



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

- PQI 3203 Fenômenos de Transporte I

Ardson dos Santos Vianna Júnior - ASVJ
e-mail: ardson@usp.br

Turbulência

Introdução

Roteiro



Observações na natureza



Características



Modelos



Conclusões

Introdução

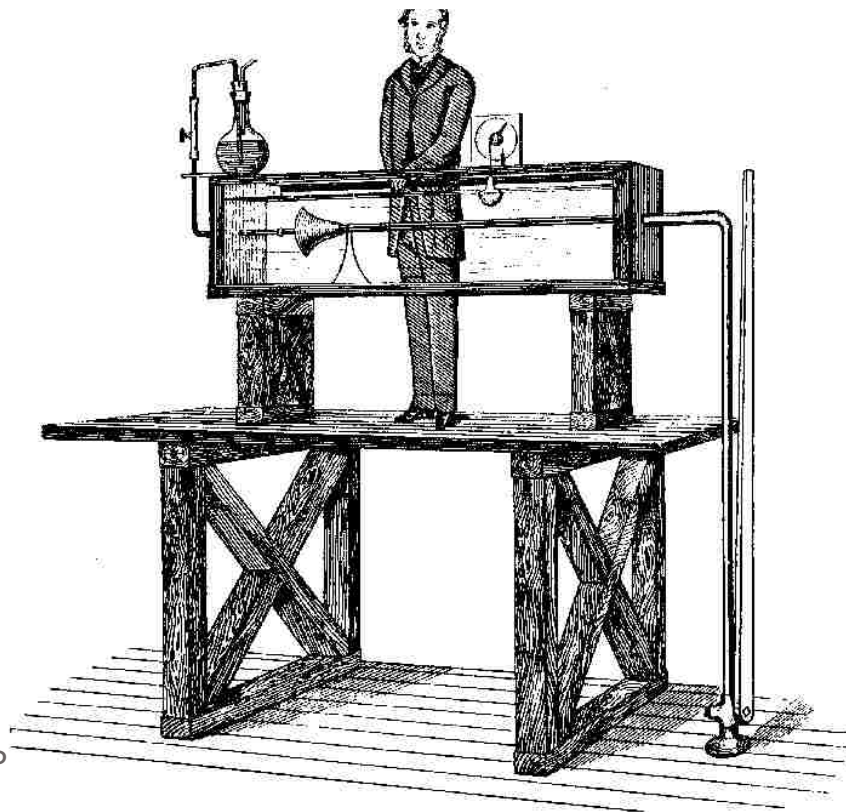
Turbulência

- Escoamentos de fluidos
- Fenômeno ainda não compreendido
- Alterar significativamente as propriedades do escoamento
- Desenvolvimento de modelos
- Tensor tensão

Introdução - definição

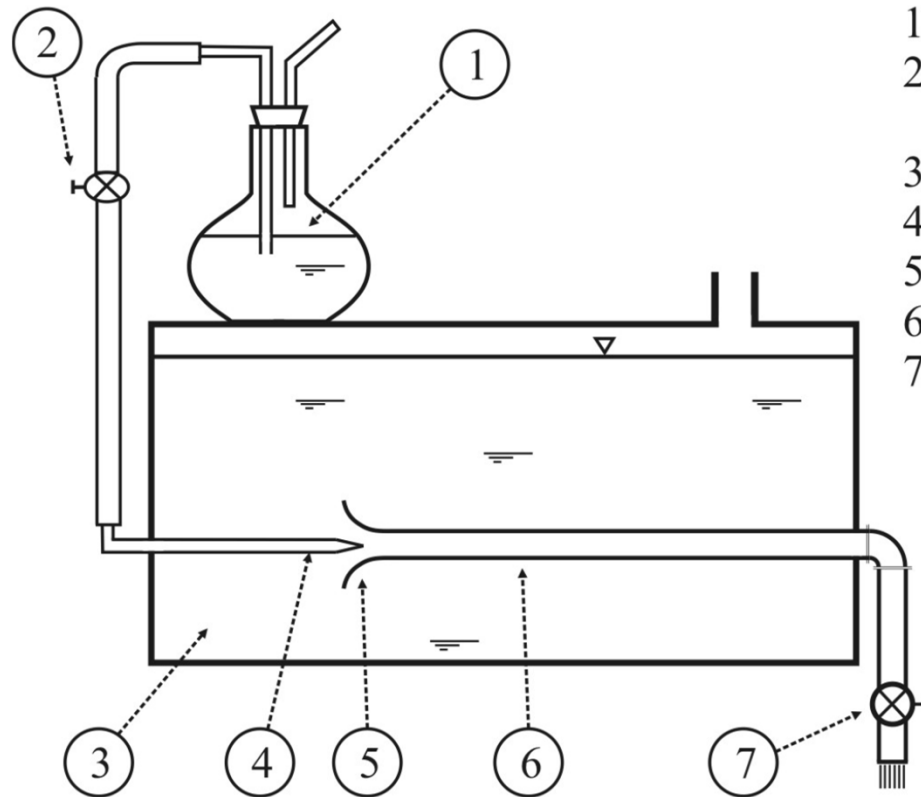
Taylor e Von Kármán (1937): “... turbulência é um movimento irregular, que aparece em fluidos, gasosos ou líquidos, quando escoam por superfícies sólidas, ou mesmo quando correntes vizinhas do mesmo fluido escoam por ele.”
(Wilcox, 1993)

