

Turbulência – MEC 2355

Prof. Angela O. Nieckele

Ementa:

Fundamentos da Turbulência

Caracterização da Turbulência,

Descrição Estatística do escoamento Turbulento

Modelagem e Simulação

Modelos Algébricos e Diferenciais

Simulação das Grandes Escalas

Simulação Numérica Direta



Turbulência – MEC 2355

Bibliografia

- Turbulent Flows, S. B. Pope, Cambridge University Press, 2000.
- Turbulence, J.O. Hinze, McGraw Hill; 1975;
- A First Course in Turbulence, H. Tennekes, J.L. Lumley, The MIT Press; 1972;
- Turbulence Models and Their Application in Hydraulics, W. Rodi, Institut für Hydromechanik, University of Karlsruhe, 1984;
- Boundary-Layer Theory, Schlichting, H., 1968, McGraw-Hill, Inc.
- Townsend, A.A. : *The Structure Of Turbulent Flows.*, Cambridge University Press, 1976, 2a. ed., NY,NY.
- Lesieur, M., 1995, Turbulence in Fluids, Kluwer Academic Publishers
- Mathieu, J. and Scott, J., An Introduction to Turbulent Flow, Cambridge University Press, 2000, First Edition



Introdução: Porque turbulência é importante?

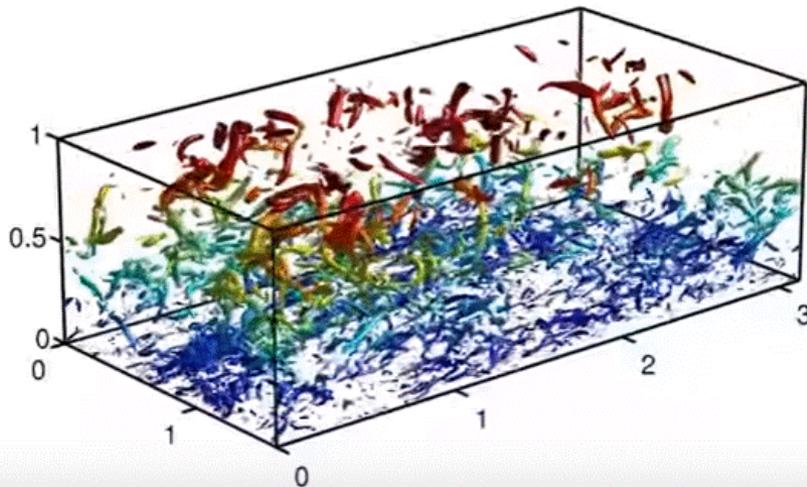
- Escoamento turbulento pode ser observado no nosso dia a dia, seja pela fumaça de uma chaminé, água em um rio ou cachoeira, ou o soffro de um vento forte.



- Observando uma cachoeira, observa-se imediatamente que o escoamento é transiente, irregular, parece aleatório e caótico e certamente o movimento de cada gota e turbilhão é imprevisível.



- Na pluma formada pelo motor de um foguete, pode-se observar movimento turbulento de muitas escalas.
- Os vórtices maiores se quebram em vórtices menores sucessivamente



Introdução

- Na visão de Kolmogorov, o universo é governado por turbulência.

O espaço livre entre moléculas de gás interestelar é muito menor do que a distância entre estrelas. Assim o gás pode ser visto como um meio contínuo, assim como ar e água

Esta galáxia é um imenso vórtice

-
- A definição de turbulência em um dicionário é: agitação, perturbação. Esta definição não é suficiente para caracterizar o escoamento turbulento.
 - De acordo com Taylor e von Kármán, 1937, turbulência deve satisfazer uma condição de irregularidade, sendo gerada por forças viscosas ao longo de superfícies sólidas ou por escoamento de camadas de fluidos com diferentes velocidades escoando sobre outras camadas.
 - Existem diferenças marcantes entre os dois tipos de geração de turbulência, portanto é conveniente utilizar diferentes designações para cada tipo de geração de turbulência.
 - “turbulência de parede” quando a turbulência é gerada por paredes sólidas fixas e é continuamente afetada por estas.
 - “turbulência livre”: turbulência gerada na ausência de paredes
-

- Outro efeito da viscosidade é tornar a turbulência mais homogênea e torná-la menos dependente da direção.
 - No caso extremo, a turbulência apresentará qualitativamente a mesma estrutura em todas as partes do escoamento. Neste caso a turbulência é considerada homogênea. O conceito de turbulência homogênea foi introduzido por von Kármán, para o caso de tensão média constante em todo o campo de escoamento, como é o caso do escoamento de Couette.
- No caso real de fluidos viscosos, o efeito da viscosidade resulta em uma conversão de energia cinética do escoamento em calor. Portanto, um escoamento turbulento é dissipativo, assim como todos os tipos de escoamentos. Se não existe uma fonte externa contínua de energia para a geração contínua do movimento turbulento, o movimento irá decair.

- Uma possível definição para a turbulência de acordo com Hinze, 1975, poderia ser: “O movimento turbulento de um fluido é a condição irregular do escoamento, na qual as várias quantidades envolvidas apresentam uma variação randômica no tempo e no espaço, tal que podem ser diferenciados estatisticamente de seus valores médios.”

