

1 Introdução

1.1. Motivação

A análise dos escoamentos é uma atividade extremamente importante em nível científico e tecnológico. Na maioria das situações de interesse prático prevalece no escoamento um comportamento caótico de grande complexidade, comumente chamado de turbulência.

A turbulência em fluidos está fortemente presente no cotidiano de todos os homens. É enorme a quantidade de exemplos que podem ser citados. A fumaça gerada por um cigarro dá origem a instabilidades do tipo toróides, as quais se desestabilizam e geram turbulência tridimensional. O escoamento turbulento no interior de nossos pulmões acelera a difusão de oxigênio e facilita o processo de absorção. Graças à turbulência, o processo de mistura de combustível e oxigênio no interior de uma câmara de combustão, se torna eficiente o bastante, para aumentar o rendimento do motor e reduzir os efeitos nefastos da poluição dos gases tóxicos, liberados por automóveis e aviões. No campo dos problemas envolvendo os corpos em movimento em algum meio fluido, pode ser citado o caso de aeronaves que atravessam uma zona de turbulência. Realmente as oscilações induzidas sobre as estruturas, especialmente sobre as asas dos aviões, são possíveis de serem visualizadas a olho nu. Compreender os mecanismos físicos que governam este fenômeno, é, pois, de suma importância.

A turbulência em fluidos está entre os mais complexos e espetaculares fenômenos encontrados na natureza. Sua ocorrência é uma manifestação da natureza convectiva e não linear das leis físicas que governam os escoamentos dos fluidos. É uma característica do escoamento e não do fluido. É transiente, tridimensional e caracteriza-se naturalmente por processos não lineares de trocas de massa, energia e quantidade de movimento. Tais processos se dão via interações de estruturas das mais variadas escalas de tempo e comprimento.

O problema da compreensão da turbulência, a fim de modelar e prever suas propriedades de transporte e mistura ou a predição dos escoamentos ao redor

ou no interior de geometrias, foi um dos grandes desafios do último século e provavelmente continuará sendo nos próximos anos. A turbulência tem permanecido como uma das últimas fronteiras da ciência.

Apesar de todos os esforços de algumas das grandes mentes da ciência, nos campos da engenharia, física e matemática, o problema da turbulência tem permanecido empírico. Progressos em direção a uma teoria analítica rigorosa tem sido frustrados pelo fato que a dinâmica da turbulência é estocástica (frequentemente tendo estruturas básicas organizadas) e fortemente não linear.

A história da mecânica dos fluidos poderia certamente creditar o fundamento da nossa corrente compreensão de turbulência, ao audacioso e pioneiro trabalho dos cientistas, tais como Osborne W. Reynolds, G. I. Taylor, Ludwig Prandtl e Theodore Von Karman, entre outros, que foram produto de uma cultura científica que exercia a complicada interação entre teoria e observação (Gharib, 1996). A partir daí, muitas teorias subsequentes e esforços de modelagem, para representar o processo físico de turbulência, têm sido perseguido. Ultimamente, estas teorias e modelos têm enfrentado a demanda prática da indústria, onde a capacidade de predição de escoamentos tem sido requerida. O aparecimento da dinâmica dos fluidos computacional foi uma resposta natural a esta demanda e uma consequência do aparecimento dos métodos numéricos e do sensível aumento da capacidade computacional. O notável avanço no poder de cálculo dos computadores de hoje deu início a era da simulação; processos físicos que são recriados através de leis físicas existentes.

A proposta atrativa de simular precisamente problemas de ciência, experimentalmente difíceis de serem reproduzidos, a um baixo custo, é a grande promessa dos experimentalistas numéricos. É um objetivo extremamente atraente para toda a comunidade científica e técnica, mas que só se concretiza sobre modelos matemáticos bem fundamentados. Diante do rápido avanço da dinâmica dos fluidos computacional, nas décadas de 70 e 80, este objetivo tem sido frustrado exatamente pela falta de uma compreensão precisa da natureza multidimensional e não linear desse colossal problema - turbulência.

