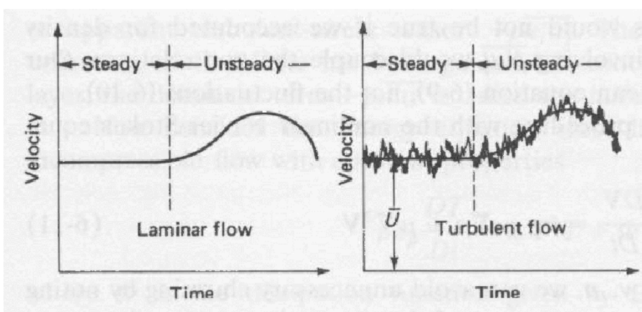
Características e Propriedades Gerais de Escoamentos Turbulentos:

´Aspectos Qualitativos´

Formação de água – Leonardo da Vinci

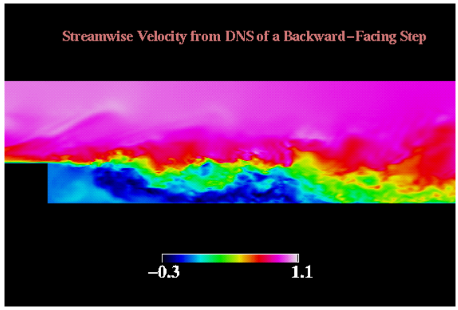
Turbulência: Características do Escoamento



Steady and Unsteady Laminar and Turbulent Flow

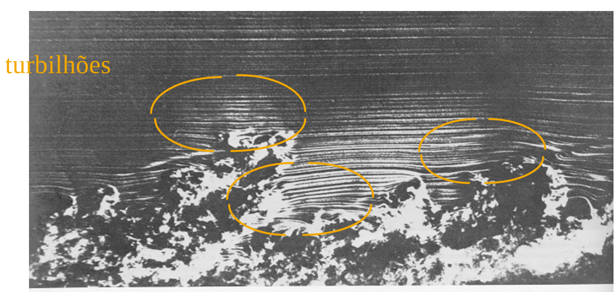
- **Irregularidade ou Flutuações:** **escoamento turbulento é aleatório isto é , não determinístico. A velocidade apresenta flutuações nas três direções, a pressão e temperatura também flutuam. O campo flutuante se superpõe sobre o valor médio de cada propriedade. Abordagem do fenômeno com métodos estatísticos.**

Turbulência: Características do Escoamento



- **<u>Aleatóriedade</u>: as variações das propriedade apresentam uma forma particular, não são “ruído branco”. Elas podem apresentar uma correlação entre sí que decai com o lapso de tempo ou de distância entre os sinais. Cada propriedade possui um determinado espectro contínuo de energia que cai a zero para turbilhões pequenos.**

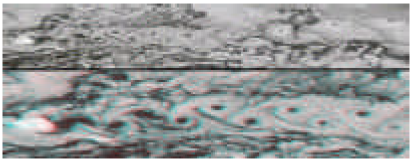
Turbulência: Características do Escoamento



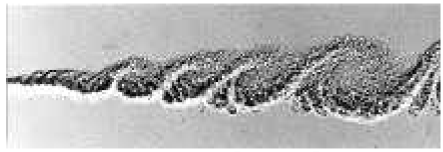
157. Side view of a turbulent boundary layer. Here a turbulent boundary layer develops naturally on a flat plate 3.3 m long suspended in a wind tunnel. Streaklines from a smoke wire near the sharp leading edge are illuminated by a vertical slice of light. The Reynolds number is 3500 based on the momentum thickness. The intermittent nature of the outer part of the layer is evident. *Photograph by Thomas Corke, Y. Guezennec, and Hassan Nagib.*

- **<u>Turbilhões</u>: são “pacotes” de fluido de diferentes tamanhos atingindo dimensões da escala macroscópica (diâmetro tubo, espessura da C.L.) a escala microscópica também conhecida por Kolmogorov. Por turbilhões entende-se o tamanho de estruturas coerentes observáveis no escoamento.**

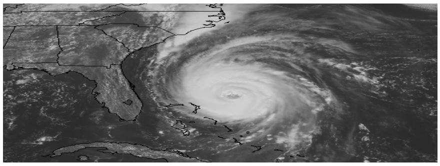
Estruturas Coerentes



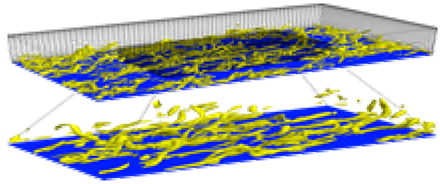
Atmosfera (nuvens) (a)



Jato livre (b)



Furacão (c)



Escoamento próximo a parede (d)

- Estruturas coerentes que ocorrem em escoamentos livres e também próximo de paredes.
- Estas estruturas são denominadas coerentes porque podem ser encontradas a jusante do escoamento com aproximadamente a mesma forma.

Estruturas Coerentes

- Elas chamam a atenção pelo seu caráter determinístico.
- Com freqüência elas podem ser representadas dinamicamente por mecanismos ‘quasi’ bi-dimensionais (jato livre p. exemplo (a)).
- As estruturas coerentes são transportadas pelo campo médio mantendo sua forma característica durante um período Tc maior que o período local de renovação dos turbilhões menores,
- Elas são também definidas como regiões do espaço onde num dado instante de tempo, apresentam um certo tipo de organização com alguma propriedade do escoamento (velocidade, vorticidade, pressão, densidade, temperatura, etc.)
- Estruturas coerentes são encontradas em escoamentos transicionais ou com baixo Reynolds onde a turbulência não está bem desenvolvida (Figs. (a), (b)) como também para escoamentos com turbulência desenvolvida (d).

Turbilhões ´eddies´

- Velocidade e pressão não são constantes num dado ponto do escoamento, seus valores flutuam.
- Não são moléculas do fluido que se deslocam aleatoriamente na direção do escoamento e ortogonal a ela mas ‘pacotes de fluido’ ou ‘macro-moléculas’ denominados ´turbilhões´.
- O tamanho dos turbilhões determina a escala da turbulência.

