

1

Introdução

A grande maioria das aplicações industriais envolve fenômenos turbulentos. Em algumas delas, tenta-se minimizar seus efeitos maléficos, tais como aumento de forças de fricção e presença de esforços intermitentes. Em outras, tira-se proveito de algumas de suas características, como por exemplo, a maior eficiência de mistura, retardo na separação de camadas limite, etc.

Dentre as diversas aplicações, a indústria aeronáutica merece destaque pois apresenta uma série de desafios em diferentes áreas de pesquisa. O escoamento em torno de aerofólios, por exemplo, que vem sendo estudado desde os primórdios da aviação, ainda não foi completamente compreendido (Chapman, 1979). Engenheiros aeroespaciais continuam investindo esforços na pesquisa e desenvolvimento das superfícies de sustentação que, inevitavelmente, recaem no estudo de aerofólios. Na área de propulsão, é também imprescindível a compreensão dos escoamentos em torno de palhetas (aerofólios), onde se nota a presença de fenômenos turbulentos ainda mais complexos, advindos da natureza rotacional do movimento. Conseqüentemente, o entendimento do comportamento de aerofólios que operam em regime turbulento é fundamental para engenharia aeroespacial.

Uma maneira interessante de se abordar o estudo de aerofólios consiste em analisar o escoamento ao redor de placas finas, o que, aliás, vem sendo feito consistentemente desde o século XIX. Se no princípio esta era a única maneira de se obter uma estimativa razoável para as forças resultantes, à medida que métodos numéricos mais precisos foram sendo desenvolvidos, a principal motivação para tal abordagem passou a ser a semelhança dos fenômenos físicos envolvidos e a presença dos mesmos regimes de escoamento observados em aerofólios. Pesquisas em aerodinâmica de placas finas ainda possibilitam uma melhor compreensão do problema, principalmente quando a turbulência desempenha um papel significativo (Crompton e Barret, 2000).

Dentre os regimes de escoamento comumente encontrados em

aplicações industriais, a formação de bolhas de recirculação destaca-se entre os mais importantes. Muitos estudos têm se concentrado no entendimento do mecanismo de desenvolvimento de tais bolhas sobre superfícies arredondadas de aerofólios convencionais (McGregor, 1954, Crabtree, 1957). Este tipo de bolha de separação (ou de recirculação), normalmente, ocorre próximo ao bordo de ataque após uma separação laminar seguida de rápida transição e recolamento, sendo sua extensão habitualmente curta, tipicamente de 1–2 % da corda. Em alguns casos, dependendo da curvatura do aerofólio, sua formação pode ficar atrasada e ocorrer apenas numa região mais próxima do bordo de fuga. A presença desta estrutura pode afetar de maneira significativa o desempenho do aerofólio, aumentando o arraste e, esporadicamente, provocando uma perda de sustentação (*stall*) prematura.

Um outro tipo de bolha, que tem recebido bem menos atenção da comunidade científica, ocorre em aerofólios finos, com bordo de ataque pontudo, ou mesmo em membranas (placas finas), tanto planas quanto curvas. As bolhas formadas nessas circunstâncias apresentam uma relação comprimento-altura bem maior, portanto, mais achatadas que as bolhas curtas mencionadas no parágrafo anterior, sendo referidas como *thin aerofoil bubble* de acordo com denominação introduzida por Gault (1957). Este tipo de estrutura passou a despertar maior interesse científico a partir de 1950, quando o aumento da velocidade de aeronaves impulsionou uma busca por aerofólios mais finos, a fim de reduzir os efeitos de compressibilidade. Outras motivações têm sido o desenvolvimento de máquinas rotativas (turbo-máquinas) no sentido da utilização de pás mais finas em busca de maior eficiência e a necessidade de se entender o comportamento de membranas flexíveis, tais como as superfícies vélicas usadas em barcos-à-vela, pára-quedas, e *para-sails*.

As bolhas de recirculação longas oferecem maiores desafios computacionais do que as curtas, por apresentarem estruturas turbulentas mais intensas e bem mais anisotrópicas (Gault, 1957, Crompton, 2001). A transição de regime laminar para turbulento, que ocorre na camada livre de mistura, normalmente se dá logo após ou muito próximo da separação, o que faz com que a camada cisalhante que circunda a bolha se encontre em sua quase totalidade em regime turbulento.