Após a grande e justificável esperança inicial dada pela dinâmica de fluidos computacional, a compreensão básica da turbulência, em suas várias formas, permanece ainda um desafio para os teóricos, experimentalistas numéricos e de

laboratório. Dar um alto nível de validação aos modelos de turbulência, pelo aprofundamento da compreensão da física do movimento é a grande questão, que permanece aberta, desafiando a todos que lidam com o fascinante fenômeno chamado turbulência.

1.2. Visão Histórica

Os primeiros estudos sobre instabilidade e turbulência podem ser atribuídos a Osborne Reynolds e Lorde Rayleigh no século XIX (Tennekes & Lumley, 1985; Townsend, 1980; Silveira Neto, 1998, 2002). Reynolds demonstrou que escoamentos fluidos mudam de um estado ordenado e predizível para um estado caótico e não predizível, quando um certo parâmetro adimensional excede o seu valor crítico. Na sua famosa investigação de escoamentos no interior de tubos, ele estabeleceu claramente a existência de dois regimes fundamentais de escoamento: o laminar e o turbulento, o qual chamou de ‘sinuoso’. O parâmetro adimensional, o qual controlava a transição de um regime para o outro, tornou-se posteriormente conhecido como número de Reynolds. Este é definido como:

$$Re_L = U L / \nu \quad (1.1)$$

onde, U é a escala de velocidade, L a escala de comprimento e ν a viscosidade cinemática do fluido.

A existência de regiões de turbulência intermitentes (*spots*), uma propriedade posteriormente estabelecida como comum a escoamentos próximos a fronteiras sólidas, foi outra descoberta de Reynolds. Outra grande contribuição sua foi desenvolver as famosas equações médias para escoamentos turbulentos, a partir do conceito de tensão de Reynolds.

Simultaneamente aos trabalhos experimentais de Reynolds, Lord Rayleigh, na década de oitenta do século XIX, desenvolveu investigações teóricas sobre instabilidades de escoamentos paralelos de fluidos invíscidos (Tennekes & Lumley, 1985; Silveira Neto, 1998, 2002). Sua principal contribuição foi mostrar que a condição necessária, para que um escoamento paralelo seja instável, é a

presença de uma região inflexional no campo de velocidades.

A idéia de se estudar um escoamento turbulento como sendo laminar e modificar a viscosidade molecular, via conceito de viscosidade turbulenta, nasceu com Boussinesq em 1877 (Hinze, 1975). Ele supôs que as tensões turbulentas de Reynolds são proporcionais às taxas de deformação, como foi feito por Stokes com relação as tensões viscosas. O coeficiente de proporcionalidade foi então chamado viscosidade turbulenta.

Os trabalhos de Prandtl e Von Karmam, no início do último século (1915-1930) (Gharib, 1996; Silveira Neto, 1998, 2002), permitiram o desenvolvimento de métodos capazes de melhor aproximar as soluções dos perfis médios de velocidade. Em 1925, Prandtl propôs o bem sucedido conceito, para a época, de comprimento de mistura. Este conceito permitiu calcular a viscosidade turbulenta como função do espaço. Ressalta-se que Taylor (1915) (Silveira Neto, 1998, 2002) já havia estabelecido este conceito em termos de afastamento médio de uma partícula em relação à linha de corrente média.

A teoria estatística de turbulência foi objeto de desenvolvimento importante nas décadas de quarenta e cinquenta, especialmente com os estudos de Kolmogorov (1941), Millionschikov (1939, 1941), Obukov (1941), Chou (1945), Heisenberg (1948) Rotta (1951), Batchelor (1953) e Davidov(1959) (Hanjalic, 1994, Silveira Neto, 1998, 2002). Contudo esta área de pesquisa da turbulência permanece ativa até os dias atuais e nenhuma teoria completa para turbulência isotrópica foi concluída (Hanjalic, 1994, Silveira Neto, 1998, 2002).