Turbulência: dimensões dos turbilhões

Os grandes turbilhões são responsáveis pelo transporte de momento e contaminantes

O tamanho dos grandes turbilhões pode ser da largura do escoamento.

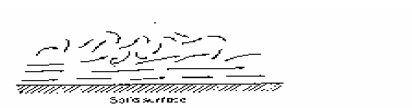
É esta escala que é relevante para análise da iteração da turbulência com o escoamento médio

- Visualização do jato no plano de simetria de um jato assimétrico de água. O Reynolds do jato é de aproximadamente 2300. A resolução espacial da foto é adequada para resolver até turbilhões da escala de Kolmogorov da metade para baixo da foto. (Van Dyke)

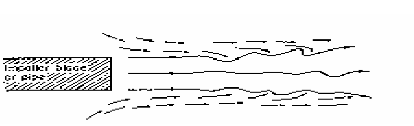
Turbulência: Manutenção

- **A turbulência não se mantêm por ela mesma mas depende do ambiente para obter energia.**
- **A produção de novos ‘turbilhões’ por meio de fornecimento de energia substitui aqueles perdidos pela dissipação viscosa.**
- **Uma fonte comum de energia para as flutuações de velocidade é a ‘deformação’ do campo de escoamento; presença de grad. vel. : dU/dy;**

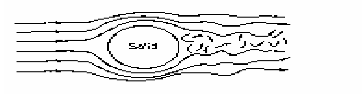
Formas de Introdução de Turbulência no Escoamento



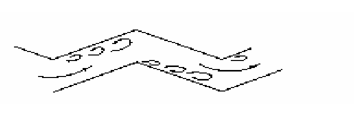
Fluido passando rapidamente sobre uma superfície sólida



Fluido sendo rapidamente ejetado (jato, pá de um rotor, etc) em um meio estacionário ou mais lento



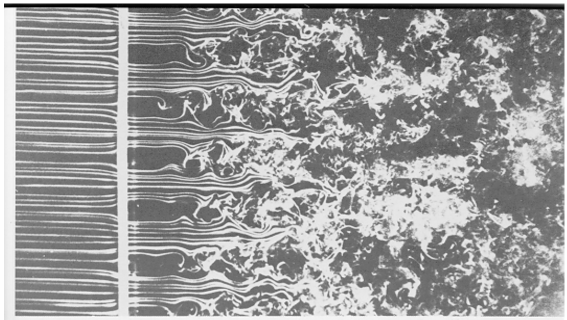
Produção de uma esteira por um objeto em movimento relativo ao fluido



Após formas que protundam o escoamento ou angularidades que induzem ao descolamento.

Decaimento da Turbulência

- Se a turbulência chega a um ambiente onde não há deformação ou outro tipo de fonte mantenedora, ela decai até desaparecer e o escoamento volta a ser laminar
- Exemplo: turbulência produzida por uma grade em um escoamento uniforme em túnel de vento.



152. Generation of turbulence by a grid. Smoke wires show a uniform laminar stream passing through a 1/16-inch plate with 3/4-inch square perforations. The Reynolds number is 1500 based on the 1-inch mesh size. Instability of the shear layers leads to turbulent flow downstream. *Photograph by Thomas Corke and Hassan Nagib*

Decaimento da Turbulência, cont.

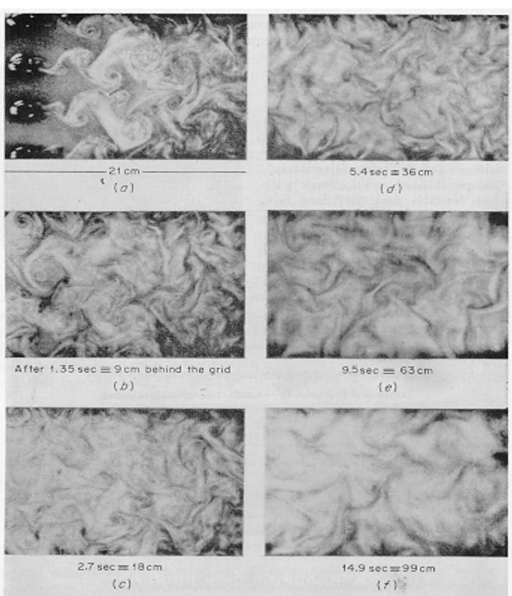
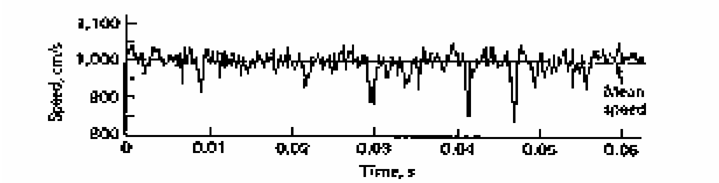


FIG. 1-5. Flow pattern behind a grid. $U = 6.65$ cm/sec, $M = 4.5$ cm, and $d = 1.5$ cm. (*Prandtl, L., Proc. 5th Intern. Congr. Appl. Mech.*, p. 340, 1938.)

- Enquanto que a fig. (a) mostra um padrão distinto e regular, os padrões das figs. subsequentes se mostram cada vez menos distintos. A medida que os turbilhões decaem os contornos ficam cada vez menos distintos.

