

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO À TURBULÊNCIA NOS FLUIDOS

### 1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A turbulência é um regime de operação de qualquer sistema dinâmico cuja operação pode ser caracterizada por um número de graus de liberdade suficientemente elevado. Entre os sistemas dinâmicos encontram-se os escoamentos de fluidos, para os quais, alguns exemplos são apresentados e discutidos abaixo, de acordo com suas características.

Numa tentativa de classificar os escoamentos encontrados tanto na natureza quanto em aplicações práticas, apresentam-se a seguir uma divisão dos mesmos quanto aos seus aspectos físicos e as formas de desenvolvimento.

#### 1.1.1 Escoamentos Cizalhantes Livres

São os escoamentos que se desenvolvem sem a interferência de paredes ou obstáculos, apesar de que suas origens podem estar ligadas à passagem do escoamento sobre corpos submersos, à expansão na forma de jatos, à união de correntes de diferentes velocidades.

Na figura abaixo tem-se a ilustração de uma esteira de Von-Karman (Figura 1.1(a)) que se forma na região a jusante de um cilindro circular. Na Figura 1.1(b) tem-se um escoamento de tipo jato circular cuja origem está ligado ao processo de expansão de um escoamento originalmente confinado em um duto. Observa-se instabilidades, inicialmente bidimensionais, de tipo Kelvin-Helmholtz, as quais são tridimensionalizadas e se degeneram em turbulência. Na Figura 1.1(c) tem-se uma camada de mistura em desenvolvimento espacial, formada por instabilidades de tipo Kelvin-Helmholtz, as quais são transportadas tridimensionalmente, dando origem a turbulência. Este escoamento se forma pela junção de duas correntes de velocidades médias diferentes, separadas originalmente por uma placa intermediária. Na Figura 1.1(d) tem-se uma camada de mistura em desenvolvimento temporal, formada no interior da camada limite atmosférica, resultado da aproximação de correntes de velocidades diferentes. Novamente tem-se a presença de instabilidades de Kelvin-Helmholtz

que se desenvolvem temporalmente. Observam-se presença de um vilarejo abaixo a este fenômeno, servindo de referência para sua dimensão. Na Figura 1.1(e) tem-se um escoamento do tipo ondas de Lee, geradas pelo processo de relaminarização de uma esteira turbulenta formada à jusante de uma cadeia montanhosa situada nos Himalaias. O efeito de estratificação estável do ar atmosférico, superposta a esteira turbulenta, resulta na formação de ondas internas cuja energia provém do escoamento originalmente turbulento.