Uma área onde se conseguiu importantes progressos foi a de transição a turbulência. Já no que concerne aos escoamentos cisalhantes livres (jatos, esteiras e camadas de mistura) a evolução aconteceu de forma mais gradual. O grande progresso neste tipo de escoamento foi conseguido com a descoberta das chamadas estruturas coerentes de turbulência, em particular das instabilidades de Kelvin-Helmholtz, evidenciadas nas experiências de Brown & Roshko (1974) (Rogallo & Moin, 1984; Bradshaw, 1997; Silveira Neto 1998, 2002).

Os primeiros métodos numéricos, para simulação de escoamentos datam das décadas de cinquenta e sessenta e baseavam-se no método de diferenças finitas. As aplicações, encontradas na literatura nesta época, envolvem principalmente problemas lineares, definidos em geometrias regulares. Algumas poucas

aplicações de simulação de escoamentos turbulentos, com a utilização de modelos algébricos simples, tipo comprimento de mistura, podem também ser encontrados na literatura destas décadas.

A conferência de Stanford, realizada em 1968 (Hanjalic, 1994), foi sem dúvida um marco histórico no progresso da modelagem e simulação numérica de escoamentos turbulentos. O encontro de Stanford afirmou a superioridade da abordagem do campo médio sobre os métodos integrais e estimulou seu futuro desenvolvimento. Na verdade, o trabalho iniciou-se muito antes com Kolmogorov(1941), Chou (1945), Rotta (1951) e Davidov (1959, 1961), cujas idéias materializaram-se em computação prática somente após o advento dos computadores de alta velocidade. Já no ano do encontro, pesquisas eram realizadas simultaneamente em alguns lugares do mundo. Trabalhava-se no desenvolvimento de uma teoria generalizada de transporte de turbulência anisotrópica, empregando-se equações diferenciais parciais para as tensões turbulentas e a taxa de decaimento da turbulência, seguindo sugestão de Chou (1945) (Hanjalic, 1994). Nascia, junto com a conferência, a técnica de modelagem de turbulência conhecida como modelagem de segunda ordem. Sendo que, as primeiras versões realísticas dos modelos somente foram propostas no início dos anos setenta (Hajalic & Launder, 1972; Launder et al., 1975).

É também nesta época que a simulação de grandes escalas (LES por *Large Eddy Simulation*) é aplicada pela primeira vez a escoamentos de engenharia (Deardorff, 1970). Esta nova filosofia de simulação havia sido utilizada anteriormente por meteorologistas. Foi Smagorinky (1963) (Bradshaw, 1997; Meneveau & Katz, 2000) que, inspirando-se nas idéias da decomposição de escalas de Reynolds (1895) (Tennekes & Lumley, 1972), propôs esta nova filosofia de modelagem e realizou a primeira tentativa de fazer simulação tridimensional do estado atmosférico, por longos intervalos de tempo. Já os fundamentos da simulação numérica direta foram postos pelo National Center for Atmospheric Research (Fox & Lilly, 1972; Rogallo & Moin, 1984), embora os recursos computacionais, naquela época, não permitissem simulação direta de escoamento turbulento limitado por fronteira sólida.