Turbulência: Valores Médios & Flutuação



- A série temporal tirada de uma 'shear layer' exibe flutuações entre 5 a 10% do valor médio
- Uma análise padrão em turbulência separa a propriedade flutuante de seu valor médio temporal
- Considerando que u é a velocidade instantânea, seu valor médio é definido por:

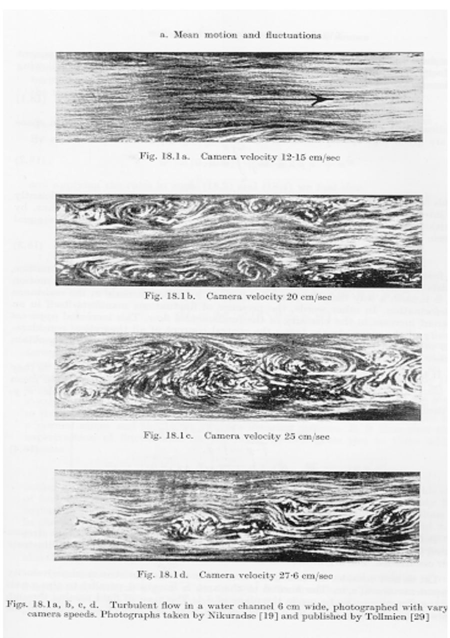
$$\overline{u} = \frac{1}{T}\int_{to}^{to+T} u \cdot dt$$

- A flutuação da velocidade é obtida da diferença entre o valor instantâneo e a sua média temporal:

$$u' = u - \overline{u}$$

- Se a integral acima é independente do valor inicial to, o escoamento é dito '<u>estacionário</u>'

O efeito da média no campo instantâneo



- (a) vel. dos turbilhões > vel. camara, observa-se apenas o campo médio.
- (b) vel. turbilhões próximos a parede ~ v da camara, observa-se turbilhões próximo parede.
- (c) vel. turbilhões longe parede ~v da camara, observa-se turbilhões no centro canal.
- (d) vel. camara ~ vel. turbilhões mais velozes, começa-se observar novamente o campo médio.
- <u>Conclusão:</u> o processo de média sempre filtra escalas (dimensões) características do escoamento turbulento

Turbulência: Momentos de um único ponto

- **Eles trazem informações de uma ou mais variáveis aleatórias para o ponto x = x0.**
- **Pela definição de u', seu valor médio é nulo. A magnitude da flutuação é seu valor quadrático médio (rms)**

$$\overline{u'^2}(\vec{x}) = \frac{1}{T}\int_{to}^{to+T} u'^2(\vec{x},t)\cdot dt$$

- **Pode-se definir a co-variança entre duas componentes de velocidade por:**

$$\overline{u'v'}(\vec{x}) = \frac{1}{T}\int_{to}^{to+T} u'(\vec{x},t)v'(\vec{x},t)dt$$

- **Se as integrais acima são independentes do valor inicial to, o escoamento é dito '<u>estacionário</u>'**

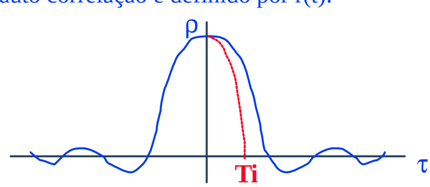
Turbulência: momentos entre dois pontos (tempo)

•Eles fornecem informações estatísticas relativas a distribuição espacial ou temporal do escoamento.
•A função de auto-correlação fornece a correlação entre componentes de velocidades medidas entre dois tempos diferentes, o coeficiente de auto-correlação é definido por r(t):

$$\rho(\tau) = \frac{\overline{u'(t)u'(t+\tau)}}{\overline{u'^2(t)}};$$

$$\rho(0) = 1 \ \&$$

$$-1 \le \rho(\tau) \le 1 \ \text{ desigualda de de Schwartz}$$



• O coeficiente de auto-correlação é freqüentemente utilizado para definir uma escala integral de turbulência, Ti , que fornece uma estimativa to intervalo de tempo onde a componente de velocidade u está correlacionada.

$$Ti = \int_0^\infty \rho(\tau)d\tau$$

• Ti também é conhecida como micro-escala de Taylor. Ela é muito pequena para caracterizar os grandes turbilhões e muito grande para caracterizar os pequenos turbilhões. Portanto, não vem sendo utilizada no desenvolvimento de modelos de turbulência

Turbulência: momentos entre dois pontos (espaço)

• O tensor de correlação espacial, Rij, fornece a correlação entre duas componentes de velocidade localizadas em duas posições espacial distintas.

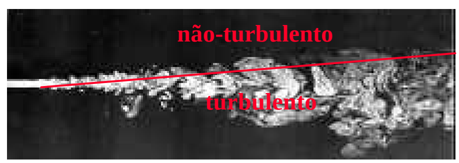
$$R_{i,j}(\vec{x},t;\vec{r}) = \overline{u'_i(\vec{x},t)u'_j(\vec{x}+\vec{r},t)};$$

• Uma das quantidades de particular interesse é a energia cinética turbulenta por unidade de massa, k, dada pela soma dos elementos da diagonal de R_{ij} quando r =0,

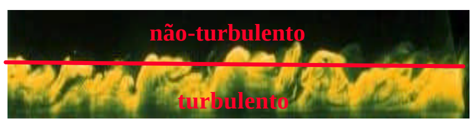
$$R_{i,i}(\vec{x},t;0) = \overline{u'^2_1(\vec{x},t)} + \overline{u'^2_2(\vec{x},t)} + \overline{u'^2_3(\vec{x},t)} = 2k[J/kg]$$

Turbulência: Intermitência

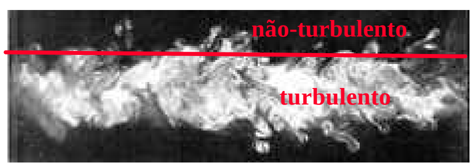
- O fenômeno de intermitência da turbulência está relacionado com a alternância das estruturas turbulentas no escoamento.
- A intermitência faz com que o escoamento hora se comporte como não turbulento e por outras vezes turbulento com flutuações.
- Isto é típico de fenômenos de camada limite
- Ela freqüentemente ocorre nos limites da camada limite



Jato livre



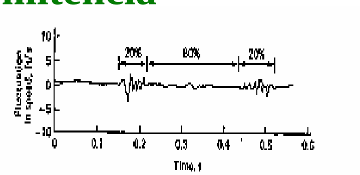
Placa plana



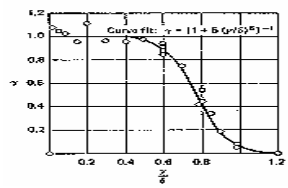
Esteira corpo 2-D

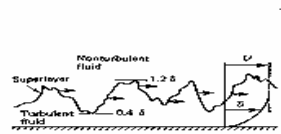
Turbulência: Intermitência

- A série temporal tirada de um jato exibe regimes intermitentes de turbulência .