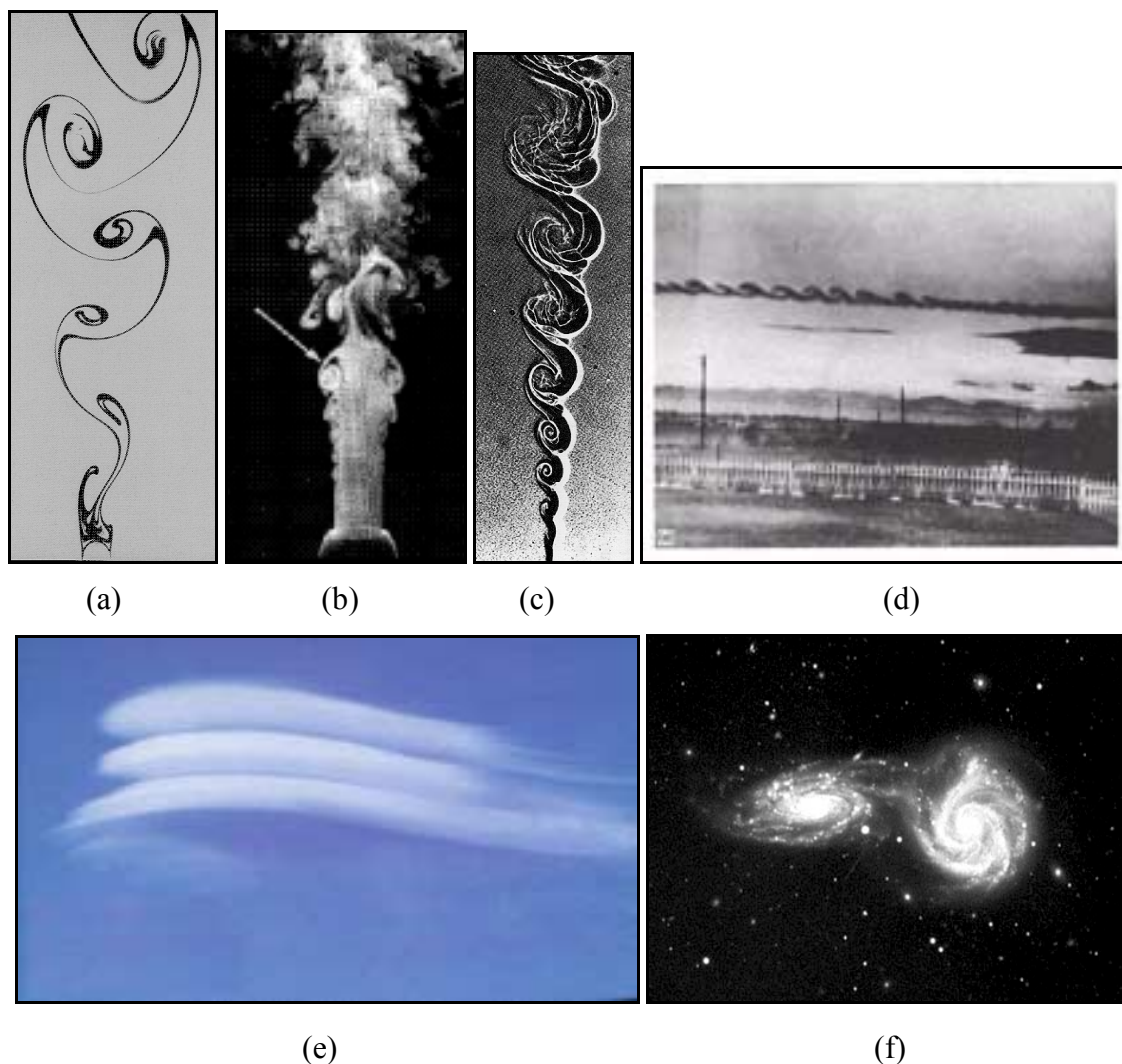


Figura 1.1. Escoamentos cizalhantes livres – instabilidades de Kelvin-Helmholtz: (a) esteira de Von Karman; (b) jato circular; (c) camada de mistura em desenvolvimento espacial; (d) camada de mistura em desenvolvimento temporal; (e) ondas de Lee, formadas à jusante de uma montanha dos Himalaias; (f) aparelhamento turbilhonar de duas galáxias.

Finalmente, na Figura 1.1(f) visualiza-se um interessante possível aparelhamento de duas galáxias, as quais se apresentam na forma de turbilhões com o mesmo sentido de rotação

. Dependendo das condições prévias de movimento, o aparelhamento poderá ou não ocorrer, numa escala de tempo astronômica. Estes são, portanto, os escoamentos cizalhantes livres que podem ser encontrados a nível industrial, e controlados mecanicamente, e também a nível de fenômenos puramente naturais, os quais aparecem sem a intervenção humana.

### 1.1.2 Escoamentos Externos

São escoamentos que acontecem sobre superfícies ou obstáculos submersos. Na Figura 1.2(a) tem-se um escoamento sobre um aerofólio, onde se observa a formação de camadas limite, com descolamento na parte superior, deixando uma esteira turbilhonar complexa na região à jusante. Na Figura 1.2(b) observa-se a camada limite formada por o escoamento sobre uma placa plana. Na Figura 1.2(c) temos o escoamento sobre um cilindro rotativo aquecido. O escoamento é resultado dos processos de convecção natural e mista combinadas.

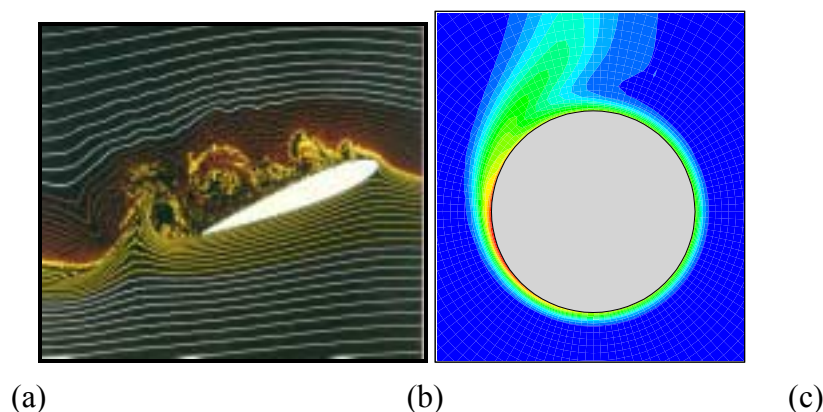


Figura 1.2. Escoamentos externos: (a) camada limite sobre aerofólio; (b) camada limite sobre uma placa plana; (c) escoamento gerado por convecção mista sobre um cilindro rotativo aquecido.

### 1.1.3 Escoamentos Internos

Os escoamentos internos simples são aqueles que se desenvolvem no interior de condutos diversos com a presença de instabilidades que aparecem no interior da camada limite. Fisicamente acontece algo muito importante do ponto de vista prático: os efeitos viscosos junto às paredes. Normalmente, toda a energia cinética consumida pelos efeitos viscosos deve ser repostada às custas da energia de pressão. Finalmente, a pressão cai e a energia cinética permanece constante se o tubo tem área constante.

### 1.1.4 Escoamentos Complexos

Os escoamentos complexos se caracterizam pela presença de instabilidades de natureza física e de origens diferenciadas, as quais, interagindo entre si, caracterizam os escoamentos que não podem ser classificados como os anteriores e sim como complexos.