O sucesso do código numérico de Patankar & Spalding(1967), para solução das equações diferenciais parciais, e o rápido progresso das metodologias

numéricas fizeram com que os anos setenta fossem caracterizados pelo grande avanço no desenvolvimento dos modelos de turbulência (Launder & Spalding, 1972). Ng, Rodi e Spalding procuravam os modelos do tipo $\kappa\text{-}\kappa L$ (Launder & Spalding, 1972), onde κ é a energia cinética turbulenta e L é a escala de comprimento, enquanto Hanjalic, Jones & Launder (1970) preferiram investigar os modelos de duas e três equações, com a taxa de dissipação de energia turbulenta (ε) sendo o parâmetro de escala (Launder & Spalding, 1972; Hanjalic, 1994). Um número de escoamentos externos e internos foram resolvidos com um único conjunto de equações e coeficientes empíricos, que pouco mudaram desde o trabalho de Hanjalic & Launder (1972). Logo a seguir, o modelo $\kappa\text{-}\varepsilon$ é estendido para ser aplicável a escoamentos de baixo número de Reynolds (Jones & Launder, 1972). É também nesta década que Patankar & Spalding propõem a metodologia de volumes finitos para solução numérica das equações diferenciais parciais referentes ao fenômeno de transporte (Patankar & Spalding, 1972; Patankar, 1980). Esta metodologia, associada a proposta de modelos de turbulência com duas equações (Harlow & Nakayawa, 1968; Jones & Launder, 1972; Launder & Spalding, 1974) e modelos de segunda ordem (Hanjalic & Launder; 1972, Launder et al, 1975), permitiu a simulação de escoamentos turbulentos mais complexos (por exemplo, com recirculação), envolvendo assim diversas situações práticas de interesse.

A conferência AFOSR-HTTM sobre escoamentos turbulentos complexos, realizada nos primeiros anos da década de oitenta em Stanford USA, foi considerada, à época, como o grande empreendimento em modelagem estatística e simulação de turbulência (Hanjalic, 1994). Esta conferência atraiu cerca de quarenta pesquisadores com seus modelos. Estes modelos foram testados contra 50 casos testes predefinidos, para os quais dados experimentais estavam disponíveis. A maioria dos modelos demonstrou naquela época um alto potencial e uma razoável aplicabilidade a diversos tipos de escoamentos, com potencial para melhoramentos e largo uso na computação de escoamentos turbulentos complexos de importância industrial. Paralelo a estes acontecimentos, com o aumento da capacidade computacional, a técnica de simulação de grandes escalas passa a ser utilizada para resolver escoamentos internos simples, tal como o escoamento em canal completamente desenvolvido (Moin & Kim, 1982). Os

resultados foram então usados para estudar a física da turbulência próximo a fronteira sólida. Apesar da boa concordância dos resultados havia algum desconforto, pois a simulação ainda continha modelos ‘ad hoc’. Um outro grande passo foi dado por Spalart (1986, 1988) que desenvolveu um engenhoso método para calcular a camada limite turbulenta em placa plana com gradiente de pressão favorável e sem gradiente de pressão. Dados da camada limite turbulenta obtidos por Spalart tem sido largamente usados em inúmeros trabalhos. A inquietação com os resultados obtidos por Moin & Kim em 1982 durou até 1987, quando Moser & Moin (1987) e Kim et al. (1987) publicaram, respectivamente, os resultados da simulação direta do escoamento completamente desenvolvido em canal curvo e canal plano.

Logo a seguir, inicia-se a avaliação dos modelos estatísticos de turbulência, utilizando-se os resultados das simulações diretas dos escoamentos com baixo número de Reynolds (Mansour et al., 1988; Mansour, 1991). Cabe destacar que, na década de oitenta, inúmeros modelos estatísticos válidos nas regiões próximas a parede foram propostos, permitindo-se assim a integração do problema em todo o domínio (Patel et al., 1985). No que se refere aos modelos de duas equações de alto Reynolds, deve-se destacar o sucesso alcançado por Speziale na obtenção da recirculação em dutos não circulares, utilizando para a predição do escoamento, modelos κ - ε não lineares (Speziale, 1987).