- Fator de intermitência , g , é a razão entre o período de regime turbulento e o período total. Neste exemplo, g = 20%.
- A intermitência ocorre pq. a borda do jato é bem definida e 'serrilhada' e regiões turbulentas e não-turbulentas passam pela sonda sucessivamente.





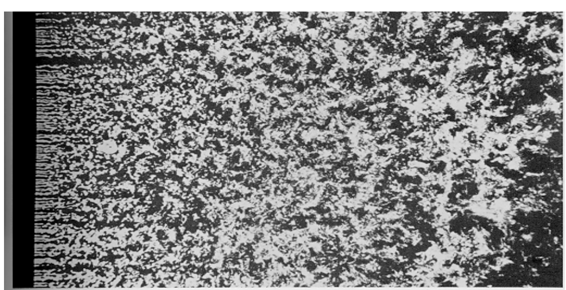
- O fator de intermitência depende da posição.
- Para uma placa plana, nota-se 100% p/ y/d < 0.4 e 0% para y/d > 1.2

Tipos de Escoamentos Turbulentos

- **Turbulência homogênea**: as correlações de velocidade e outras propriedades entre dois pontos <u>não dependem da posição absoluta dos pontos</u>, mas somente do espaçamento relativo entre eles

$$\overline{u'^2} \neq \overline{v'^2} \neq \overline{w'^2}$$

$$\overline{u'^2}(\vec{r}) = \text{constante, não depende posição}$$

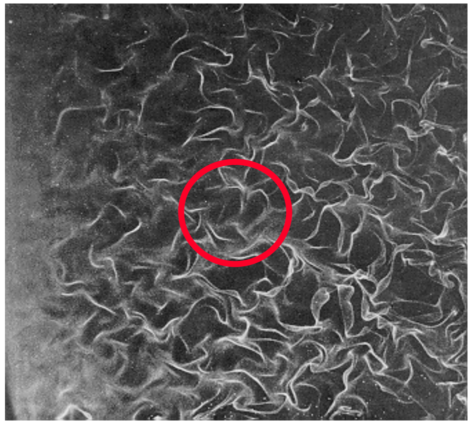


153. Homogeneous turbulence behind a grid. Behind a finer grid than above, the merging unstable wakes quickly form a homogeneous field. As it decays downstream, it provides a useful approximation to the idealization of isotropic turbulence. *Photograph by Thomas Corke and Hassan Nagib*

- Na prática é difícil produzir, mesmo em laboratório, turbulência homogênea, exceto para pequenas distâncias.

Tipos de Escoamentos Turbulentos: Isotropia

- **Turbulência isotrópica: Os valores médios das flutuações das velocidades em qualquer posição e para qualquer tempo são iguais:**



- **Isotropia pode ser verificada girando-se o circulo e observando a semelhança entre as figuras.**

Tipos de Escoamentos Turbulentos: Isotropia

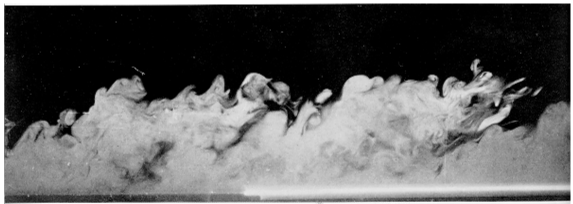
- **Turbulência isotrópica: as correlações de velocidade e outras propriedades entre dois pontos não dependem da posição absoluta dos pontos, nem de seu espaçamento relativo.**
- **Os valores médios das flutuações das velocidades em qualquer posição e para qualquer tempo são iguais:**

- **Se as flutuações são aleatórias no espaço, não há correlação entre as flutuações em diferentes direções:.**

$$\overline{u'^2} = \overline{v'^2} = \overline{w'^2}$$

$$\overline{u'v'} = 0$$

Medidas em uma Placa Plana



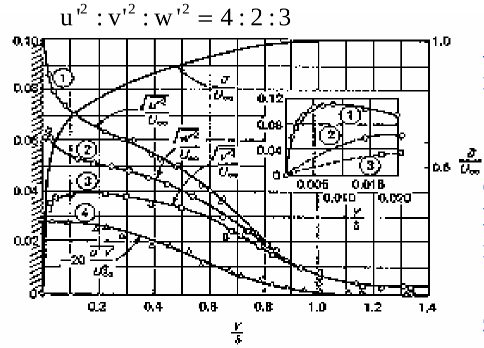
158. Turbulent boundary layer on a wall. A fog of tiny oil droplets is introduced into the laminar boundary layer on the test-section floor of a wind tunnel, and the layer then tripped to become turbulent. A vertical sheet of light shows the flow pattern 5.8 m downstream, where the Reynolds number based on momentum thickness is about 4000. *Falco 1977*

- **A turbulência é confinada a uma camada limite próxima a placa, tendo sua espessura aumentando com a distância do bordo de ataque.**
- **O gradiente de velocidade próximo a placa é alto e existe uma forte correlação entre as componentes de velocidade ao longo do escoamento e normal**
- **Definição de 'shear flow': escoamento que a deformação está presente somente em uma direção, assim o campo das velocidades médias é dado por:**

$$\bar{u} = a \cdot y, \quad \bar{v} = \bar{w} = 0$$

Medidas em uma Placa Plana

$$\overline{u'^2} : \overline{v'^2} : \overline{w'^2} = 4 : 2 : 3$$

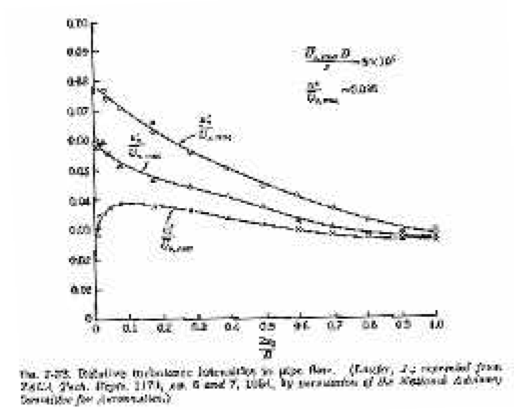


- **As flutuações atingem até 11% da vel. média. A presença da parede faz as flutuações terem magnitudes diferentes (anisotropia típica de 'shear flows')**
- **A existência de w'^2 mostra que mesmo para escoamentos 2-D turbulência é um fenômeno 3-D; neste caso porém, w' não influencia na vel. média**
- **Próximo parede (u',v',w') aproximam-se de zero pela condição de não-deslizamento.**