Experimento de Reynolds



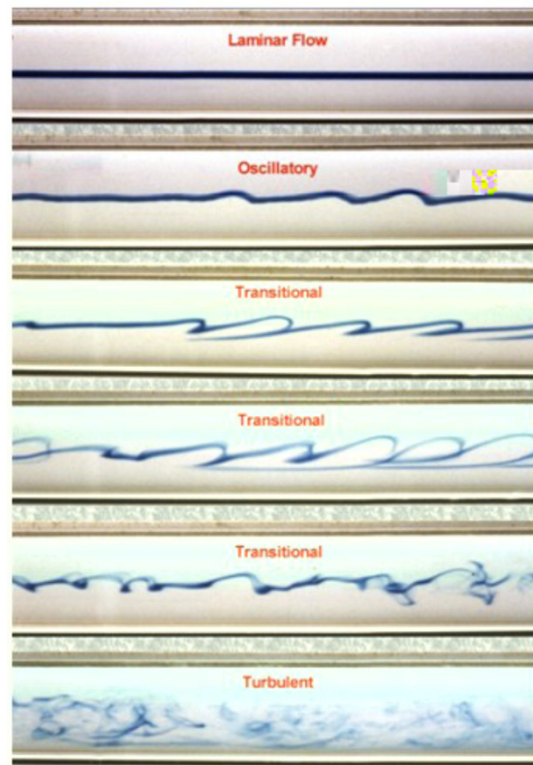
Ardson dos S. Vianna Jr. - USP

Experimento de Reynolds



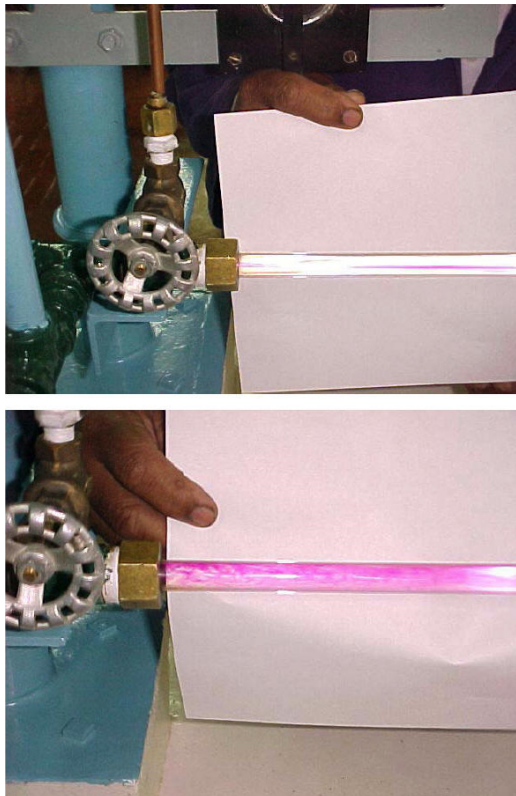
- 1 - Reservatório do corante
- 2 - Válvula de controle de vazão do corante
- 3 - Reservatório de água
- 4 - Injetor
- 5 - Convergente
- 6 - Tubo de vidro
- 7 - Válvula de controle de vazão de água

