J. W. Jewett,  
Cengage



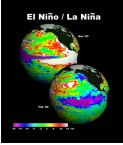

1

## História

				
Archimedes (C. 287-212 BC)	Newton (1642-1727)	Leibniz (1646-1716)	Bernoulli (1667-1748)	Euler (1707-1783)
				
Navier (1785-1836)	Stokes (1819-1903)	Reynolds (1842-1912)	Prandtl (1875-1953)	Taylor (1886-1975)

2

## Tempo & Clima

<b>Tornados</b> 	<b>Trovoadas</b> 
<b>Clima</b> 	<b>Furacões</b> 

3

## Veículos

<b>Avião</b> 	<b>Navio</b> 
<b>Combóio de AV</b> 	<b>Submarino</b> 


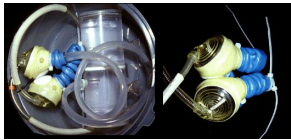
4

## Ambiente

<b>Poluição do ar</b> 	<b>Hidráulica de rios</b> 
--	--

5

## Fisiologia e Medicina

<b>Bomba de sangue</b> 	<b>Dispositivo de assist ventricular</b> 
--	---

6

## Desporto

Desportos aquáticos



Ciclismo



Corridas offshore



Corridas de automóveis



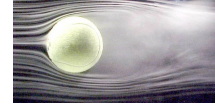
Surf



7

## Estática e dinâmica de fluidos

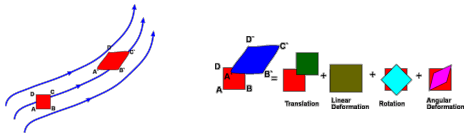
- Líquidos e gases são fluidos
- Estática de fluidos
  - Descreve fluidos em equilíbrio
- Dinâmica de fluidos
  - Descreve fluidos em movimento



8

## Elemento de fluido

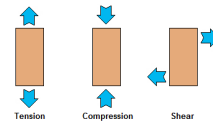
- O elemento de fluido é a descrição matemática correspondente ao ponto material, para um meio contínuo.
- É um elemento de volume em 3D, e de área em 2D.
- Para fluidos incompressíveis, o volume (área) do elemento é constante durante o escoamento mas a sua forma pode variar.



9

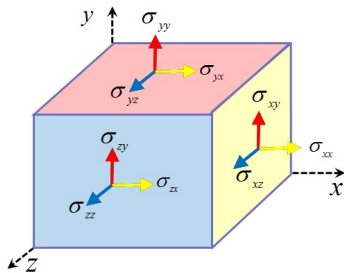
## Forças e tensões

- A tensão é a força por unidade de área exercida numa superfície:  $T=F/A$ 
  - A tensão pode ser normal à superfície ou tangencial (tensão de corte)



10

## O tensor das tensões (Cauchy)



11

$$F = m a$$

12

## NAVIER-STOKES EQUATION

$$\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{Du}{Dt}$$

$$\rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{Dv}{Dt}$$

$$\rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{Dw}{Dt}$$

Navier-Stokes Equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0$$

Continuity

13

## Computational Fluid Dynamics

- CFD is use of computational methods for solving fluid engineering systems, including modeling (mathematical & Physics) and numerical methods (solvers, finite differences, and grid generations, etc.).
- Rapid growth in CFD technology since advent of computer



ENIAC 1, 1946



IBM WorkStation

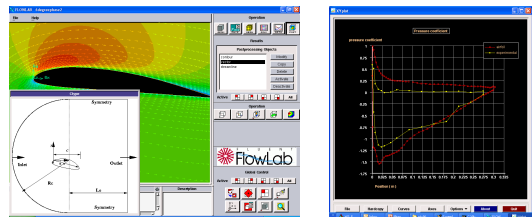
14

## Purpose

- The objective of CFD is to model the continuous fluids with Partial Differential Equations (PDEs) and discretize PDEs into an algebra problem, solve it, validate it and achieve **simulation based design** instead of "build & test"
- Simulation of physical fluid phenomena that are difficult to be measured by experiments: **scale simulations** (full-scale ships, airplanes), **hazards** (explosions, radiations, pollution), **physics** (weather prediction, planetary boundary layer, stellar evolution).