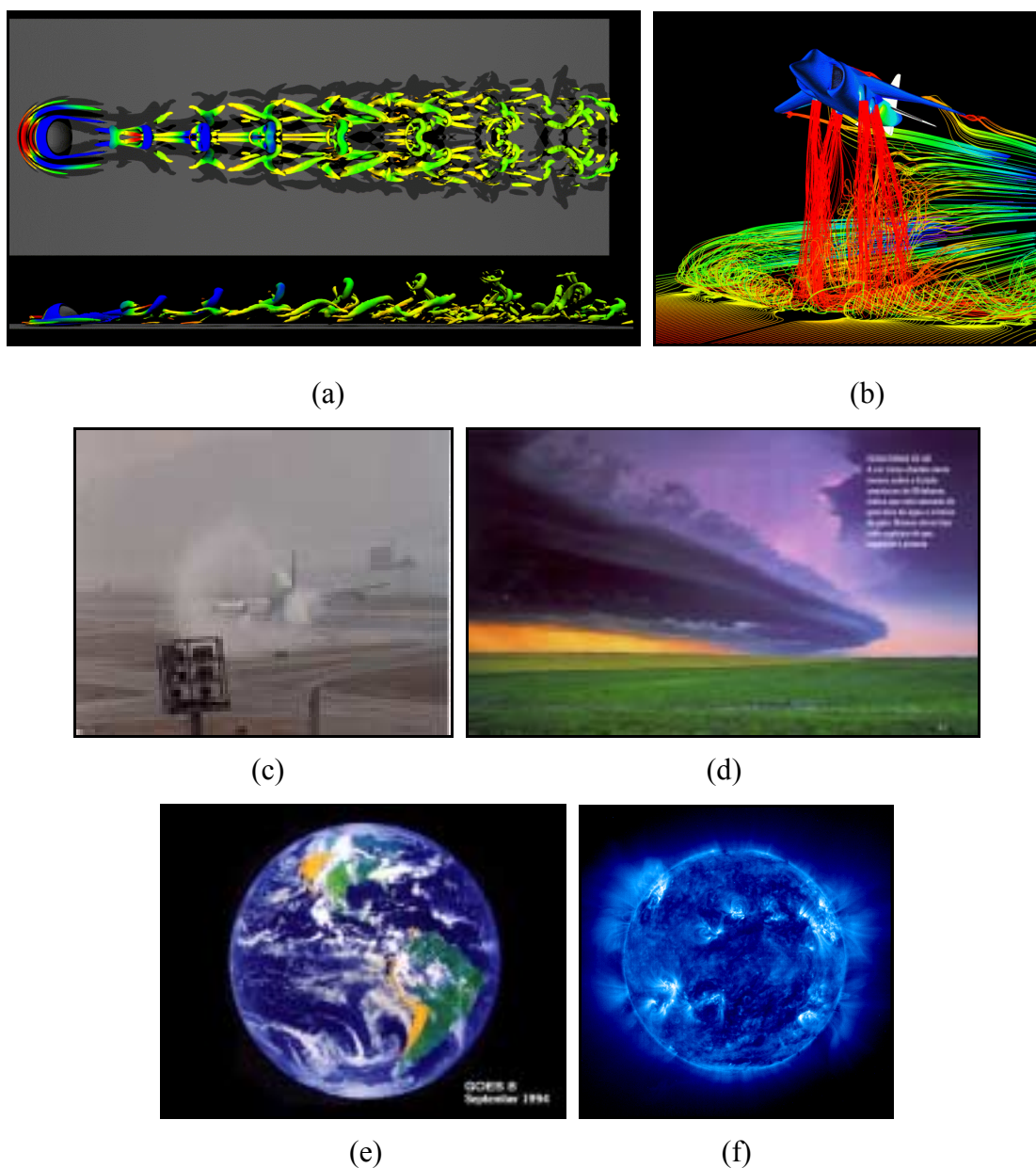


Figura 1.3. Escoamentos complexos: (a) escoamento sobre um hemisfério; (b) escoamento gerado pelas turbinas de um avião militar; (c) escoamento gerado nas vizinhanças de um avião comercial; (d) início de formação de um tornado – supercélula convectiva; (e) turbilhões atmosféricos; (f) escoamento da massa gasosa que compõe a atmosfera solar.

Nas Figuras 1.3 (a)-(f) tem-se alguns exemplos desta classe de escoamentos. Na Figura 1.3(a) (Henry M. Tufo, imagem de domínio público) ilustra-se o escoamento externo a um hemisfério colado sobre uma placa plana, interagindo com uma camada limite. Na Figura 1.3(b) observa-se a interação do escoamento externo a um avião com os jatos criados pelas turbinas do mesmo. Na próxima Figura (1.3(c)) vê-se um turbilhão formado à jusante de um avião em aterrissagem forçada, também neste caso ocorre uma interação entre o escoamento externo e a esteira formada pela aeronave. Nas figuras seguintes tem-se três tipos de escoamentos sobre a terra e sobre o sol: uma supercélula convectiva que precede a formação de um tornado (Figura 1.3(d)), e uma vista geral do escoamento sobre a terra, mostrando estruturas turbilhonares complexas (Figura 1.3(e)) e o escoamento sobre o sol (Figura 1.3(f)), o que fornece uma noção da complexidade deste escoamento.