- **Turbulência exibe tendência à isotropia próximo ao limite externo da camada limite ; região onde o gradiente médio de velocidade é nulo..**
- **Definição de 'shear flow': escoamento que a deformação está presente somente em uma direção, assim o campo das velocidades médias é dado por:**

$$\bar{u} = a \cdot y, \quad \bar{v} = \bar{w} = 0$$

Medidas em um Tubo



O perfil médio da velocidade é quase plano à exceção da região próxima a parede onde apresenta um forte gradiente de velocidade e as flutuações u’v’ se correlacionam fortemente.

As flutuações atingem até 8% da vel. média.

- A presença da parede faz as flutuações terem magnitudes diferentes (anisotropia típica de ‘shear flows’)
- Próximo parede (u’,v’,w’) aproximam-se de zero pela condição de não-deslizamento.
- Turbulência exibe tendência à isotropia próximo ao centro do tubo; região onde o gradiente médio de velocidade é nulo.

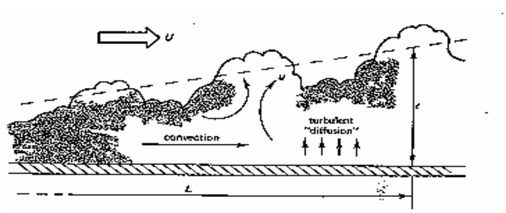


Figure 1.3. Length and velocity scales in a turbulent boundary layer. The time passed since the fluid at L passed the origin of the boundary layer is of order L/U.

Turbulência: Escalas

- A espessura da camada limite é da mesma ordem do tamanho do turbilhão l, além disto, C.L. cresce proporcionalmente ao produto da velocidade turbilhonar e do tempo característico:

$$\ell \approx \sqrt{\overline{u'^2}} \cdot t$$

- O intervalo de tempo da origem da C.L. até a posição L é tido como escala de tempo convectiva:

$$T \approx L/\overline{U}$$

- De modo análogo, a escala de tempo devido a difusividade turbilhonar é:

$$t \approx \ell \Big/ \sqrt{\overline{u'^2}}$$

- Igualando-se as escalas de tempo tem-se que para C.L. turbulenta, a razão de comprimentos é proporcional à razão de velocidades:

$$\frac{\ell}{L} \approx \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{\overline{U}}$$

Teoria de Kolomogorov (1941)

- O campo turbulento de velocidades pode ser representado por turbilhões de diferentes tamanhos.
- A energia entra no sistema para produzir os grandes turbilhões.
- A teoria de Kolmogorov baseia-se na hipótese que os grandes turbilhões alimentam de energia os turbilhões menores e estes por sua vez transferem energia para turbilhões menores ainda.
- Este processo resulta numa transferência de energia na forma de cascata dos turbilhões maiores para os menores.

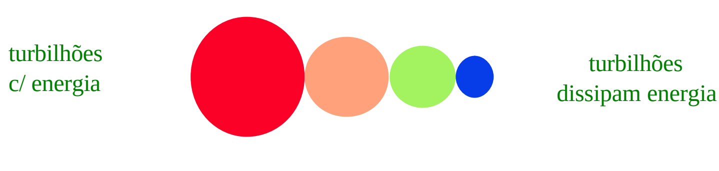
Pequenas Escalas & Cascata de Energia

• Para turbilhões de pequenas dimensões, a viscosidade tende a suavizar e/ou dissipar suas flutuações de velocidade.

• A geração de turbilhões c/ pequenas escalas é devido aos mecanismos não-lineareas da eq. movimento.

• A viscosidade previne que sejam criados turbilhões infinitezimais dissipando a energia dos turb. peq. em calor.

• Pode-se pensar que o escoamento turbulento por ter c/ Re alto o efeito da viscosidade seja desprezível. Ao contrário, os termos não-lineares da Eq. N-S atuam criando turbilhões cada vez menores até que estes sejam dissipados pela viscosidade.



Pequenas Escalas & Cascata de Energia

• **Turbilhões de escala intermediária servem como ponte p/ a energ. cinética das grandes escalas ser transmitida p/ as pequenas escalas e dissipar em energia térmica. Os turbilhões intermediários recebem energia dos turbilhões maiores e repassam aos turb. de escala menor**

"Big-size whirls have little whirls
that fed on their velocity
Little whirls have lesser whirls
and so on to viscosity"

• **A cascata de energia faz com que os escoamentos turbulentos, apesar de ocorrerem a Re elevados, possuem uma considerável dissipação de energia.**

O Número de Onda k

- **Considere o campo das flutuações de velocidade periódico no espaço com período L, L ® ¥ , de tal modo que u(x+L, t) = u(x,t)**
- **Neste caso poderemos representar o campo de velocidades no espectro dos números de onde por meio de séries de Fourier,**

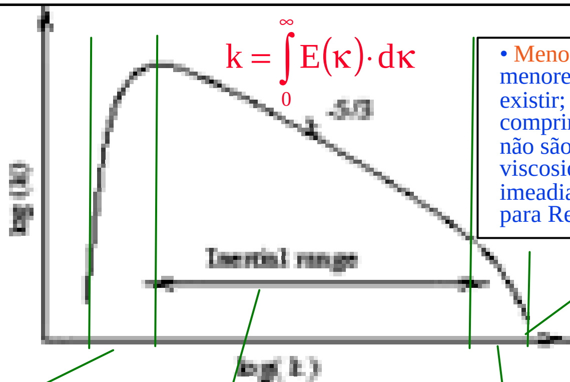
$$u(x,t) = \sum_{k} e^{ik\cdot x}\,\hat{u}(k,t)$$