15

## "Hands-on" experience using CFD Educational Interface (airfoil)



16

## Estática

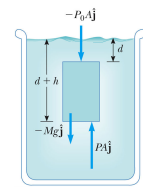
- Os fluidos não resistem a tensões de corte (definição de fluido): escoam
- A única tensão exercida num objecto submerso num fluido em equilíbrio é a que tende a comprimir o objeto em todas as direções
- A **pressão**  $P$  do fluido é a força de compressão por unidade de área
  - A pressão é um escalar
  - Se a pressão variar na superfície, calcula-se  $dF$  no element de superfície com área  $dA$ , como  $dF = P dA$
- Unidade da pressão é o **pascal** (Pa)



17

## Pressão e profundidade

- Os fluidos tem uma pressão que varia com a profundidade.
- Se um fluido estiver em repouso, todos os elementos do fluido estão em equilíbrio estático.
- Considere a região mais escura, um volume de líquido num recipiente cilíndrico
  - A área da base é  $A$
  - A profundidade vai de  $d$  a  $d + h$  medida a partir da superfície
- Três forças externas atuam na região. O equilíbrio implica
  - $P = P_0 + \rho gh$
- A pressão  $P$  à profundidade  $h$  a partir dum ponto no líquido onde a pressão é  $P_0$ , aumenta  $\rho gh$



18

## Lei de Pascal

- A pressão num fluido depende da profundidade e do valor de  $P_0$
- Um aumento da pressão na superfície é transmitido a todos os outros pontos do fluido.
- **A variação da pressão aplicada num fluido é transmitida sem qualquer diminuição a todos os pontos do fluido e às paredes do recipiente.**

19

## Lei de Pascal, Prensa hidráulica

- Uma força maior é obtida à saída do que a força exercida à entrada
- O volume de líquido empurrado para baixo à esquerda, é igual ao volume empurrado para cima à direita
- Como os volumes são iguais,

$$\Delta x_1 A_1 = \Delta x_2 A_2$$

- Multiplicando por  $P$ , fica

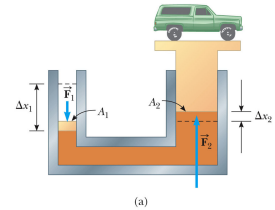
$$\Delta x_1 A_1 P = \Delta x_2 A_2 P$$

Ou

$$\Delta x_1 F_1 = \Delta x_2 F_2$$

- O que significa  $W_1 = W_2$

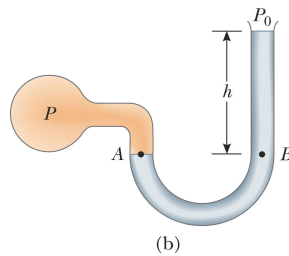
- Uma consequência da Conservação da energia



20

## Medida da pressão: Manómetro

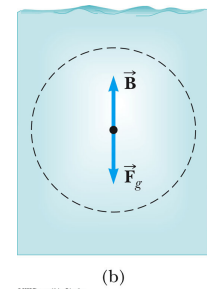
- Dispositivo para medir a pressão de um gás
- Uma extremidade do tubo em U está aberta, à pressão atmosférica
- A outra extremidade está ligada à pressão que se quer medir
- A pressão em B é  $P = P_0 + \rho gh$



21

## Impulsão

- A **força de impulsão** é a força para cima exercida por um fluido, em qualquer objeto submerso
- O volume de fluido está em equilíbrio
- Existe uma força para cima que equilibra o peso



22

## Princípio de Archimedes

- O módulo da força de impulsão é sempre igual ao peso do volume de fluido deslocado pelo objeto
- **Princípio de Archimedes**

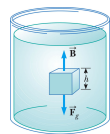
- A pressão no topo do cubo exerce uma força para baixo

$$P_{top} A$$

- A pressão na base do cubo exerce uma força para cima

$$P_{bot} A$$

- A impulsão,  $B = (P_{bot} - P_{top}) A$   
 $= \rho_{fluid} g V = Mg$



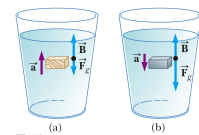
23

## Princípio de Archimedes

- Se a densidade do objeto submerso for menor do que a densidade do fluido, a força resultante é para cima e o objeto sobe até à superfície.

- Se a densidade do objeto for maior do que a densidade do fluido, a força resultante é para baixo e o objeto afunda.

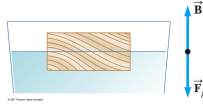
- **A direção do movimento de um objeto num fluido é determinada apenas pelas densidades do fluido e do objeto**



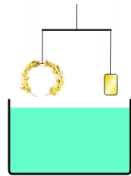
24

## Princípio de Archimedes

- A fração submersa do volume de um objeto que flutua, é igual à razão da densidade do objeto e do fluido.