No entanto, a turbulência não é propriedade apenas dos sistemas ligados aos escoamentos. Pode-se encontrar uma série de exemplos espetacularmente turbulentos, tais como: sistema social e político de um país e sistema de migração de populações do campo para as cidades e vice-versa.

Como aplicações, cita-se em seguida alguns exemplos mais familiares. Nos processos químicos, interessa-se por acelerar as reações químicas através turbulência. Interessa-se por maximizar um processo de troca de calor, pois a difusão turbulenta é muitas vezes mais importante que a difusão molecular. Em problemas de termohidráulica, via de regra os dispositivos mecânicos inseridos para aumentar a troca de calor implica também em aumento de perda de carga. Os efeitos de estratificação em densidade sobre a turbulência promovem a geração de ondas internas de gravidade, como ilustrado na Figura 1.4.

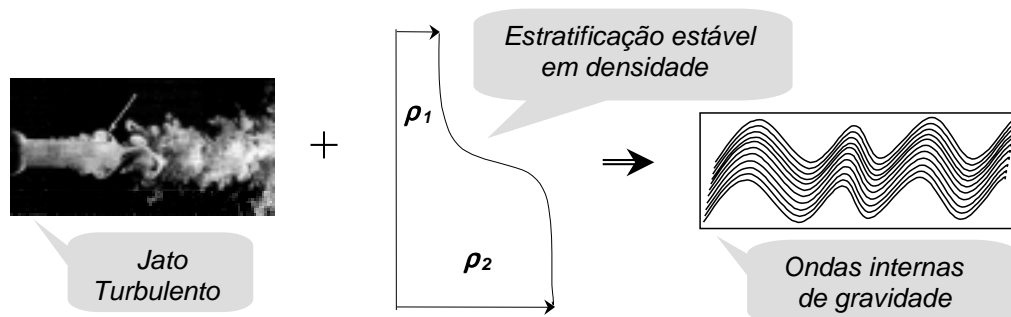


Figura 1.4. Esquema ilustrativo do processo de geração de ondas internas a partir da superposição de estratificação estável sobre um escoamento turbulento.

Estas ondas podem solicitar mecanicamente de forma importante as estruturas delimitantes – por exemplo, as solicitações que aparecem na cuba de um reator nuclear podem conduzir a falhas comprometedoras. Os turbilhões atmosféricos, a esteira turbilhonar sobre a terra, criada pelo chamado vento solar e o movimento das galáxias são outros exemplos espetaculares de aplicações.

## 1.2. NATUREZA DA TURBULÊNCIA

Como já comentado, observa-se a presença de turbulência numa vasta gama de problemas práticos. No estado atual do conhecimento sobre a turbulência, qualquer tipo de definição seria incompleta e pouco representativa deste fenômeno. Na melhor das hipóteses pode-se caracterizá-lo à luz da compreensão atual. Entre todas as suas características destacam-se aqui as mais importantes:

- **Irregularidade:** os escoamentos turbulentos são de difícil predição determinística e o uso de ferramentas estatísticas é atualmente a única forma de análise. Neste sentido fala-se de um processo randômico, ficando, no entanto a questão se seria um processo puramente randômico. Existem aqueles que acham que, teoricamente, a turbulência é determinística. Uma visão mais realista seria considerar um meio termo, ou seja, determinística para as chamadas estruturas coerentes e randômico para as pequenas estruturas. Aqui fala-se de coerência estatística para as estruturas que mantêm uma forma definida por um tempo superior ao seu tempo característico, por exemplo o tempo de rotação.
- **Alta difusibilidade:** a experiência mostra que o processo de mistura de todas as propriedades ligadas a um escoamento (quantidade de movimento, energia, contaminantes, etc.) muitas ordens de grandeza maior no regime turbulento que no regime laminar. Isto se dá devido ao fato que, no regime turbulento, tem-se a presença de flutuações térmicas e de concentração, o que cria fortes e numerosos gradientes locais, tornando o processo de difusão molecular mais eficiente. Outra fonte homogenizadora é o transporte de parcelas de fluido para diferentes regiões do escoamento o que também gera fortes gradientes locais.

Do ponto de vista de aplicações da engenharia, esta é, talvez, a característica mais importante da turbulência pois ela implica em: aceleração do processo de combustão e de troca de calor; forte influência no controle de velocidade junto à parede submersa será mais achatado, ou seja, mais energizado em regime turbulento. Sabendo-se que o

deslocamento de uma camada limite tem como causa o déficit de quantidade de movimento, compreende-se como a turbulência pode ser utilizada para o controle do deslocamento. A Figura 1.5 ilustra, quantitativamente a diferença entre os perfis de velocidades para os dois regimes de escoamento .