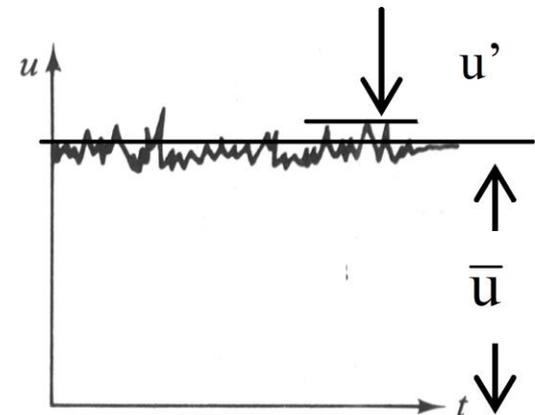
O valor médio é obtido por

$$u = \bar{u} + u'$$

$$\bar{u} = \frac{1}{\Delta t} \int_{\Delta t} u \, dt$$

sendo $\bar{u}' = 0$ já que

$$\bar{u} = \frac{1}{\Delta t} \int_{\Delta t} u \, dt = \underbrace{\frac{1}{\Delta t} \int_{\Delta t} \bar{u} \, dt}_{\bar{u}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta t} \int_{\Delta t} u' \, dt}_{\text{zero}}$$



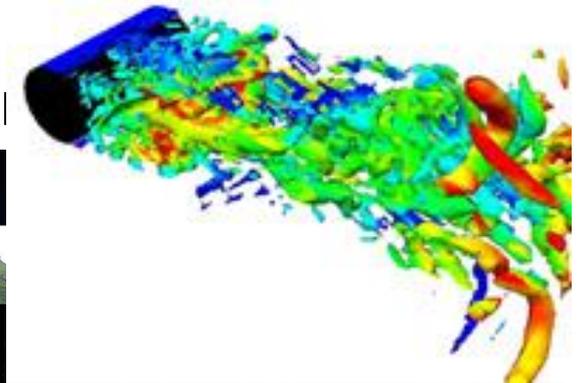
- A turbulência é chamada de *isotrópica* se as características estatísticas não apresentarem nenhuma preferência para alguma direção particular, tal que perfeita desordem reina. Neste caso, não haverá tensão cisalhante média e o gradiente da velocidade média é nulo.
- Para todos os outros casos, nos quais o gradiente da velocidade média apresenta um gradiente, a turbulência será anisotrópica. Dentro desta classe encontra-se a turbulência de parede, assim como a turbulência livre anisotrópica.

Porque turbulência é importante?

Por exemplo, os seguintes escoamentos são tipicamente turbulentos

- Escoamentos atmosféricos
- Escoamentos em rios e oceanos
- Fotosfera do sol e outras estrelas, nuvem interestelar
- Camadas limite sobre quase todos os transportes
- Maioria dos processos de combustão
- Maioria dos escoamentos envolvem transferência
- Escoamentos de gases em tubulações

,etc.



Influência do regime do escoamento

Importantes características do escoamento são afetadas pela mudança de regime laminar para turbulento:

Todas são muito maiores no regime turbulento

Engenheiros normalmente buscam:

- Arrasto viscoso

Redução

- Fluxo de Calor

Redução em veículos hipersônicos e aumento em trocadores de calor

- Fluxo de Massa

Redução para fazer jatos longos ou aumento para intensificar mistura (ex.: combustores)

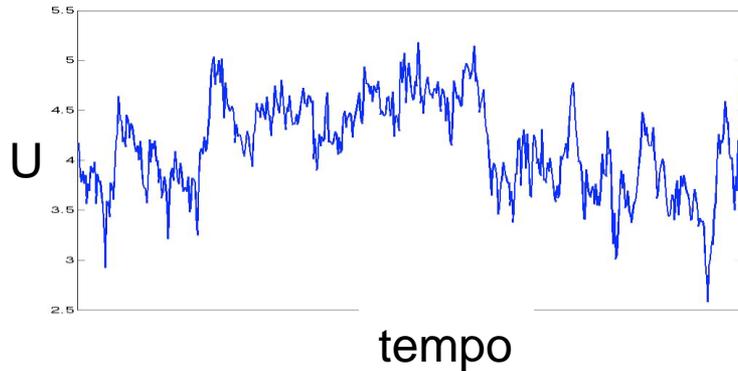
- Fluxo de quant. de movimento

Redução para antecipar separação ou aumento para atrasar separação

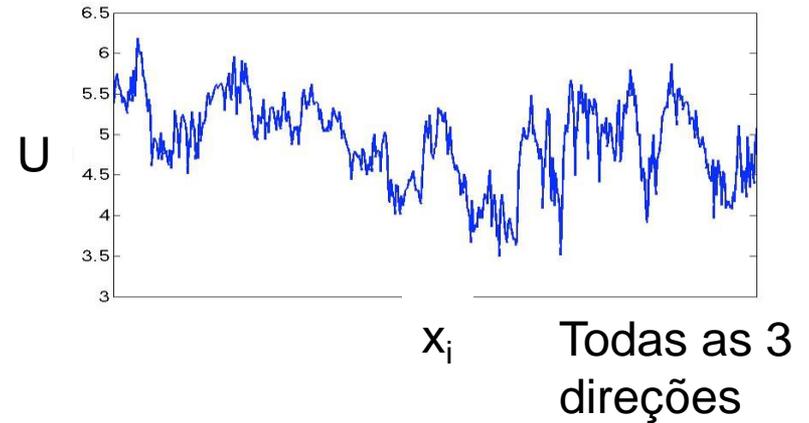
-
- A grande motivação para estudar a turbulência é a combinação dos seguintes itens:
 - A grande maioria dos escoamentos é turbulento
 - O transporte e mistura de matéria, *momentum*, energia em escoamentos é de grande importância prática.
 - A turbulência aumenta significativamente a taxas de transferência destes processos