- **Onde û(k,t) são os coeficientes da série, k é o número de onda e a exponencial complexa representa: $e^{ikx} = \cos(kx) + i\sin(kx)$.**
- **Como u(x,t) é uma função real, o produto e^{ikx} .û(k,t), também é de tal modo que a representação de u(x,t) passa a ser:**

$$u(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \hat{u}(k_i,t)\cdot\cos(k_i x) \quad \text{onde} \quad k_i = \frac{2\pi\cdot i}{L}$$

- **Sendo k1 = 2p/L o menor número de onda.**
- **Os números de onda possuem dimensão de (1/m) quanto maior o número de onda menor é a escala do turbilhão que ele representa!**

Espectro Energia Cinética Turbulenta E(k) em função do número de onda



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

• Menores turbilhões: (lk), são os menores turbilhões que podem existir; turbilhões com comprimento menor que (lk) não são formados porque a viscosidade dissipa-os imeadiatamente. Eles ocorrem para Re=u'lk/ν ≅ 1

• Maiores turbilhões: representam +/- 20% da energia cinética turbulenta. São anisotrópicos, i.e., dependem da orientação do escoamento e possuem um tempo de vida maior; Re=u'l/ν >>1

• Turbilhões médios: (le), contêm a maior parcela da energia cinética turbulenta.

• Turbilhões pequenos: (ld), dissipam energia cinética por meio da ação da viscosidade. Note que (ld) diminui e dissipação aumenta. A energ. cin. destes turbilhões é pequena mas eles são constantementes 're-energizados' pela transf. de momento dos grandes turbilhões. A taxa de dissipação máx. ocorre para Re=u'ld/ν ≅ 8 - 10

A Lei dos (– 5/3) de Kolmogorov

- **Toda energia injetada nos turbilhões das grandes escalas é dissipada pelos turbilhões nas pequenas escalas.**
- **A taxa de dissipação de energia,** e**, é um importante parâmetro que controla o fluxo de energia injetado das grandes escalas para as pequenas escalas (n. de ondas)**
- **Kolmogorov propôs que o espectro de energia cinética turbulenta na faixa inercial,** k>k**i, depende somente de** e **e** k**.**

$E(\kappa) = f(\varepsilon, \kappa)$ onde

e - é a taxa de dissipação energia; L^2/T^3

? - é o n. de onda; 1/L

$E(\kappa)$ - é o espectro en. cinética, L^3/T^2

utilizando o teorema π Buckingham

$$E(\kappa) = C_\kappa \varepsilon^{2/3} \kappa^{-5/3}$$

Outro soneto:

'A flea (eddy) has smaller fleas (eddies) that on him byte (drain energy); and these have smaller yet to bite (drain energy); them, and so proceed ad infinitum'

Isotropia das Pequenas Escalas ® grandes n. onda

- Em geral os grandes turbilhões são anisotrópicos e são influenciados pelas condições de contorno do escoamento.
- Kolmogorov argumentou que as direções e tamanhos preferenciais dos grandes turbilhões são diminuem no processo caótico de redução de escala onde a energia é transferida para os turbilhões menores e menores até dissipar…
- Kolomogorov propõe que para altos números de Reynolds, os turbilhões com pequena escala são estatisticamente isotrópicos.

Pequenas Escalas: Kolmogorov

• A dissipação de energia é proporcional à energia contida nos turbilhões de grande escala; isto é, produção turbulência associada grande escala (l), dissipação à pequena escala (lk).

• Energia Cinética p/ unidade massa............ $\overline{u'^2_\ell}$ **(J/Kg)**

• Dissipação.. $\varepsilon \approx \left(\overline{u'^2_\ell}\right)\left[\left(\overline{u'^2_\ell}\right)^{1/2}\Big/\ell\right]$ **(W/kg)**

• Escala tempo grandes turbilhões................ $t \approx \ell \Big/ \sqrt{\overline{u'^2_\ell}}$ **(seg)**

• Para qualquer turbilhão de tamanho l , l > lk, ele absorve energia das grandes escalas e transfere p/ as menores numa taxa

$$\left(\overline{u'^2_\lambda}\right)^{3/2}\Big/\lambda \approx \left(\overline{u'^2_\ell}\right)^{3/2}\Big/\ell \Rightarrow \overline{u'^2_\lambda} \approx \overline{u'^2_\ell}\cdot(\lambda/\ell)^{2/3}$$

Pequenas Escalas: Kolmogorov

A velocidade dos turbilhões para escala ℓ são menores que os da escala l por um fator (ℓ /l)^(1/3). A redução no comprimento e na velocidade traz uma redução no Re do turbilhão:

$$\mathrm{Re}_\lambda = \frac{\sqrt{\overline{u_\lambda'^2}}\cdot\lambda}{\nu} \approx \left[\sqrt{\overline{u_\ell'^2}}\cdot(\lambda/\ell)^{\frac{1}{3}}\right]\cdot\frac{\lambda}{\nu} = \underbrace{\frac{\sqrt{\overline{u_\ell'^2}}\cdot\ell}{\nu}}_{\mathrm{Re}_\ell}\cdot\left(\frac{\lambda}{\ell}\right)^{\frac{4}{3}}$$

• O menor turbilhão, persistindo ação dissipativa da viscosidade, é aquele com Re = 1; para Re inferiores a ação das forças viscosas suplantam as inerciais e as flutuações de viscosidade seriam imediatamente dissipadas. O menor comprimento, ℓ = lk ;

$$\mathrm{Re}_{\ell_k} \approx 1 \rightarrow \frac{\ell}{\ell_k} \approx \mathrm{Re}_\ell^{3/4}$$

Pequenas Escalas: Kolmogorov em termos da função disspação, ε

$$\ell_k \approx \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{4}}$$

• A velocidade característica para os menores turbilhões:

$$\mathbf{Re}_{\ell_k} \approx \mathbf{1} \rightarrow \mathbf{u_k} \approx \frac{\nu}{\ell_{\mathbf{k}}} \approx (\nu\varepsilon)^{\frac{1}{4}}$$

• A escala de tempo dos menores turbilhões:

$$\tau \approx \frac{\ell_{\mathbf{k}}}{\mathbf{u_k}} \rightarrow \tau \approx \left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Relações entre Escalas

• As dimensões características dos menores turbilhões, lk, uk e τ (comprimento, velocidade e tempo) são também referidas por escalas de Kolmogorov.