Experimento de Reynolds



Ardson dos S. Vianna Jr. - USP

Experimento de Reynolds



Ardson dos S. Vianna Jr. - USP

Experiência de Reynolds

- Número adimensional

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

- $\text{Re} > 2000$

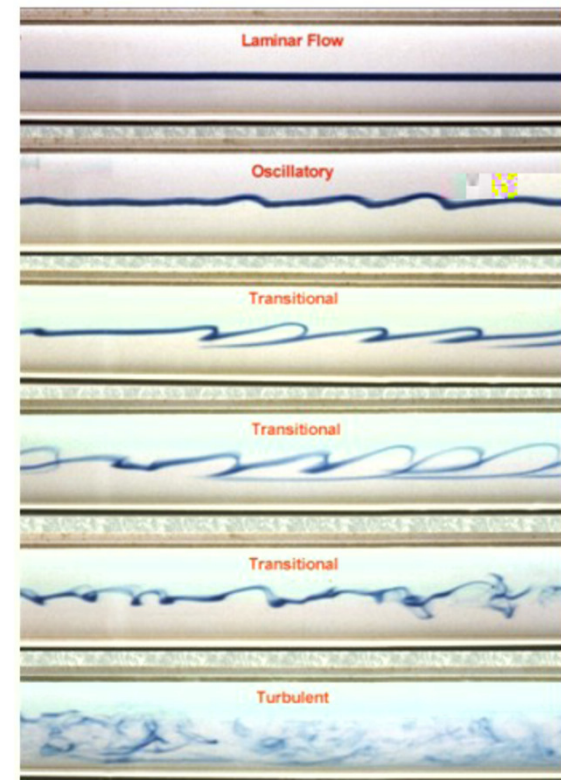
Experiência de Reynolds

Estado ordenado e
predizível para um
estado caótico e não
predizível;

Regiões de
turbulência
intermitentes (*spots*)