Ainda ao final desta década e início dos anos noventa, Yakhot e Orszag, entre outros pesquisadores, empregando a técnica do grupo da renormalização, desenvolveram novos modelos de turbulência. São os chamados modelos de turbulência renormalizados (modelos RNG, i.e. Renormalization Group Theory) (Yakhot & Orszag, 1986; Yakhot et al., 1992; Yakhot & Smith, 1992; Orszag et al., 1993)

Todos os escoamentos resolvidos por simulação direta até ao final da década de oitenta eram homogêneos na direção principal. Condições de contorno periódicas, conseqüentemente, foram impostas àquela direção. As primeiras simulações de escoamentos não homogêneos na direção principal são então realizadas já na década de noventa, com turbulência sendo especificada nas condições de entrada. (Le & Moin, 1994; Na & Moin, 1998; Le et al., 1997). Grande esforço é simultaneamente realizado para melhorar a predição dos

modelos estatísticos na região da parede (Rodi & Mansour, 1993; Lai & So, 1990; Antonia & Kim, 1994; So et al, 1996).

O método dinâmico de avaliar o parâmetro do modelo submalha de Smagorinsky, proposto no início dos anos noventa (Germano et al., 1991), deu novo ânimo a técnica de simulação de grandes escalas (Lilly, 1992; Ghosal et al., 1995). Este procedimento ficou conhecido como procedimento dinâmico ou mesmo modelo dinâmico submalha. Nesse caso, o coeficiente do modelo passa a ser função da posição e do tempo (Sagaut et al., 1999), sendo determinado a partir do campo do escoamento resolvido.

Ao final do último século, a modelagem de turbulência evoluiu no sentido de proporcionar relações de fechamento mais exatas, com base em resultados experimentais, obtidos com instrumentação avançada, ou ainda oriundos de simulações diretas ou de grandes estruturas (DNS ou LES) (Le et al., 2000; Chang & Shyu, 2000; Knoell & Taulbee, 2001)

1.3. Objetivo

Os primeiros modelos para a descrição da transferência de quantidade de movimento, de energia ou ainda de qualquer outra propriedade, em escoamentos turbulentos se baseavam essencialmente na identificação de grandezas adimensionais, para caracterização do escoamento. Relacionava-se, por exemplo, número de Nusselt em função de parâmetros tais como número de Reynolds (Re_L) e número de Prandtl (Pr). Úteis em algumas situações, estas correlações eram limitadas a geometria do problema e às faixas de Re_L e Pr , para os quais foram ajustadas.

Com o aparecimento dos primeiros computadores e seu posterior aperfeiçoamento, análises mais elaboradas dos escoamentos turbulentos tornaram-se possíveis, através da aplicação de técnicas numéricas. Apesar desse cenário e das equações de Navier-Stokes serem adequadas a descrição rigorosa do fenômeno da turbulência, não há expectativa de obtenção de soluções numéricas para situações de interesse industrial em futuro próximo. Os escoamentos turbulentos são bastante complexos (tridimensional e transiente), caracterizando-

se por grandes intervalos de escalas de comprimento e tempo. Isto exige níveis de discretização espacial e temporal extremamente pequenos, para a correta simulação do escoamento turbulento. A magnitude dos recursos computacionais exigidos por este tipo de simulação, a chamada simulação direta, ainda restringe este tipo de procedimento à geometria simples e a baixo número de Reynolds.

Diante da impossibilidade da simulação direta dos escoamentos turbulentos, em faixas de números de Reynolds compatíveis com o interesse prático, surge a pergunta: como resolver satisfatoriamente esta classe de problemas?

Como foi visto no item anterior, foi Reynolds em 1894 que iniciou uma reflexão sobre este problema e propôs um processo de decomposição das equações de governo, de tal forma a se analisar o comportamento médio do escoamento e modelar as suas flutuações. Esta decomposição proposta conduz ao chamado problema de fechamento da turbulência. Ela deu origem a um vasto domínio de pesquisa e desenvolvimento, denominado problema de fechamento e modelagem de turbulência.