Propriedades do escoamento turbulento

■ Transiente



■ 3D Variação randômica no espaço



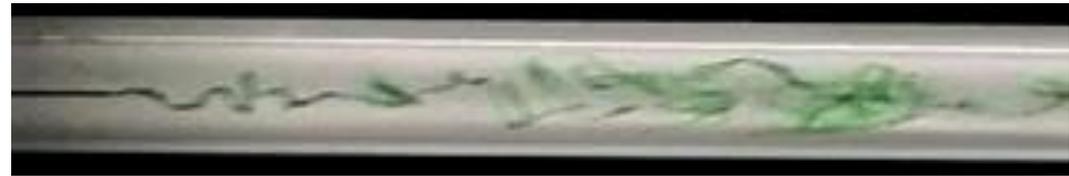
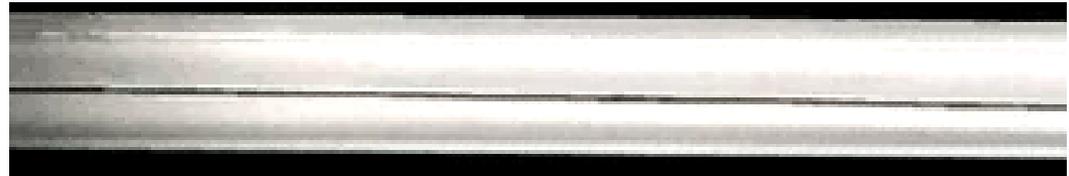
■ Alta vorticidade

Esticamento de vórtices \Rightarrow mecanismo para aumentar a turbulência

vorticidade: $\vec{\omega} = \nabla \times \vec{u}$ $\omega_k e_k = \epsilon_{ijk} \frac{\partial}{\partial x_i} u_j e_k$

■ Mistura

Uma importante característica da turbulência é sua habilidade de transportar e misturar fluidos de maneira muito mais efetiva que o escoamento laminar



Laminar: filamento de corante não se mistura

Turbulento: o corante mistura rapidamente

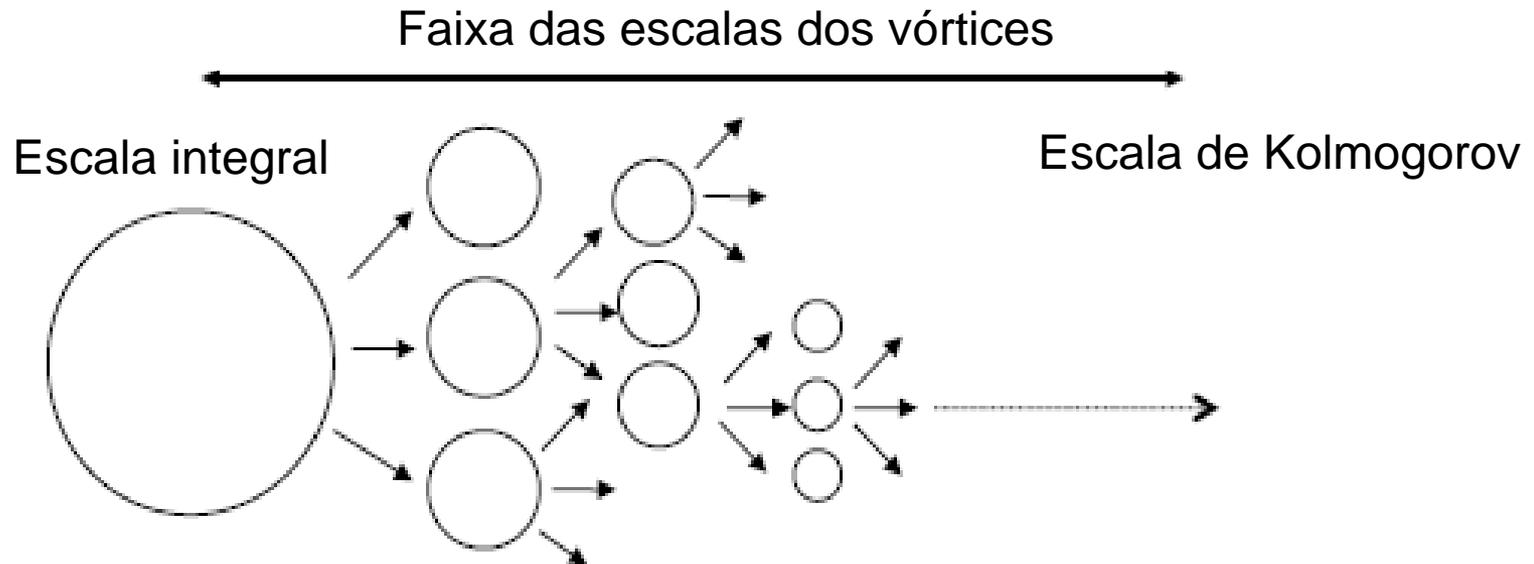
O escoamento turbulento ocorre a altas velocidades. A transição é caracterizada pelo no. de Reynolds

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

- Reynolds altos → esc. turbulento
- Reynolds baixo → esc. laminar



■ Contínuo espectral (faixa) de escalas



Produção de energia → (cascata de energia) → dissipação de energia
devido ao cisalhamento devido à viscosidade

- As pequenas escalas recebem energia numa taxa proporcional a taxa de dissipação
- O movimento das pequenas escalas do escoamento dependem:
 - Taxa de transferência de energia das pequenas escalas, ε
 - Viscosidade cinemática, ν