Exemplos

- Fluxo em tubos



Exemplos

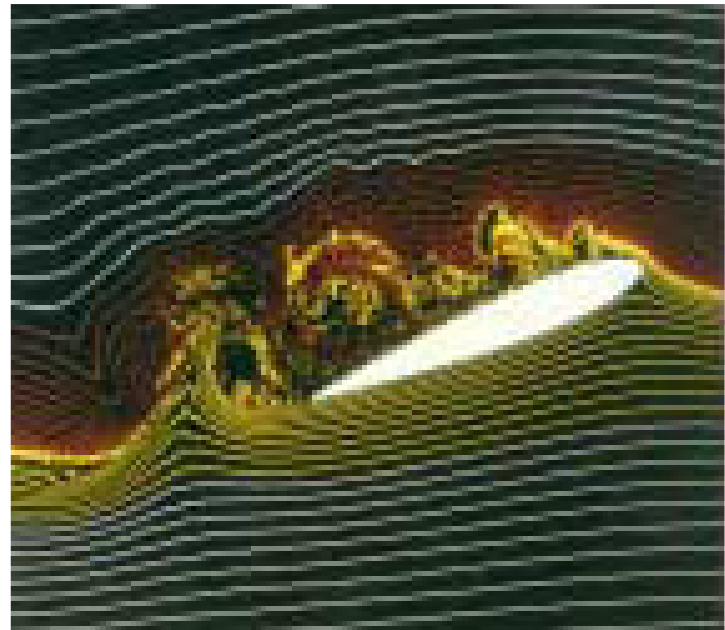
Fluxo ao redor de corpos



Ardson dos S. Vianna Jr. - USP

Exemplos

- Camada limite sobre aerofólio



Exemplos

- Jato circular



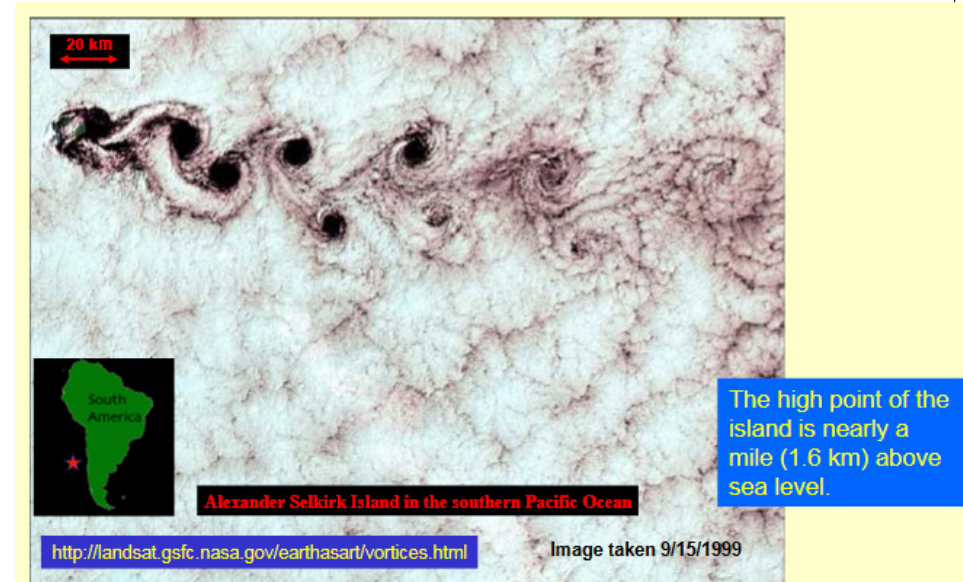
Exemplos

- Turbilhões atmosféricos



3. Exemplos

- Turbilhões – escalas dissipativas de Kolmogorov
- Esteira de von Kármán
- Causada pelo vento ao redor das Ilhas de Juan Fernández na costa do Chile.



Exemplos

- aerodinâmica



Ardson dos S. Vianna Jr. - USP

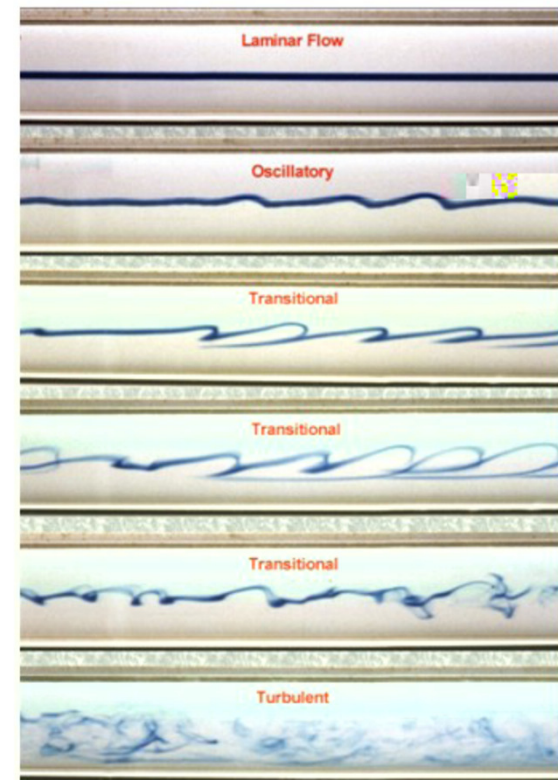
Características

- Irregularidade: aleatoriedade, estatística



Características

- Irregularidade
- Difusividade: a difusividade turbulenta é que aumenta a mistura