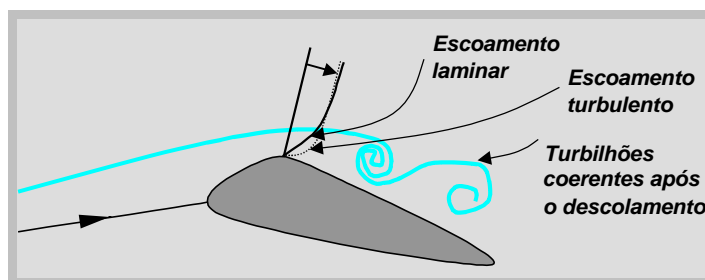


Figura 1.5. Influência da turbulência no processo de descolamento de uma camada limite.

- **A turbulência ocorre a altos números de Reynolds:** a transição de um escoamento para o regime turbulento, bem como a sua manutenção dependem da importância relativa entre os efeitos convectivos e difusivos. Os efeitos convectivos altamente não lineares, são efeitos amplificadores de perturbações e geradores de instabilidades. Por outro lado os efeitos difusivos são amortecedores ou inibidores da formação de instabilidades. O número de Reynolds ( $Re$ ) é definido como a razão entre os efeitos convectivos e os efeitos difusivos. Desta forma um escoamento só poderá transicionar ou se manter turbulento quando  $Re$  for maior que a unidade.

$$Re = \frac{\text{Efeitos Convectivos (efeitos não lineares que amplificam perturbações)}}{\text{Efeitos Difusivos (efeitos que tendem a amortecer as instabilidades)}}$$

- **Flutuações tridimensionais de vorticidade:** a experiência mostra que qualquer escoamento turbulento é tridimensional. Constata-se ainda a presença de flutuações de vorticidade. Demonstra-se, a partir da equação de Helmholtz para o transporte da vorticidade que o único termo produtor desta grandeza é diferente de zero apenas em três dimensões. Fisicamente, vorticidade é gerada através do processo de estiramento de vórtices, o que é um mecanismo puramente tridimensional.

Esta característica é importante para se identificar os fenômenos que não podem ser considerados como turbulentos. Por exemplo, as ondas randômicas de superfície não são turbulentas pois elas são irrotacionais.

- **A turbulência é um fenômeno altamente dissipativo:** como será estudado em detalhe nas seções seguintes, o processo de dissipação viscosa de energia cinética turbulenta,



gerando aumento de energia interna acontece nas altas frequências. Sabe-se ainda que, em regime turbulento completamente desenvolvido toda a energia injetada no escoamento deve cascatar sobre o espectro de turbilhões até as frequências dissipativas. Para se manter um escoamento turbulento necessita fornecer continuamente. Caso contrario, entra-se em regimen de turbulência em decaimento. Daí, esta característica da turbulência. Se se considera as ondas internas de gravidade, ilustradas anteriormente, elas não podem ser turbulentas, já que não são dissipativas.

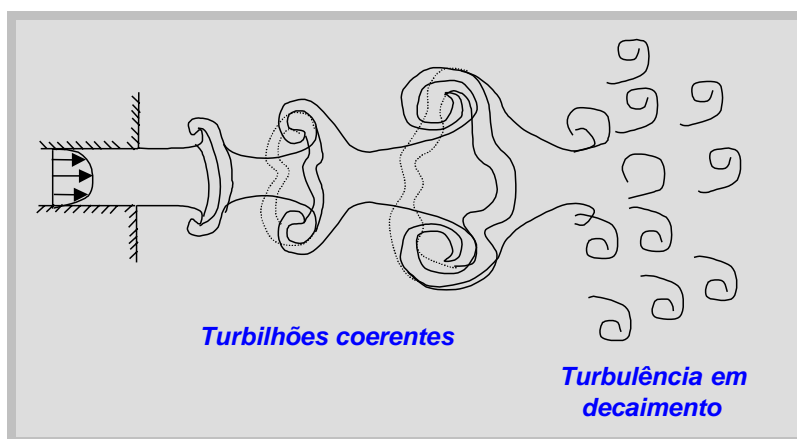


Figura 1.6. Esquema ilustrativo de um jato, no qual identifica-se a turbulência em decaimento.

- **A turbulência é um fenômeno contínuo:** Qualquer escoamento de fluidos newtonianos pode ser modelado utilizando-se as equações de Navier-Stokes. Se o fluido for não newtoniano estas equações devem ser modificadas no seu termo viscoso. É importante enfatizar que estas equações modelam qualquer escoamento independentemente do regime ser ou não turbulento. Demonstra-se, inclusive que as menores escalas de comprimento da turbulência são ainda muito maiores que o livre caminho médio molecular do fluido. Este fato, no entanto, está limitado a escoamentos com número de Mach inferior a 15. Acima deste patamar a aplicação das equações da Navier-Stokes torna-se questionável.
- **A turbulência é um fenômeno imprevisível:** Esta é uma característica relativa à nossa incapacidade de reproduzir ou repetir um dado experimento. Mesmo no laboratório, sob condições extremas de controle, não é possível desenvolver duas realizações idênticas. Do ponto de vista da simulação numérica, torna-se impossível reproduzir exatamente as condições iniciais e de contorno experimentadas no laboratório. Um escoamento turbulento tem, pelos efeitos não lineares, uma alta capacidade de amplificação destes



pequenos erros, conduzindo a resultados completamente diferentes, em duas realizações que diferem minimamente nas condições iniciais e de contorno. Nas Figuras 1.7, 1.8 e 1.9 ilustra-se, qualitativamente estes fatos. Por exemplo os resultados ilustrados nas Figuras 1.9(a) e (b) são completamente diferentes neste instante de observação. Isto é a consequência da pequena diferença na condição inicial ilustrada na Figura 1.8.