Na presença das bolhas longas de recirculação, as chamadas *thin aerofoil bubbles*, o próprio mecanismo de geração de sustentação do dispositivo é diferente, sendo a distribuição de pressões ditada predominantemente pela curvatura da camada cisalhante que circunda a bolha e pela própria estrutura interna da bolha. De fato, nesses casos, a maior parte da sustentação

e arrasto do dispositivo se deve a um núcleo de baixa pressão formado no interior da bolha de recirculação, o qual é necessário para suprir as forças centrípetas requeridas para manter a circulação das partículas de fluido. Obviamente, os níveis e as direções preferenciais da turbulência na camada cisalhante, na bolha, e na camada limite são decisivas na definição do formato da bolha, curvatura das linhas de corrente que cercam a mesma, e, como não poderia deixar de ser, na determinação do comprimento de recolamento.

Um dos trabalhos experimentais mais recentes na tentativa de compreender melhor os fenômenos físicos envolvidos na formação e desenvolvimento de bolhas longas, é o desenvolvido por Crompton (2001), que se utiliza de modernas técnicas de velocimetria a laser (LDV) para visualizar e medir o escoamento aerodinâmico sobre uma placa plana e fina. Este caso, de geometria bastante simples, provou ser extremamente adequado para o estudo de bolhas longas, por conter todas as complexas estruturas presentes nas mesmas, numa geometria que pode ser facilmente reproduzida, não só experimentalmente, como também em simulações numéricas. Sendo assim, pode ser considerado um excelente candidato a caso-teste padrão para essa classe de escoamentos.

Crompton (2001) concentrou-se no estudo de placas planas e finas a vários ângulos de ataque, para os quais foram disponibilizados perfis de velocidade média e de estatísticas de turbulência, coeficientes de pressão ao longo da placa (através de sensores de pressão), contornos de velocidade, de pressão, e de flutuações turbulentas, além de comprimentos de recolamento. Esse comprimento de recolamento, para o caso de placas finas e planas, varia com o ângulo de incidência, sendo de aproximadamente 14% da corda da placa para 1 grau de inclinação, e metade da corda para 3 graus. Para ângulos superiores a 5 graus, a camada cisalhante livre não consegue mais atingir a superfície superior da placa, não havendo mais recolamento. Os experimentos de Crompton foram realizados para altos números de Reynolds (Re) e intensas atividades turbulentas, com estruturas de escoamento altamente anisotrópicas, representando assim um grande desafio para qualquer tentativa de modelagem ou previsão.

A compreensão do fenômeno da turbulência é de importância capital para a engenharia e está longe de ser plenamente alcançada (Spalart, 2000). Mesmo com todo o avanço em algoritmos numéricos e dos recursos computacionais das últimas décadas, ainda não se consegue obter previsões numéricas, com grau de confiança suficiente para o projeto e análise de máquinas ou dispositivos que dependam de dinâmica dos fluidos, que

dispensem dispendiosas validações experimentais. É bem verdade que incertezas experimentais também estão sempre presentes, de forma que, em muitos casos, experimentos e simulações se complementam, servindo-se mutuamente não só para validação, como para identificação de pontos fracos e aprimoramento dos respectivos métodos.

A dificuldade de se obter uma metodologia computacional capaz de prever com exatidão fenômenos turbulentos, como o mecanismo das bolhas de recirculação longas, reside no fato da turbulência ser um processo caótico, com uma vasta gama de escalas e estruturas. Devido ao processo advectivo, descrito matematicamente pelo termo não-linear das equações que governam o escoamento, estas estruturas se multiplicam, gerando novas escalas, de forma a preencher continuamente um espectro de energia, mesmo que este inicialmente apresente apenas alguns poucos modos isolados. Este espectro extenso e contínuo de escalas, quando mapeado para um sistema discreto, como o de uma simulação computacional, resulta na necessidade de um enorme número de graus de liberdade, tanto maior quanto maior for o número de Reynolds.

Uma simulação numérica direta (DNS), na qual todas as escalas presentes são levadas em consideração, limita-se a números de Reynolds moderados, devido aos custos em termos de horas de CPU e memória, mesmo com os mais atuais e poderosos recursos computacionais disponíveis.

Assim, a fim de viabilizar simulações numéricas de escoamentos de interesse prático, faz-se necessário filtrar alguns desses graus de liberdade, de forma que, ao invés de incluí-los todos na simulação, apenas alguns são selecionados, sendo os demais, modelados de acordo com algum conhecimento físico sobre os mecanismos que regem a sua evolução.