Características

- Irregularidade
- Difusividade
- Número de Reynolds alto



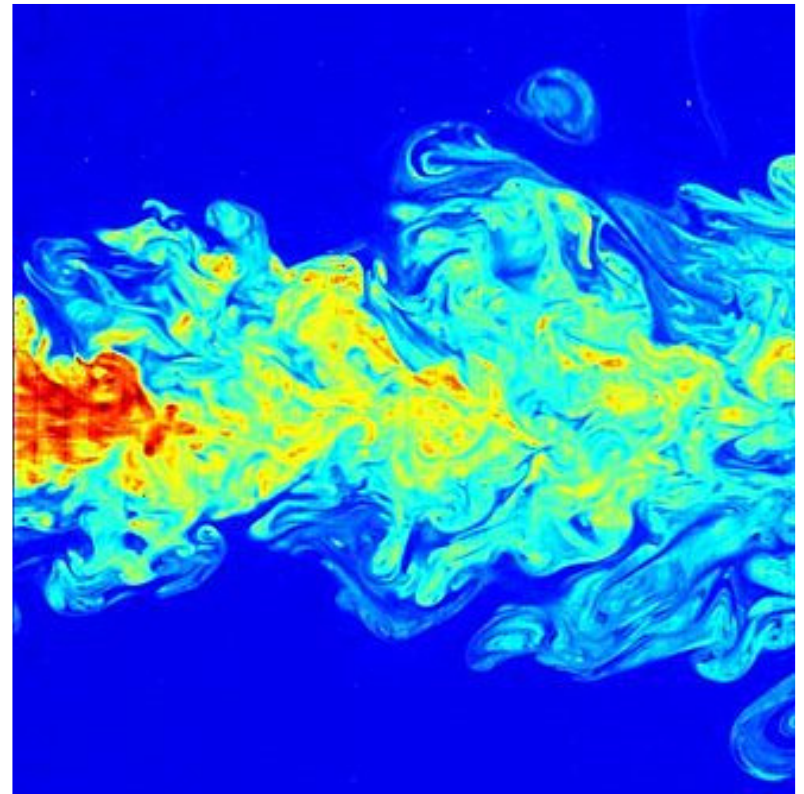
Características

- Irregularidade
- Difusividade
- Número de Reynolds alto
- Rotacionalidade e 3D: a turbulência é caracterizada por altos níveis de flutuação de vorticidade



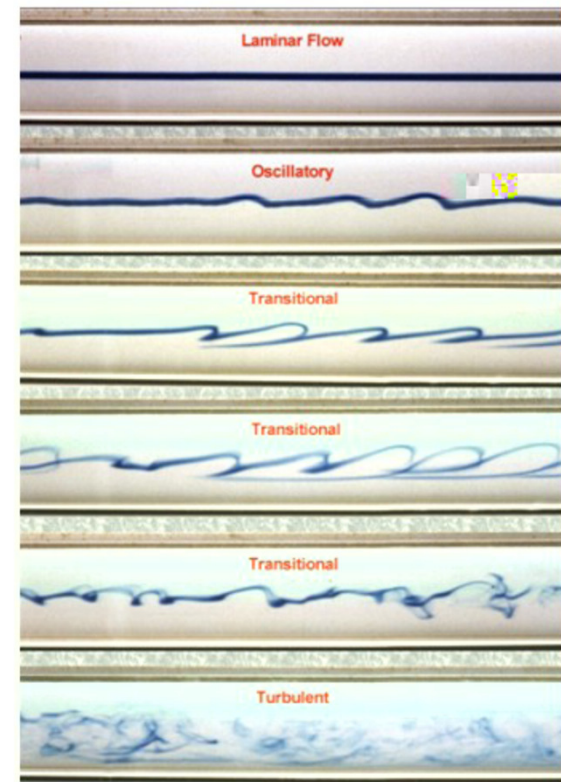
Características

- Irregularidade
- Difusividade
- Número de Reynolds alto
- Rotacionalidade e 3D
- Dissipação: os fluxos turbulentos são sempre dissipativos



Características

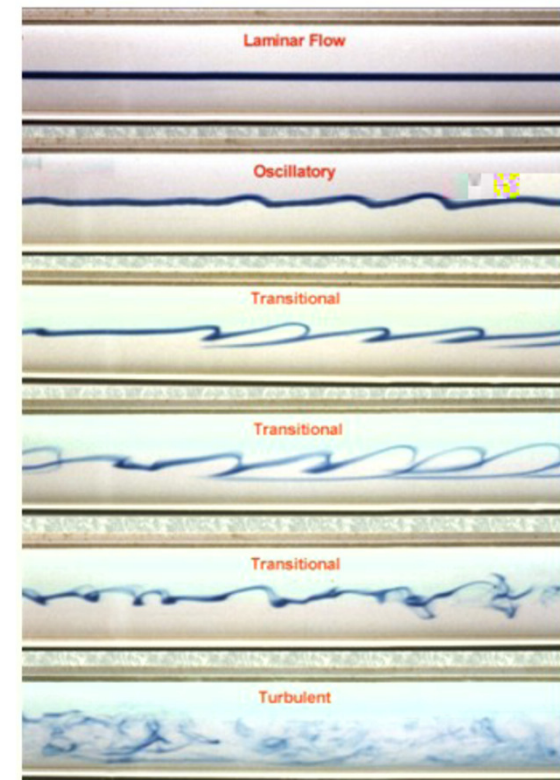
- Irregularidade
- Difusividade
- Número de Reynolds alto
- Rotacionalidade e 3D
- Dissipação
- Continuum: escala pequena mas maior que a molecular



Características

- Irregularidade
- Difusividade
- Número de Reynolds alto
- Rotacionalidade e 3D
- Dissipação
- *Continuum*

- Turbulência: é fluxo



Escalas

- Ordens de grandeza das variáveis a serem avaliadas

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \gamma \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2}$$