• O fato dos menores turbilhões possuírem Re=1 ilustra que em escoamentos turbulentos a dissipação viscosa se auto-ajusta a energia disponível regulando o comprimento das escalas!

Relações entre as escalas: pequena/grande

$$\left(\ell_k/\ell\right) \approx \left(\sqrt{u'^2_\ell}\,\ell/\nu\right)^{-3/4} = \mathrm{Re}_\ell^{-3/4}$$

$$\left(\sqrt{u'^2_k}\Big/\sqrt{u'^2_\ell}\right) \approx \left(\sqrt{u'^2_\ell}\,\ell/\nu\right)^{-1/4} = \mathrm{Re}_\ell^{-1/4}$$

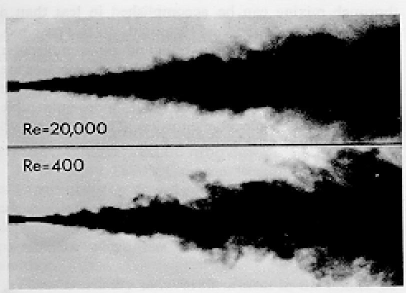
$$\left(\tau/t\right) \approx \left(\sqrt{u'^2_\ell}\,\ell/\nu\right)^{-1/2} = \mathrm{Re}_\ell^{-1/2}$$

• As relações mostram que o comprimento, a velocidade e o tempo dos menores turbilhões é muito menor que aqueles dos grandes turbilhões. Esta diferença aumenta a medida que Re aumenta.

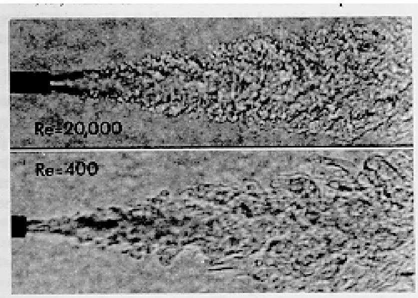
• O n. Reynolds associado com os maiores turbilhões determina o quão pequeno serão os menores turbilhões quando comparados entre sí!

Relações entre Escalas

•A principal diferença entre dois escoamentos turbulentos com diferentes Re mas com as mesmas características nas grandes escalas é o tamanho dos pequenos turbilhões.



7. Turbulent jets showing that the Reynolds number does not much affect the appearance, so long as it is sufficiently large that the jet is indeed turbulent. The upper jet has a Reynolds number 50 times that of the lower.



8. Shadowgraphs of the jets shown in Fig. 7. Note how much finer grained is the structure in the high-Reynolds-number jet than that in the low-Reynolds-number jet.

Uso da Lei de Kolmogorov

- **A lei de Kolmogorov (-5/3) tem mínima utilização em modelos ‘convencionais’ de turbulência: algébricos, duas equações e transporte tensor de Reynolds,**
- **Entretanto, ela é de central importância em DNS e LES.**
- **Esta lei é tão estabelecida que qualquer método DNS ou LES deve ser capaz de reproduzi-la.**
- **Ela também fornece informações sobre a física da turbulência, suas escalas e permite projetar filtros para modelos espectrais.**

Qual é o Requerimento de Malha para Simulações DNS?

- **Simulações DNS devem ser capazes de resolver TODAS as escalas presentes no campo!**
- **De tal forma que a malha espacial e temporal deve ter dimensões compatíveis para capturar todos os tamanhos de turbilhões.**
- **O tamanho da malha é proporcional ao cubo da razão entre as escalas inercial e dissipativa, que por sua vez é proporcional a $Re^{(9/4)}$**

$$\left(\ell/\ell_k\right) \approx Re_\ell^{3/4} \Rightarrow \left(\ell/\ell_k\right)^3 \approx Re_\ell^{9/4}$$

- **Já a malha do tempo é proporcional a $Re^{(1/2)}$**

$$\left(t/\tau\right) \approx Re_\ell^{1/2}$$

- **Onde Rel é dado por**

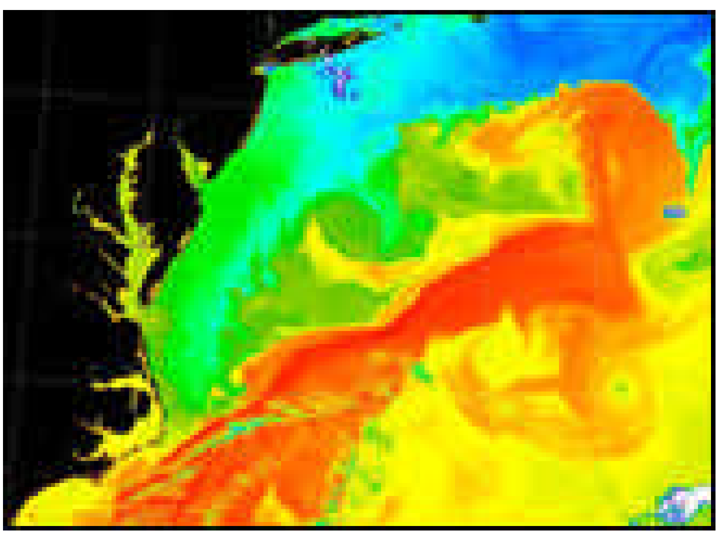
$$Re_\ell = \frac{u_\tau \ell}{\nu} \quad \text{onde} \quad u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$$