O modo como essa filtragem é realizada e a quantidade de modos suprimidos diferenciam as diversas metodologias de simulação de escoamentos turbulentos disponíveis atualmente. Destacam-se três grandes classes de abordagem, agrupadas segundo um compromisso entre nível de modelagem e esforço computacional (Spalart, 2000, Mathieu e Scott, 2000 e Sagaut, 2002).

Num extremo, situam-se os métodos baseados em médias de Reynolds (RANS) (Mathieu e Scott, 2000 e Pope, 2000), nos quais o esforço computacional é relativamente reduzido, pois uma média estatística/temporal (chamada média de Reynolds) suprime todos os modos turbulentos, sobrando apenas o escoamento médio, estacionário, para ser calculado. A parte suprimida, que pode conter uma parte significativa da energia total, é modelada por meio de hipóteses muitas vezes heurísticas, e tenta captar, na medida

do possível, as estruturas e fenômenos da turbulência. Apesar das hipóteses envolvidas muitas vezes levarem a cálculos imprecisos, e até mesmo fisicamente não-plausíveis, sua simplicidade e rapidez na obtenção da solução faz desse grupo de métodos o escolhido para a maior parte das aplicações de interesse industrial (Nieckele et al., 2004).

Como exemplo da imprecisão dos métodos da classe RANS, pode-se citar o caso clássico do escoamento de um jato confinado (Yule et al., 1992), que evidencia a fraqueza da equação para dissipação de energia cinética turbulenta do tradicional modelo $\kappa - \varepsilon$, e a incapacidade de tais modelos preverem características fundamentais do escoamento, como por exemplo, a taxa de expansão da largura do jato. Outra classe de escoamentos que ressalta algumas das deficiências dos métodos baseados em RANS é a que envolve dinâmica rotacional. Modelos deste tipo dificilmente prevêm, com precisão aceitável, escoamentos em máquinas rotativas, turbinas, e rotores (Mathieu e Scott, 2000).

No outro extremo, a simulação numérica direta (DNS) (Pope, 2000) tenta resolver, com precisão suficiente e de maneira direta, as equações de Navier-Stokes, de forma a englobar todas as informações que descrevem a turbulência. Assim, a modelagem empregada na DNS se restringe ao processo de discretização e modelagem matemática das equações de transporte e à hipótese constitutiva, sendo, porém, o esforço computacional extremamente elevado. Num patamar intermediário entre as metodologias de médias de Reynolds (RANS), onde toda a energia turbulenta é modelada fisicamente, e a DNS, na qual as equações discretizadas são resolvidas diretamente, encontram-se as Simulações de Grandes Escalas (LES) (Smagorinsky, 1963 e Sagaut, 2002), tema principal do presente trabalho.

Os problemas apresentados pela metodologia RANS são, em grande parte, resolvidos quando se adota uma metodologia de grandes escalas (LES), a um custo computacional muitas vezes compensador. Além de sua maior precisão e generalidade, a metodologia de grandes escalas, disponibiliza, como resultado, dados muito mais detalhados do escoamento, possibilitando melhor entendimento físico e visualização dos fenômenos envolvidos.

A metodologia LES consiste, basicamente, na aplicação de filtros espaciais às equações de Navier-Stokes, de forma a separar as pequenas das grandes escalas (Sagaut, 2002). A equação resultante descreve, então, a evolução temporal e espacial das grandes escalas, que são simuladas, ficando a influência das pequenas reduzida a um único termo, a ser modelado. Como, em geral, os filtros utilizados estão intimamente relacionados com os espaçamentos de malha locais, as escalas correspondentes a esse termo

filtrado denominam-se escalas sub-malha (SGS), sendo várias as opções para sua modelagem. Apesar de continuar havendo certo empirismo na modelagem sub-malha (SGSM), o que torna a LES menos heurística do que a RANS, é o fato intuitivo e comprovado de que tais estruturas são mais gerais, mais homogêneas, menos dependentes da geometria do escoamento, e, sobretudo, menos críticas para a evolução do mesmo. Isto se deve basicamente a duas razões: primeiramente, a energia contida nas escalas modeladas (SGS) é bem menor do que nas modelagens RANS; segundo, seu papel na física da turbulência é quase sempre o de apenas dissipar a energia que lhes foi transferida das grandes escalas, através da bem conhecida cascata de energia.