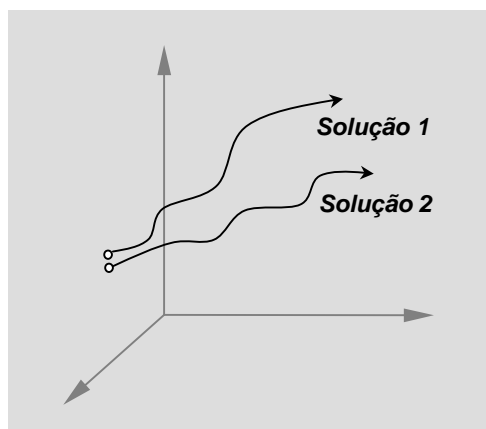


Figura 1.7. Evolução de duas soluções a partir de duas condições iniciais muito próximas.



Figura 1.8. Condições iniciais de desenvolvimento de uma camada de mistura: (a) condição inicial 1; (b) condição inicial 2.

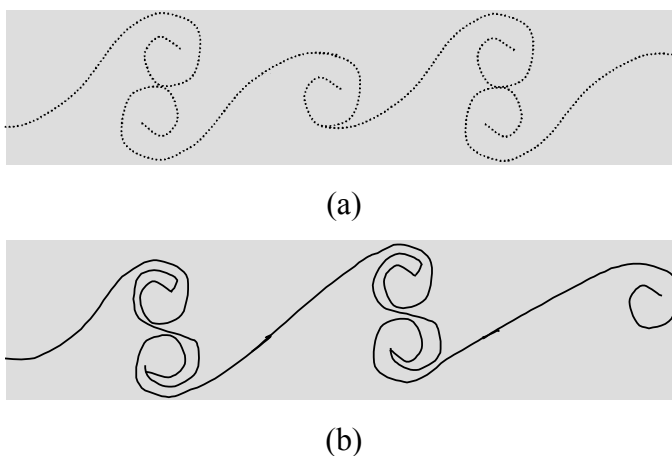


Figura 1.9. Evolução: (a) a partir da condição inicial 1 e (b) a partir da condição inicial 2.

### 1.3. MÉTODOS PARA SE ESTUDAR A TURBULÊNCIA

Os métodos utilizados para análise dos escoamentos turbulentos podem ser classificados em dois grandes grupos: os experimentais e os teóricos. No primeiro grupo são usuais diversos tipos de medidas com diferentes tipos de transdutores: anemômetros a fio quente, a filme quente, a laser, assim como, recentemente, anemometria por imagens rápidas (Particle Image Velocimetry – PIV). A visualização bi e tridimensional sempre se coloca como um dos recursos mais poderosos para se compreender fisicamente um escoamento. As vantagens e desvantagens são inerentes ao processo, tais como: alta confiabilidade e alteração da natureza do escoamento pela inserção de sensores ou o uso de partículas de contraste.

Os métodos teóricos se despontam como um potencial cada vez maior em função do desenvolvimento de modelos e métodos de solução mais avançados, assim como devido ao desenvolvimento de máquinas de alto potencial de cálculo e de armazenamento de informações. No domínio dos métodos teóricos, a pesar de todo o avanço nas máquinas, elas ainda se apresentam completamente insuficientes para a solução, à contento, das equações originais de Navier-Stokes, de forma a se resolver escoamentos turbulentos a altos números de Reynolds.

Faz-se necessário o modelamento adicional dos efeitos físicos ligados à turbulência. Estes modelos vêm sendo desenvolvidos e utilizados ao longo dos tempos e, dispõe-se, atualmente de diferentes famílias de acordo com suas origens e também de acordo ao potencial de cálculo disponível. Assim eles podem ser classificados em grupos, segundo a época de desenvolvimento dos mesmos. O primeiro grupo, modelos clássicos, pode ser subdivididos nos modelos a zero equações de transporte, a uma equação, duas e até a seis equações adicionais de transporte. Os modelos contemporâneos, mais modernos, apareceram em consonância com uma nova filosofia de modelagem e de simulação, trata-se da modelagem sub-malha e da Simulação de Grandes Escalas (SGE). Os modelos clássicos interessam-se pelo comportamento médio e por informações puramente estatísticas dos escoamentos turbulentos. Com a metodologia de SGE objetivam-se a obtenção de informações instantâneas assim como de informações estatísticas. Neste caso é possível o uso de métodos teóricos para se compreender fisicamente a turbulência.

Nas Figuras 1.10(a) e (b) ilustra-se as distribuições temporais de um mesmo sinal obtido pelo uso de metodologias clássicas e contemporânea. Observa-se que no segundo caso tem-se o comportamento dinâmico do sinal, guardando-se frequências que serão tão mais elevadas quanto maior for a capacidade computacional disponível.