Tamanho da Grade e Passo de Tempo p/ DNS

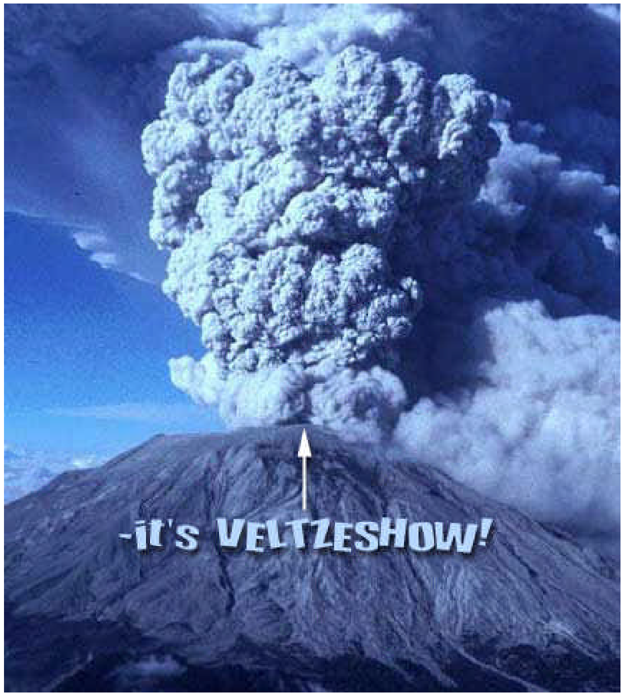
- **As estimativas abaixo foram extraídas de Wilcox.**
- **Elas referem-se a um canal plano com altura H realizado experimentalmente por Laufer (1951) para ReH de 12300, 30800 e 61600 além de Comte-Bellot (1961) p/ ReH de 230000.**

Re_H (U*H/n)	Re_t (u_t*H/n)	N_{DNS}	Time-Steps
12300	360	$6.7\ 10^6$	32000
30800	800	$4.0\ 10^7$	47000
61600	1450	$1.5\ 10^8$	63000
230000	4650	$2.1\ 10^9$	114000

Analise a diversidade dos tamanhos dos turbilhões
'Gulf Stream Temperature Eddies'

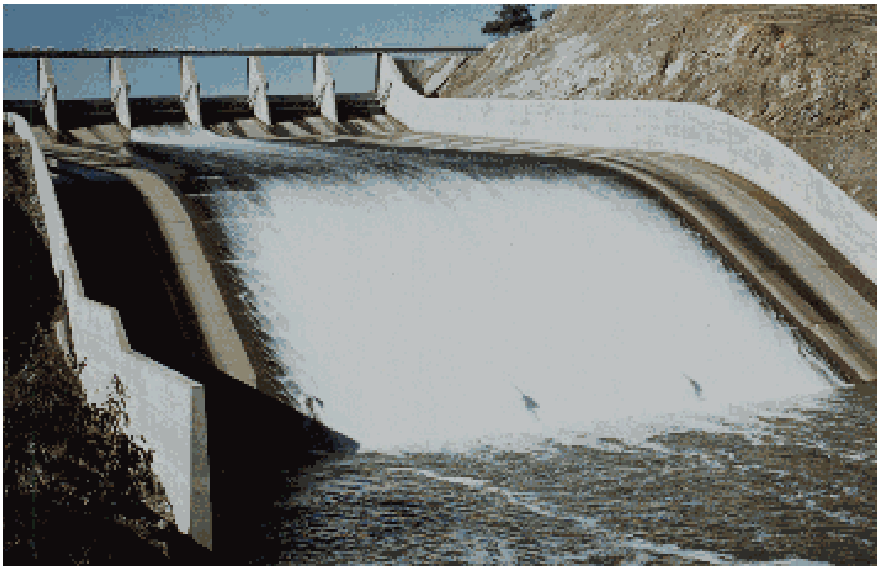


Analise a diversidade dos tamanhos dos turbilhões
'Vulcano'



Analise a diversidade dos tamanhos dos turbilhões
'Oil Fire'

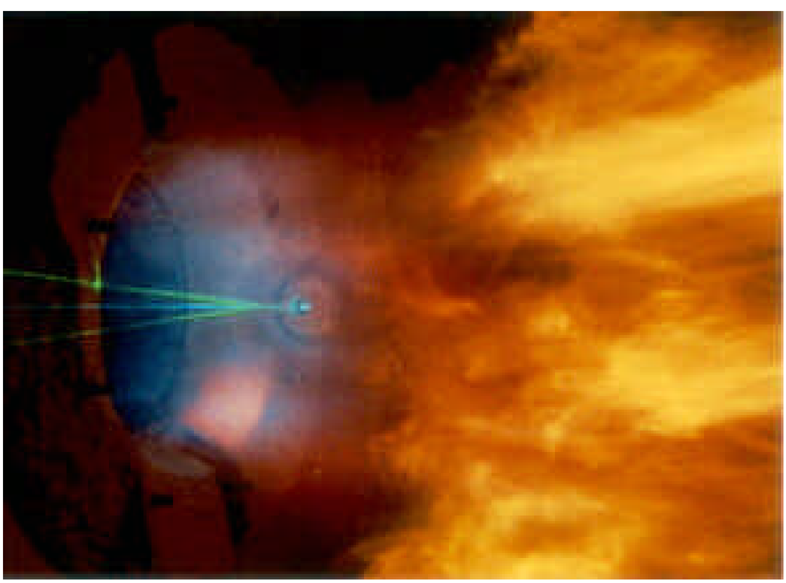
Analise a diversidade dos tamanhos dos turbilhões
'Spill way'



Analise a diversidade dos tamanhos dos turbilhões
'Challenger take-off'

Analise a diversidade dos tamanhos dos turbilhões
'Oil Flame from burning tank'

Analise a diversidade dos tamanhos dos turbilhões
'Gas flame with lda traversing measurement'



Analise a diversidade dos tamanhos dos turbilhões
'Gas flame transitional flow'