As equações filtradas, incluindo os termos modelados, são então discretizadas com o auxílio de uma malha que deve se adaptar à geometria em estudo. Uma opção muito utilizada, desde os primórdios da LES, combina o efeito de filtragem com o de discretização num único processo, dispensando a filtragem explícita das equações de N-S, conforme descrito acima. Decorre daí a tradicional denominação de escalas sub-malha (SGS) para o termo modelado, embora alguns autores (Kravchenko e Moin, 1997, Chow e Moin, 2003) defendam que o processo de filtragem não deva guardar nenhuma dependência dos espaçamentos de malha, para que testes com diferentes malhas e larguras de filtro possam, de fato, validar a modelagem física envolvida. Segundo os mesmos autores, a banda utilizada nesta filtragem teria que ser, a rigor, ser bem menor que o inverso dos espaçamentos da malha, para que se possa isolar os erros de modelagem física dos erros associados à taxa de amostragem espacial, por sua vez, ligada ao espaçamento de malha.

Cada uma das etapas da LES descritas acima (filtragem, modelagem SGS, e discretização) representa por si só um desafio à parte, sendo todas elas críticas para o sucesso da simulação (Piomelli 1999).

Atualmente, as LES vêm sendo muito usadas em escoamentos acadêmicos clássicos, de geometria simples, para os quais se dispõe de dados experimentais ou oriundos de simulação numérica direta. A fim de que a utilização das LES seja também estendida a aplicações industriais cada vez mais complexas, faz-se necessária uma série de melhorias e estudos. Para tal, as LES devem lidar com geometrias bem mais complexas, número de Reynolds abrangendo faixas maiores, e multiplicidade de regimes de escoamento numa mesma aplicação (Moin, 2002).

As geometrias complexas e/ou extensas exigem uma capacidade de adaptação da malha bem maior do que a requerida nos ditos escoamentos clássicos ou acadêmicos. Entretanto, como o processo de filtragem e o de

geração de malha, na prática, guardam uma certa dependência, é imperativo que a metodologia permita o uso de malhas adaptáveis, tanto estruturadas, quanto não-estruturadas.

Tal necessidade é muitas vezes reforçada pela coexistência de variados e complexos regimes de escoamento, tais como camadas limites laminares, camadas limites turbulentas, separação, esteira, recolamento, e recirculações. Cada um destes regimes pode requerer uma definição de malha diferente, de forma que, quanto mais adaptável for a metodologia nesse sentido, mais fácil será atender às diferentes necessidades.

Em particular, regiões próximas a paredes apresentam características especiais e constituem, talvez, o maior desafio da LES atualmente. Duas razões para isso são a anisotropia acentuada e a necessidade de se simularem escalas de tamanhos bem inferiores aos do resto do escoamento. Desta forma, torna-se interessante a utilização de hipóteses simplificadoras que, em geral, levam ao emprego de leis de parede, de forma análoga ao que ocorre em simulações RANS. Como conseqüência, obtém-se uma enorme diminuição do número elementos de discretização necessários nessa região. No entanto, a fim de se alinhar com os objetivos mais audaciosos da LES e também de justificar o já elevado custo computacional da mesma, as exigências que recaem sobre as leis de parede aqui são bem maiores que as que se aplicam na metodologia RANS. Vale ressaltar que, por apresentar alta taxa de produção de energia cinética turbulenta devido às fortes tensões cisalhantes, é comum nessa região ocorrer um desequilíbrio energético, provocando a inversão do sentido natural da cascata de energias: a transferência líquida de energia, que em escoamentos isotrópicos longe de paredes, normalmente se dá no sentido das grandes para as pequenas escalas, passa então a ocorrer no sentido inverso, ou seja, das pequenas para as grandes escalas (Schmidt et al., 2003). Como esta cascata invertida, ou retrógrada, só é particularmente importante em regiões próximas às paredes ou em camadas de mistura, a maioria dos modelos SGS desconsidera este efeito, confiando, quando necessário, na utilização de uma lei de parede, que capture de forma adequada, as interações entre as diversas escalas. Deve-se considerar, no entanto, no desenvolvimento de um modelo LES de parede, não só a interação entre as várias escalas da região da parede, como também, a interação mútua entre as duas regiões (a próxima da parede e a restante). A maioria dos modelos propostos na literatura consideram que a região externa (onde são realizadas as simulações das grandes escalas propriamente ditas) estabelece, unidirecionalmente, as características e o comportamento da região da parede (Schmidt et al., 2003). De certa forma, isto equivale a assumir a