- A balança de água de Archimedes



25

## Tipos de escoamento



- Escoamento Laminar
  - Estacionário
  - As trajetórias das partículas do fluido são regulares
  - As trajetórias de partículas diferentes nunca se cruzam
  - Cada partícula de fluido que chega a um determinado ponto tem a mesma velocidade
  - A trajetória coincide com a *linha de corrente* (tangente à velocidade em cada ponto)
- Escoamento Turbulento
- Escoamento irregular caracterizado por pequenos turbilhões ou remoinhos
  - O escoamento turbulento ocorre quando as partículas se movem acima de uma dada velocidade crítica

26

## Viscosidade

- Caracteriza o grau de atrito interno do fluido

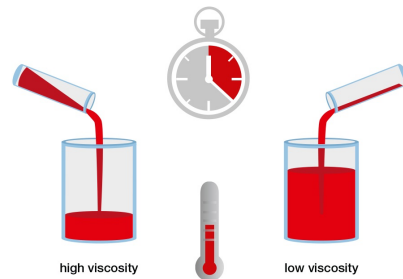


www.shutterstock.com · 1308961747

27

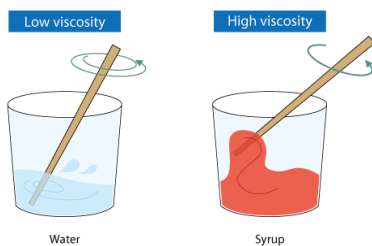
## Viscosidade

Este atrito interno, *força viscosa*, está associado à resistência que duas camadas adjacentes do fluido oferecem ao movimento relativo entre elas.



28

## Viscosidade



A viscosidade causa a dissipação de parte da energia cinética do fluido.  
O escoamento de fluidos com viscosidade é não-conservativo

29

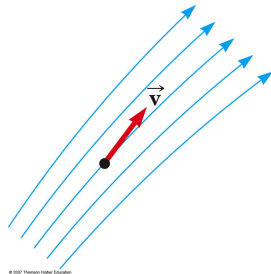
## Fluido ideal (Euler)

- (1) O fluido é não viscoso – o atrito interno é desprezado
- (2) O escoamento é estacionário – a velocidade em cada ponto do domínio de escoamento é independente do tempo
- (3) O fluido é incompressível – a densidade é constante
- (4) O escoamento é irrotacional – o momento angular do fluido é zero

30

### Linhas de corrente

- A velocidade da partícula de fluido é tangente à linha de corrente.
- Um conjunto de linhas de corrente é um *tubo de escoamento*



31

### Equação da continuidade

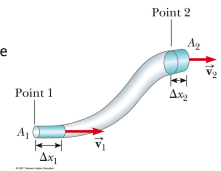
- Considere um fluido que se move num tubo de seção não uniforme (diâmetro)
- As partículas movem-se em linhas de corrente em escoamento estacionário
- A massa que atravessa  $A_1$  num dado intervalo de tempo é a mesma massa que atravessa  $A_2$  no mesmo intervalo

$$m_1 = m_2 \text{ ou } \rho A_1 v_1 = \rho A_2 v_2$$

- Como o fluido é incompressível, a densidade é constante

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

- Esta é a equação da continuidade para fluidos



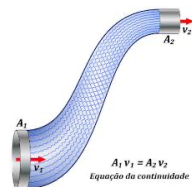
32

### Equação da continuidade

- A velocidade é alta onde o tubo é estreito ( $A$  pequeno)
- A velocidade é baixa onde o tubo é largo ( $A$  grande)
- O produto,  $Av$ , é o *fluxo de volume* ou a *taxa de escoamento*

$$Av = \text{constante}$$

- Não há fontes nem sumidouros



33

### Equação de Bernoulli

- Considere os dois segmentos sombreados.
- Os volumes dos dois segmentos são iguais.
- O trabalho líquido realizado no segmento é:

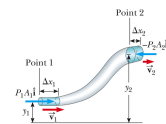
$$W = (P_1 - P_2) V$$

- Parte do trabalho realizado tem como efeito a variação da energia cinética e outra parte a variação da energia potencial gravítica.

- A variação da energia cinética é:

$$\Delta K = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2$$

- Não há variação da energia cinética na parte não sombreada porque o escoamento é estacionário
- As massas são as mesmas porque os volumes são os mesmos



34

### Equação de Bernoulli

- A variação da energia potencial gravítica é:

$$\Delta U = mgy_2 - mgy_1$$

- O trabalho é igual à variação da energia total

$$(P_1 - P_2)V = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2 + mgy_2 - mgy_1$$

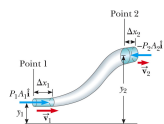
- Rearranjando e dividindo pelo volume:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g y_2$$

- Esta é a equação de Bernoulli usualmente escrita como

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g y = \text{constante}$$

- Para um fluido em repouso, fica  $P_1 - P_2 = \rho g h$ , consistente com a variação da pressão calculada antes



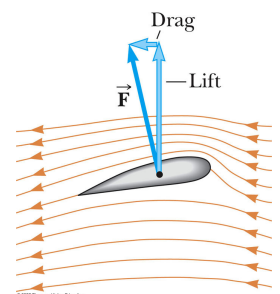
35

### Aplicações da dinâmica de fluidos

- Escoamento laminar à volta de uma asa.

- **Lift** é a força na asa para cima provocada pelo ar
- **Drag** é a resistência ao movimento da asa no ar

- O lift depende da velocidade do avião, da área da asa, da sua curvatura, e do ângulo entre a asa e a horizontal



36

## Airfoils