Este trabalho propõe-se então investigar este problema, estudando as duas principais linhas de modelagem em voga: a modelagem estatística clássica e a modelagem submalha. Nesta última, também conhecida como simulação das grandes escalas, simula-se numericamente as grandes escalas, resolvendo-as explicitamente, enquanto modela-se as menores estruturas. Já a primeira técnica, a modelagem estatística clássica, utiliza o conceito de média de Reynolds e simula numericamente o comportamento médio dos escoamentos turbulentos. Neste tipo de modelagem, o grande enfoque será dado aos modelos de viscosidade turbulenta de duas equações, para baixo número de Reynolds.

O objetivo dos modelos de baixo Reynolds é estender a validade dos modelos de turbulência de duas equações através da subcamada laminar, chegando até a parede. Dessa forma, pode-se então prever melhor os escoamentos nas regiões próximas a parede e nas regiões com recirculação, entre outras, eliminando-se a necessidade do uso das funções de parede. Contudo, sendo esses métodos relativamente novos, há uma lacuna de adequada documentação mostrando a qualidade das previsões mesmo para escoamentos simples. Assim, um dos primeiros objetivos deste trabalho é testar e claramente estabelecer e documentar a capacidade de alguns destes modelos, como as

variantes κ - ε , incluindo o modelo desenvolvido pela técnica do grupo de renormalização (RNG).

A estes objetivos inicialmente traçados, acrescenta-se o desejo de avaliar os reais efeitos da modelagem do termo de difusão de pressão da equação da energia cinética turbulenta nas predições dos modelos de baixo número de Reynolds, junto a fronteiras sólidas. Deseja-se verificar se tal efeito é fundamental, para predições realistas dos modelos de baixo número de Reynolds nas regiões de recirculação, além de estudar vários modelos para o referido termo e definir aquele que melhor o representa.

Posteriormente, pretende-se estudar a metodologia de simulação chamada simulação de grandes escalas (LES por *Large Eddy Simulation*). Nesta metodologia, é verificado o comportamento do modelo de Smagorinsky em escoamentos limitados por fronteiras sólidas. Os resultados serão comparados com aqueles obtidos pelos modelos de baixo Reynolds, analisando-se a relação custo-benefício. Vantagens, limitações, e possíveis inconsistências dos modelos serão também discutidas e catalogadas.

Por fim, pretende-se, face os resultados alcançados, afirmar as reais possibilidades dos modelos LES na simulação de escoamentos de interesse prático e como ferramenta de auxílio a modelagem de turbulência, a nível de modelos com média de Reynolds.

1.4. Organização do Trabalho

O presente trabalho está organizado em oito capítulos, sendo este, introdução, o primeiro.

O Capítulo 2 apresenta uma rápida visão física do fenômeno da turbulência e as principais técnicas de simular os escoamentos turbulentos são sucintamente discutidas.

No Capítulo 3 discute-se especificamente os modelos estatísticos de duas equações, sendo detalhados os modelos utilizados nas simulações aqui realizadas. Já no Capítulo 4 é discutida a modelagem submalha, sendo explicitamente

detalhado o modelo de Smagorinsky.

O método numérico empregado, o método de volumes finitos, é discutido no Capítulo 5.

Os resultados obtidos com os modelos de viscosidade turbulenta de duas equações são apresentados no Capítulo 6. Eles são comparados a dados experimentais e de simulação direta disponíveis na literatura. O mesmo procedimento foi adotado no Capítulo 7 com relação a modelagem submalha (LES). Finalmente, conclusões e sugestões compõe o Capítulo 8.

As principais equações da modelagem estatística clássica (média de Reynolds), que não foram utilizadas diretamente no texto, estão transcritas no Apêndice A. O Apêndice B apresenta alguns detalhes relacionados ao método numérico. O procedimento de obtenção de modelos de turbulência desenvolvido por Yakhot & Orszag (1986) é discutido no Apêndice C, enquanto no Apêndice D são apresentados os principais modelos submalha utilizados nas simulações de grandes escalas.