Escalas

$$\frac{\Delta\Theta}{T_m} = \gamma \frac{\Delta\Theta}{L^2}$$

$$T_m \approx \frac{L^2}{\gamma}$$

- T_m – Escala de tempo
- γ - Difusão térmica
- L - Escala de comprimento

Escalas - aplicação

- Aquecimento de uma sala de 5 m
- Difusão molecular: $0,2 \text{ cm}^2/\text{s} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

$$T_m \approx \frac{5^2}{2 \cdot 10^{-5}} = 1250000 \text{ s} = 350h$$

Escalas - aplicação

- Aquecimento de uma sala de 5 m
- Velocidade: $5 \text{ cm/s} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$

$$T_t \approx \frac{L}{v} = \frac{5}{5 \cdot 10^{-2}} = 100 \text{ s} = 1,7 \text{ min}$$

Escalas - aplicação

- Turbulento x laminar

$$\frac{T_t}{T_m} \sim \frac{L \gamma}{u L^2} = \frac{1 \gamma}{u L}$$

- 1/ Peclet

Escalas - aplicação

- Calor x movimento
- Difusividade térmica \sim viscosidade cinemática ($\gamma \sim \nu$)
- $Pr = \nu / \gamma$ (ar é 0,73)

$$\frac{T_t}{T_m} \sim \frac{\nu}{uL} = \frac{1}{Re}$$

Escalas de Kolmogorov

- Existência de inúmeros comprimentos de escala ou turbilhões de vários tamanhos;
- Maiores da ordem do campo de movimento;
- Menores são limitados pela difusão molecular.

Escalas de Kolmogorov

Análise dimensional

- $EC = \frac{1}{2} m v^2$
- $EC / m = \frac{1}{2} v^2 \quad - \quad v \sim k^{1/2}$
- ε – taxa de dissipação de EC/m

Escalas de Kolmogorov

- $\varepsilon - d(EC/m)/dt [=] (m/s^2)^2/s = m^2/s^3$
- L_d , v_d e t_d – comprimento, velocidade e tempos dissipativos de Kolmogorov;
- Postulado de Kolmogorov – viscosidade cinemática (ν) e ε .

Escalas de Kolmogorov

- $\nu = \mu/\rho [=] \text{ g/cm/s} / \text{ g/cm}^3 = \text{ cm}^2/\text{ s}$

Finalmente:

- $L_d = \nu^a \epsilon^b \quad \text{cm} = (\text{ cm}^2/\text{ s})^a (\text{ cm}^2/\text{ s}^3)^b$

- $2a+2b=1 \quad a+3b=0$

Escalas de Kolmogorov

- $L_d = \nu^{3/4} \varepsilon^{-1/4}$

- $v_d = (\nu \varepsilon)^{1/4}$

- $t_d = \nu^{1/2} \varepsilon^{-1/2}$ $Re_d = 1$

Modelagem

- Correlações
- Métodos integrais
- Médias de Reynolds
- Simulação de grandes escalas (LES)
- Simulação numérica direta (DNS)

Modelagem - correlações

- Calculam o coeficiente de atrito como função dos números de Reynolds, Nusselt e Prandtl;
- Modelo semi-empírico.

Modelagem – Met. integrais

- Integram, ao menos em uma coordenada, as equações de governo da dinâmica dos fluidos;
- Utiliza muito os dados experimentais e a física do problema;
- Refazer quando um novo tipo de escoamento é calculado.

Modelagem – Média Reynolds

- *Reynolds Average Navier-Stokes Equations* (RANS), média das equações de Navier-Stokes;
- Reynolds propôs decompor as propriedades em uma parcela média e outra de flutuação.

Modelagem - LES

- Médias sobre um pequena região espacial;
- É uma metodologia intermediária à simulação numérica direta (DNS);
- O efeito dos pequenos vórtices sobre os outros turbilhões é modelado.

Modelagem – DNS

- *Direct Numerical Simulation* (DNS), simulação numérica direta;
- Solução numérica das equações de Navier-Stokes, sem simplificações;
- Limitada a baixos números de Reynolds e a geometrias simples.

Conclusões

A turbulência é um problema em aberto;

Várias formas de modelagem;

RANS, LES, DNS,...

Referências

- Wilcox, D.C., *Turbulence Modeling for CFD*, 2nd ed., 1998;
- Hinze, J.O., 1975, *Turbulence*, McGraw-Hill;
- TENNEKES, H., and, LUMLEY, J. L., *A first course in turbulence*, 1972, The MIT Press;