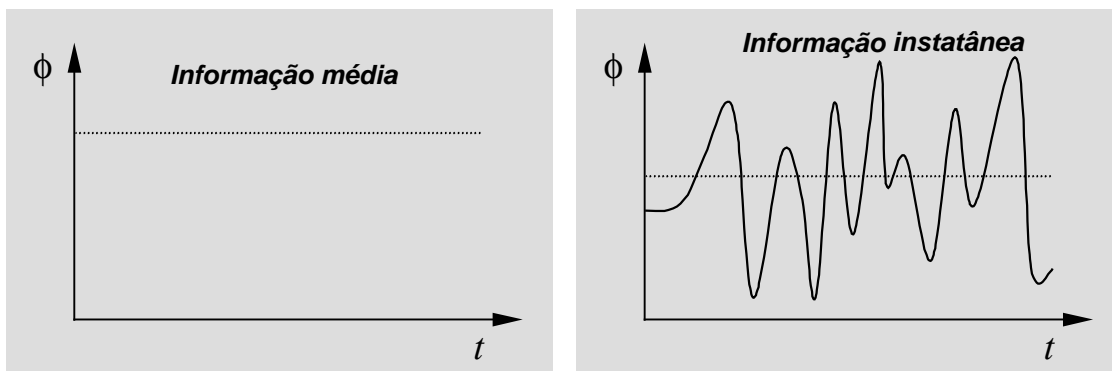


Figura 1.10. Informação obtida utilizando-se: (a) modelagem clássica da turbulência e (b) modelagem contemporânea.

Na Figura 1.11, ilustra-se o espectro de energia associado ao sinal transitório da Figura 1.10(b). Se todas as freqüências forem capturadas, explicitamente fala-se de Simulação Numérica Direta (SND), em contraste com SGE com a qual se resolve apenas uma parte do espectro.

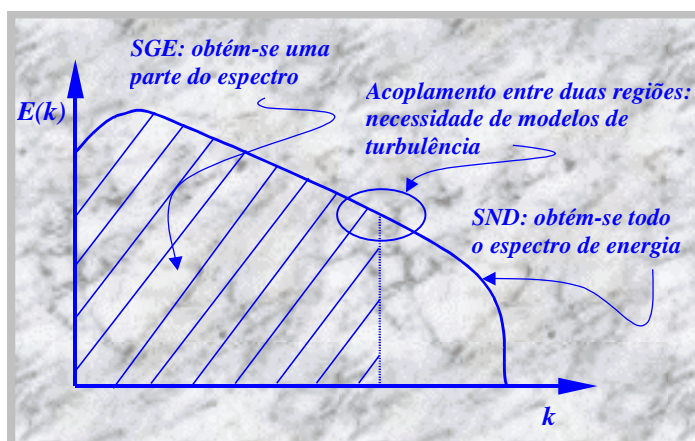


Figura 1.11. Espectro de energia cinética turbulenta.

Nas Figuras 1.12(a) e (b) ilustra-se a captura discreta das instabilidades do tipo turbilhões de Von-Karman que aparecem à jusante de um cilindro circular. Observa-se que quanto menor for a instabilidade física a ser capturada, mais fina é a malha numérica requerida, conseqüentemente, mais caro se torna o processo de solução do sistema de equações resultante. A malha de tamanho  $\Delta x$  permite capturar os turbilhões maiores que  $\ell_c$ . Para se calcular turbilhões de tamanho  $\ell_c'$  necessita-se de uma malha de tamanho  $\Delta x'$ , obviamente menor.