■ Representação espectral da turbulência

- Decomposição de Fourier de uma sinal: O sinal (por exemplo a velocidade) é representado por uma série de senos e cossenos com ondas com diferentes amplitudes e comprimentos de onda (em 1D)

$$u(x, t) = \sum_k \hat{u}(k, t) e^{i k x}$$

onde k é o número de onda (comprimento de onda $\lambda = 2 \pi / k$)

As transformadas de Fourier são úteis para estudar o conteúdo de energia de um sinal com relação as escalas (tamanho dos movimentos). Também são úteis em métodos numéricos e muitas outras aplicações

- O conteúdo de energia de um sinal pode ser representado pela densidade espectral de energia

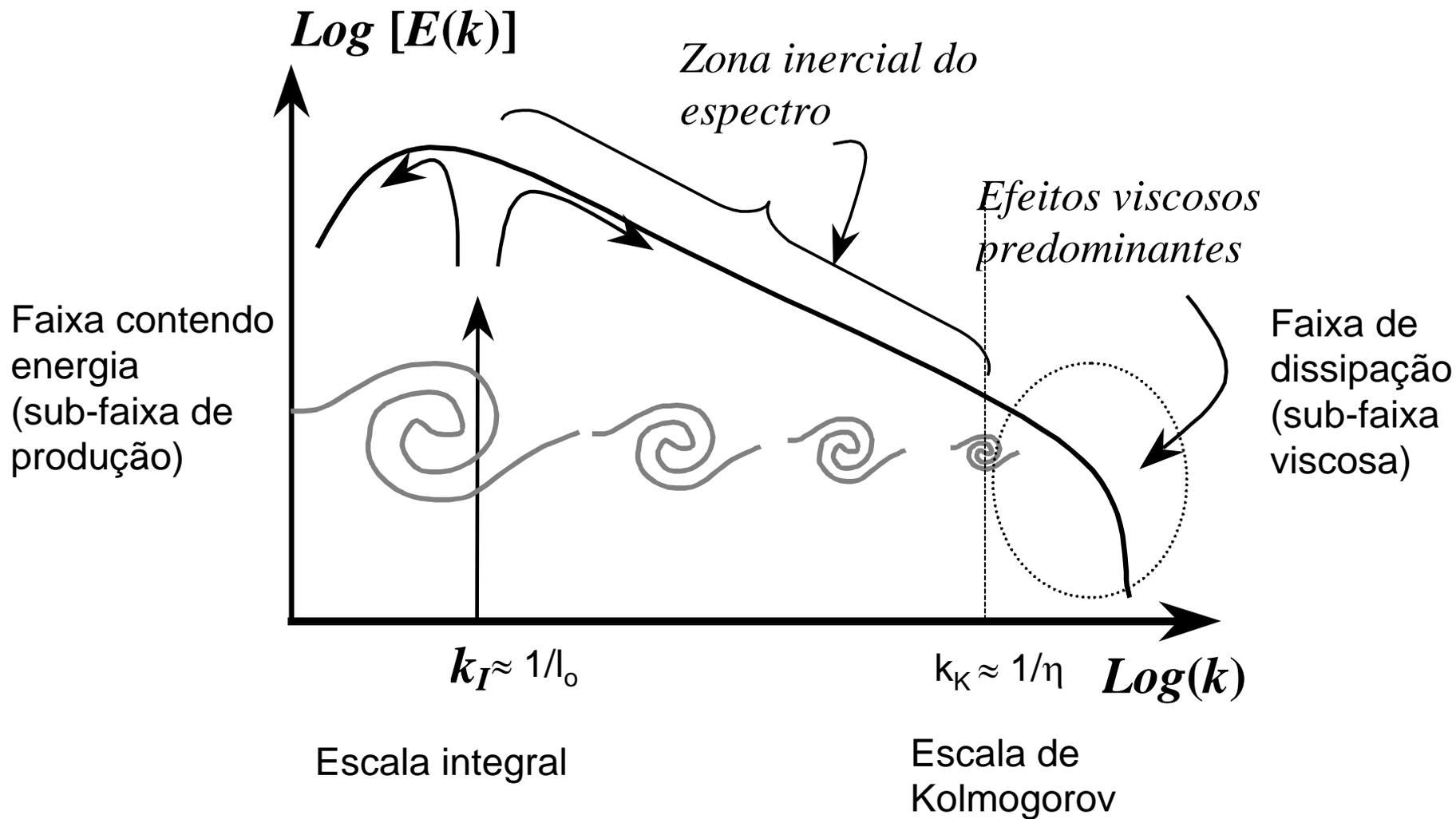
$$E(k) \approx \hat{u}(k, t) \hat{u}(k, t)^*$$

$\hat{u}(k, t)^*$ conjugado complexo de $\hat{u}(k, t)$

- Energia cinética turbulenta total:

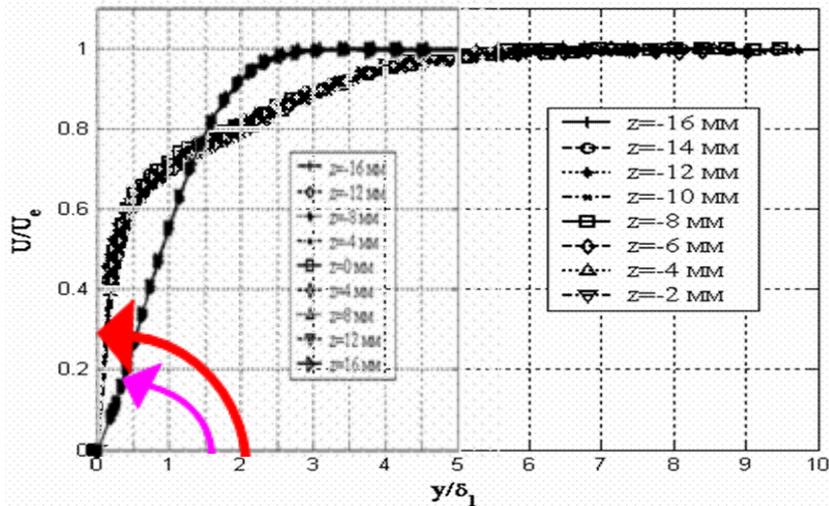
$$\int_0^{\infty} E(k) d k$$

Espectro de energia



Influência do regime do escoamento

Comparação de perfis de velocidade média típicos de camada limite laminar e turbulenta



Borodulin, Kachanov, Roschectayev (2004)

Derivada da velocidade média dU/dy na parede é muito maior no regime turbulento!

$$\tau_w = \mu \left. \frac{\partial U}{\partial y} \right|_{y=0}$$

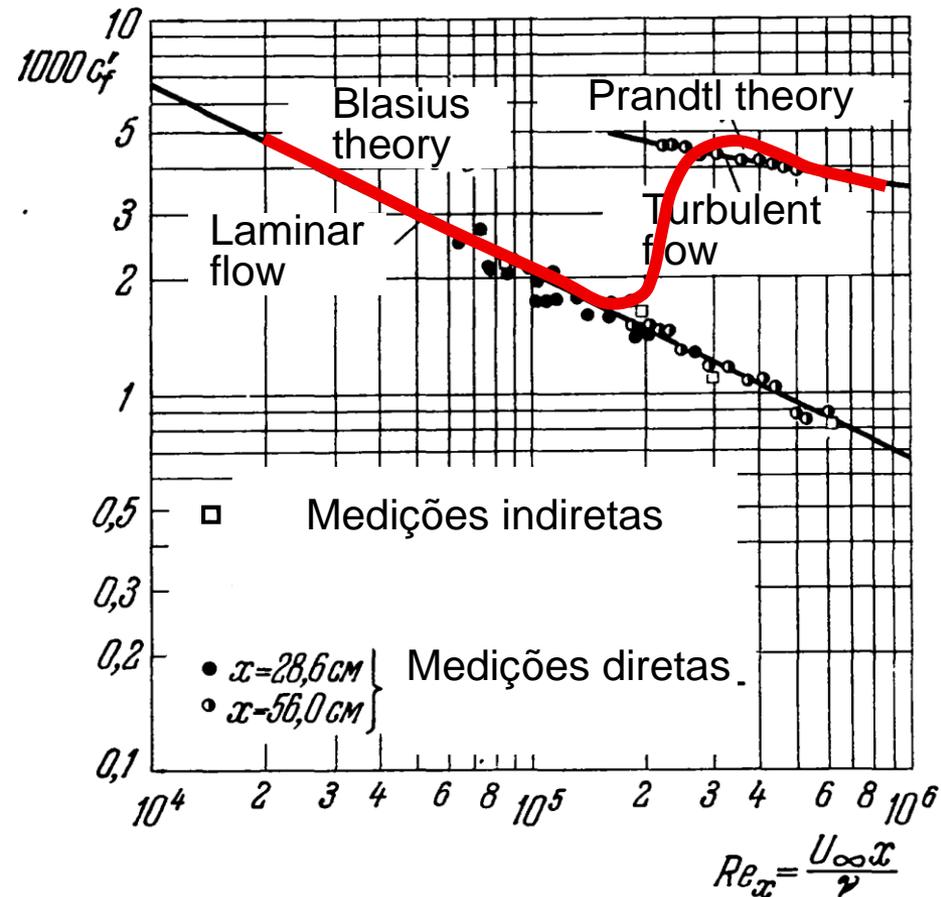
Coeficiente de atrito

$$c_f = \tau_w / (0.5 \rho U_\infty^2)$$

Coeficiente de arrasto de uma placa plana em regime de escoamento laminar e turbulento

$$c'_{f \text{ laminar}} = 0.664 \text{Re}_x^{-1/2}$$

$$c'_{f \text{ turbulento}} = 0.0592 \text{Re}_x^{-1/5}$$



Influência do regime do escoamento

laminar

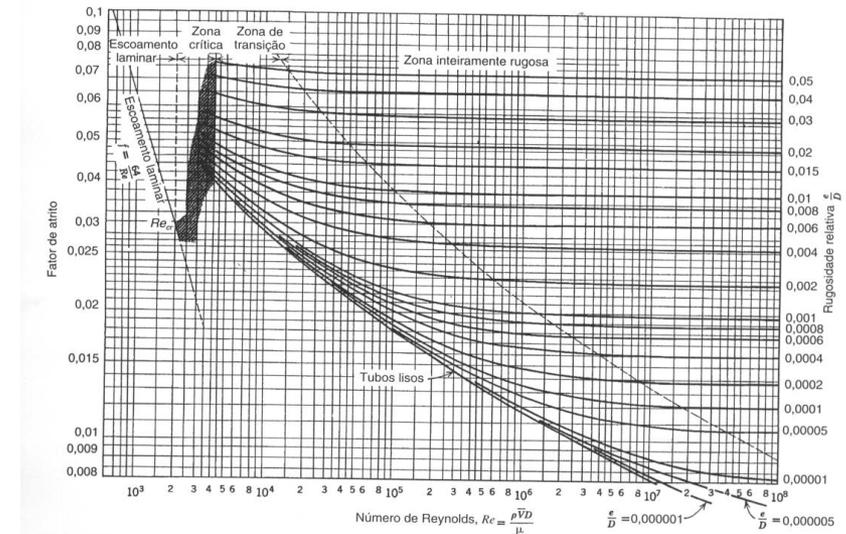
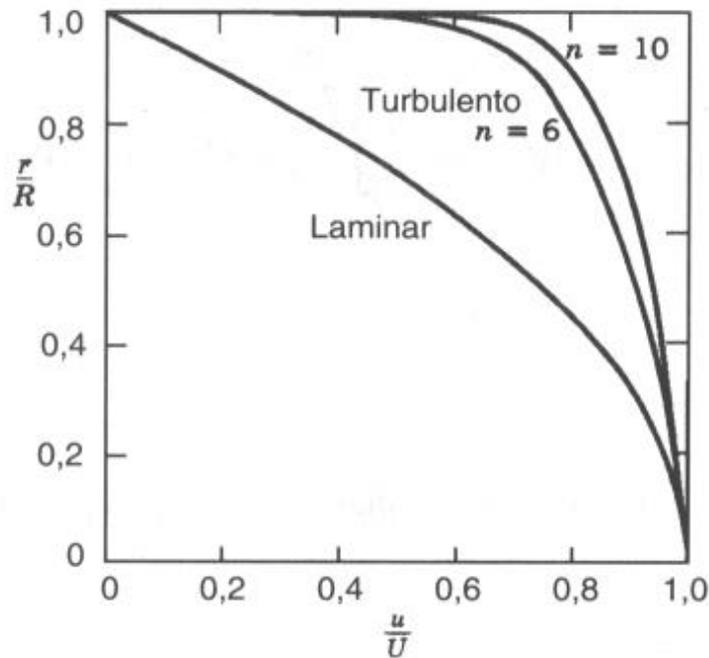
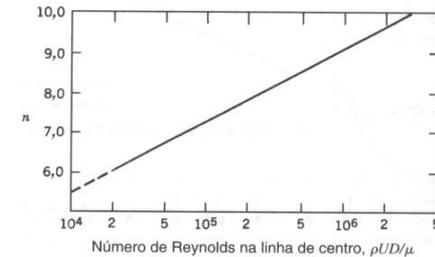
$$\frac{u}{u_{\max}} = 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 \quad f \text{ Re} = 64$$

Fator de atrito $f = \frac{-(\partial p / \partial x) D}{0,5 \rho u_m^2}$

turbulento

$$\frac{\bar{u}}{u_{\max}} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n}$$

$$\frac{u_m}{u_{\max}} = \frac{2 n^2}{(n + 1) (2n + 1)}$$

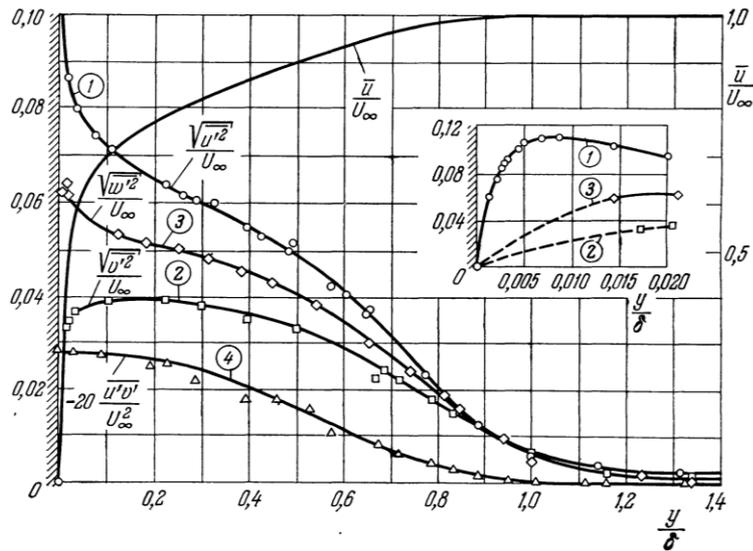


$$\frac{1}{f^{0,5}} = -2,0 \log \left(\frac{\epsilon / D}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re } f^{0,5}} \right)$$

Escoamento em duto circular desenvolvido

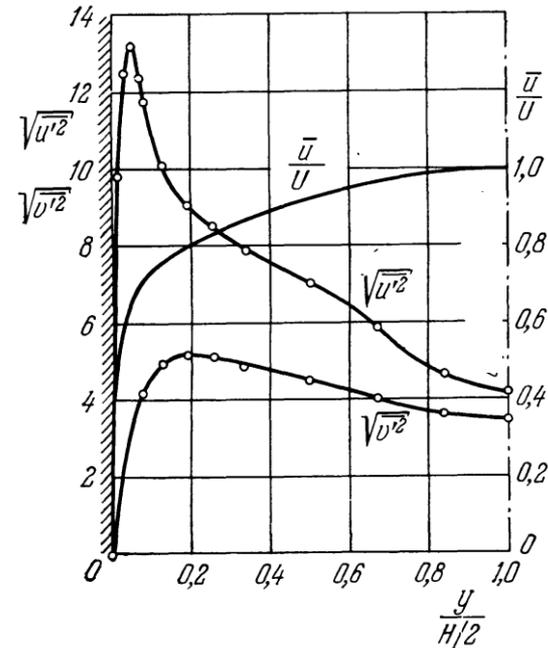
Influência do regime do escoamento

Perfil de intensidade turbulenta, típico de camada limite turbulenta



Klebanoff (1955)