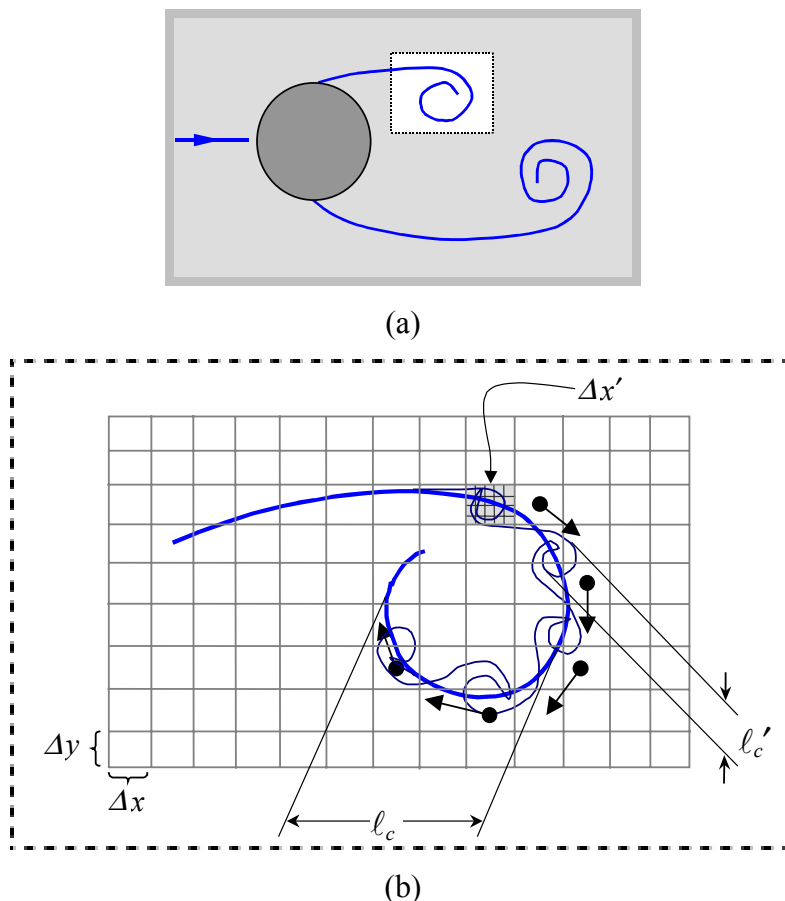


Figura 1.12. Noções de multiplicidade de escalas.

Na Figura 1.13 ilustra-se os números de onda associados. Quanto mais fina a malha utilizada maior o número de onda de corte e mais informações físicas sobre o espectro de energia serão capturadas. Ilustra-se ainda o processo de injeção de energia sobre o espectro. Exemplos físicos serão apresentados para melhor compreensão.

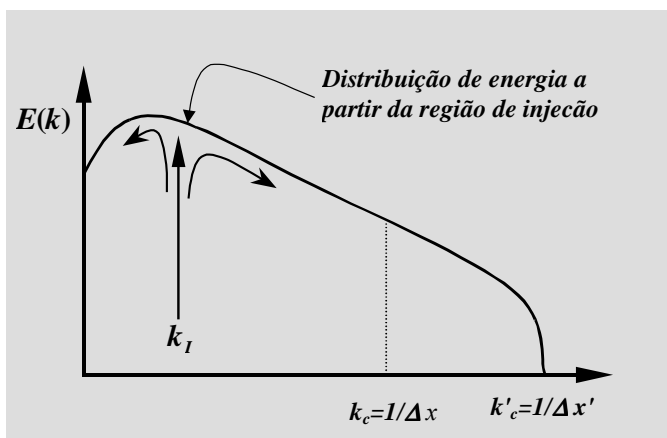


Figura 1.13. Repartição de energia a partir de um número de onda de injeção.

### 1.4. EQUAÇÕES REPRESENTATIVAS DOS ESCOAMENTOS

Considerando-se a hipótese do contínuo e que o fluido seja newtoniano, tem-se as equações associadas aos princípios de conservação.

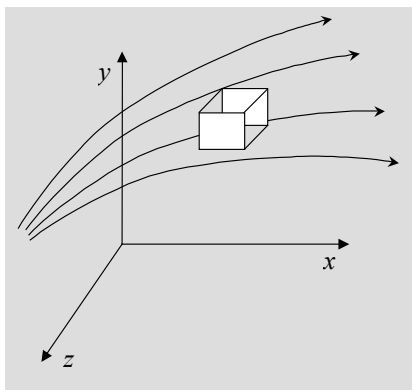


Figura 1.14. Volume de controle para balanços de massa e de quantidade de movimento.

- Conservação da massa

$$\underbrace{\frac{\partial \rho}{\partial t}}_{\text{Taxa de variação da massa no volume considerado}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \vec{V})}_{\text{Fluxo líquido de massa sobre o volume considerado}} = 0 \tag{1.1}$$

- Conservação da quantidade de movimento

$$m\vec{a} = F_{\text{superfície}} + F_{\text{corpo}} \quad \text{onde} \quad \vec{a} = \frac{D\vec{V}}{Dt} = \frac{\partial(\ )}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)(\ ) \tag{1.2}$$

Fazendo as hipóteses de escoamentos incompressíveis e propriedades físicas constantes, tem-se:

$$\underbrace{\frac{\partial \vec{V}}{\partial t}}_{\text{Taxa de variação da quantidade de movimento}} + \underbrace{(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V}}_{\text{Fluxo convectivo da quantidade de movimento}} = \underbrace{-\frac{1}{\rho} \nabla p}_{\text{Força resultante devida ao gradiente de pressão}} + \underbrace{\nu \nabla^2 \vec{V}}_{\text{Fluxo líquido difusivo da quantidade de movimento ou dissipação de energia cinética dependendo das escalas em questão}} \tag{1.3}$$

O termo relativo ao fluxo líquido convectivo de quantidade de movimento também expressa as interações não lineares entre as diversas escalas que compõem o espectro de energia típico do escoamento.

- Conservação da Energia

$$\underbrace{\frac{\partial T}{\partial t}}_{\text{Taxa de acúmulo de energia interna no volume considerado}} + \underbrace{(\vec{V} \cdot \vec{\nabla})T}_{\text{Fluxo líquido convectivo de energia interna}} = \underbrace{\alpha \nabla^2 T}_{\text{Fluxo líquido difusivo de energia interna}} + \underbrace{\phi}_{\text{Termo fonte de energia interna devido à dissipação de energia interna}} \quad (1.4)$$