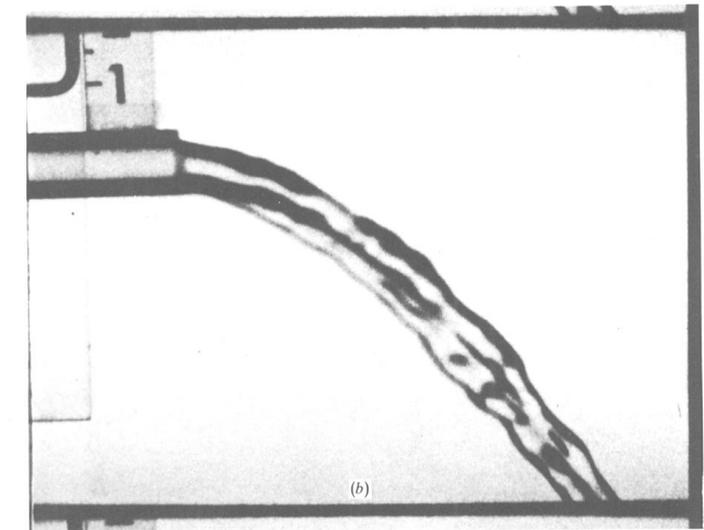
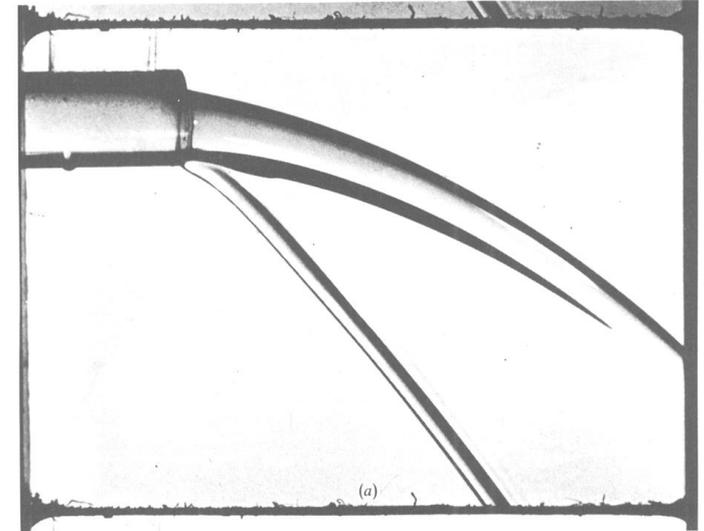
Perfil de intensidade turbulenta, típico de escoamento turbulento em canal



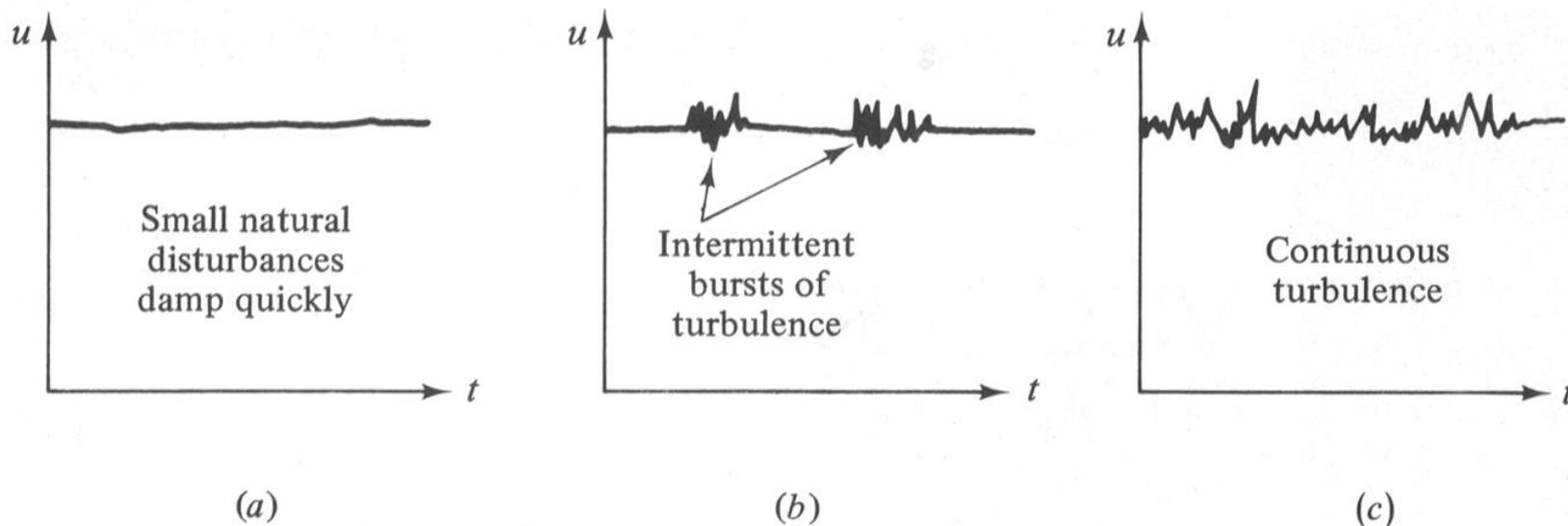
Reihardt (1938)

ESCOAMENTO VISCOOSO

- O escoamento viscoso pode se classificado em escoamento laminar ou turbulento. A diferença entre os dois está associada ao fato que no primeiro caso, temos transferência de quantidade de movimento a nível molecular e no segundo a nível macroscópico. Como consequência o escoamento laminar é “bem comportado”, (Fig. superior) enquanto o escoamento turbulento é “mal comportado” (Fig.inferior)



- Se o escoamento é laminar, eventuais perturbações serão amortecidas e desaparecerão (Fig. a). Durante a transição, picos esporádicos de turbulência surgirão (Fig. b). Durante o regime turbulento, o escoamento flutuará continuamente (Fig. c).



• A diferença no comportamento está associada com as forças que atuam no elemento de fluido. Quanto as forças viscosas dominam em relação as forças de inércia, o escoamento apresenta comportamento laminar. Quando as forças de inércia dominam, o escoamento se comporta como turbulento.

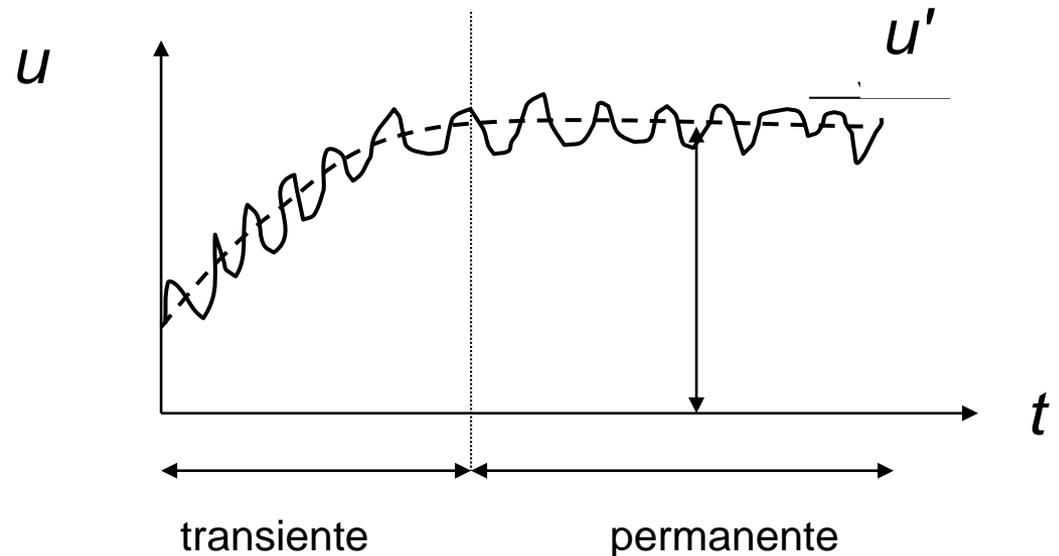
- As equações de conservação que regem o escoamento independem do regime de escoamento. Porém o regime turbulento é sempre tri-dimensional e transiente.
- As equações de conservação de massa e quantidade de movimento linear são não lineares e acopladas.
- Como o escoamento turbulento é transiente e tridimensional, a solução numérica destas equações traz muitas complicações porque características importantes dos escoamento turbulentos estão contidos nas recirculações que possuem apenas alguns milímetros em tamanho para escoamento com domínios de muitos metros.

-
- Mesmo o problema mais simples necessitaria uma malha muito fina.
 - Além disso, para captar a variação temporal dos turbilhões, passos de tempo muito pequenos são necessários.
 - Do ponto de vista prático, a solução direta das equações de conservação ainda não é viável. Surge então a necessidade de se utilizar modelos de turbulência.

-
- Alternativas para se analisar a turbulência:
 - uma teoria estatística para correlacionar as funções da turbulência
 - uma análise semi-empírica das quantidades médias turbulentas

- A análise estatística baseia-se no fato de que o escoamento turbulento pode ser descrito por um valor médio \bar{u} e mais uma flutuação u' (muitas vezes da ordem de 1% a 10% de \bar{u})

$$u = \bar{u} + u'$$



- Para o engenheiro, muitas vezes é suficiente conhecer o comportamento do valor médio.

- Note que com relação ao valor médio, podemos fazer a hipótese de regime permanente, pois

$$\partial \bar{u} / \partial t = 0$$

- Observamos ainda que se o vetor velocidade é dado por ,

$$\vec{V} = (\bar{u} + u') \vec{i} + (\bar{v} + v') \vec{j} + w' \vec{k}$$

podemos fazer a hipótese de 2-D com relação aos valores médios.

- Dessa forma, podemos simplificar bastante o problema. Desejamos então determinar o campo médio de velocidades. Neste caso, é preciso obter equações de conservação para essa grandeza.

- Atualmente existem basicamente três métodos para se analisar um escoamento turbulento, os quais serão descritos a seguir.
 - **DNS (Direct Numerical Simulation)**: cálculo de todas as escalas de comprimento da turbulência.
 - **LES (Large Eddy Simulation)**: cálculo dos turbilhões de grandes escalas, com uma modelagem dos de escala menor.
 - **RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)**: modelos da turbulência estatística baseado nas equações de Navier-Stokes médias no tempo.

- Pode-se classificar os métodos de acordo ao grau de modelagem e ao custo computacional como ilustrado na figura. Temos que a simulação de grandes escalas LES está entre os métodos estatísticos RANS e a simulação numérica direta DNS, sendo que este último é o que tem o maior custo computacional.