cascata normal de energia e ignorar a retrógrada. Schmidt et al. (2003) propuseram um modelo de Turbulência unidimensional, visando aumentar o acoplamento entre as regiões, que, porém, só foi testado para problemas relativamente simples (escoamentos em canais), onde não há separação de camada limite, recolamento, e outras dificuldades. Além disso, esse modelo exige um esforço computacional bem maior quando comparado a outros mais tradicionais e testados, como o de Piomelli e Balaras (2002), que, por sua vez, é um desenvolvimento da idéia apresentada em Balaras et al. (1996).

Outro tópico de grande importância é a modelagem sub-malha (SGSM) que, apesar de ser menos crítica do que na abordagem RANS, desempenha um papel fundamental nas LES, uma vez que representa a transferência de energia da faixa do espectro resolvida para a não resolvida. Dispõe-se atualmente de diversos modelos, que variam em grau de complexidade e capacidade de representação correta do fenômeno. Os modelos sub-malha vêm sendo muito estudados nos últimos anos, em função de se atribuir a estes o potencial de sucesso ou fracasso das LES. Além disso, note-se que uma evolução na representação das escalas sub-malha pode implicar em exigências menos restritivas de espessuras de filtro e de malha. Isto porque, quanto maior e mais abrangente (espectralmente) a capacidade de modelagem, menor a faixa do espectro que precisa ser simulada, o que traz benefícios imediatos, como o aumento da rapidez computacional e diminuição de erros numéricos.

No entanto, deve-se fazer uma ressalva. Alguns estudos (Kravchenko e Moin, 1997; Chow e Moin, 2003) mostraram que as atuais metodologias de discretização e filtragem podem apresentar erros que são da mesma ordem dos termos modelados, o que leva a questionar a real validade do esforço investido na SGSM. Segundo alguns autores, talvez mais importante que evoluções na modelagem SGS, é o desenvolvimento de processos de filtragem e discretização das equações. Esta opinião fundamenta-se em trabalhos comparativos de diversos modelos SGS (Fureby et al. , 1997) nos quais se mostrou que, para os esquemas de discretização comumente empregados, a diferença entre os resultados obtidos é, em alguns casos, praticamente inexistente.

Em suma, para que a LES tenha sua aplicabilidade estendida a escoamentos de real interesse para a engenharia, deve-se investir esforços em quatro áreas principais:

- Processo de filtragem e discretização;
- Versatilidade da malha;

- Modelagem submalha, SGS;
- Modelagem de regiões próximas a paredes.

Visando aliviar o custo computacional de simulações de grandes escalas, principalmente em regiões próximas a paredes, uma proposta que tem se mostrado interessante consiste na modelagem híbrida LES-RANS. Dentre as várias possibilidades existentes, a Simulação de Estruturas Desprendidas (“Detached-Eddy Simulation”, Spalart, 1997) provê uma transição suave e automática entre o emprego da metodologia RANS de Spalart-Almaras, utilizada em regiões próximas a paredes, e o da metodologia de grandes escalas, em regiões distantes das mesmas. Esta abordagem foi inspirada no fato de que os modelos RANS dificilmente conseguem representar satisfatoriamente as esteiras que se formam à jusante de corpos rombudos ou geometrias abruptas, após um descolamento da camada limite. Por simular a maior parte das estruturas turbulentas de um escoamento, a metodologia LES se mostra bem mais eficaz em tais casos, onde a complexidade da evolução temporal e tri-dimensional das mesmas desempenha um papel fundamental. Por outro lado, junto a paredes, onde uma simulação de grandes escalas genuína apresenta custos demasiadamente elevados, a proposta de Spalart assume, automaticamente, a forma de uma simulação RANS, mais simples, menos dispendiosa, e mais tolerante a variações de malha.

Tendo em vista que algumas regiões de um escoamento são satisfatoriamente representadas por uma metodologia RANS,

1.1

Objetivos e Definição do Escopo do Trabalho

Tendo em vista a importância do entendimento dos mecanismos envolvidos na formação e desenvolvimento de bolhas de recirculação longas, constatada em trabalhos anteriores (Crompton e Barret, 2000; Crompton, 2001, e Collie et al., 2003 e 2006), acredita-se que a aplicação da Simulação de Grandes Escalas (LES) a escoamentos sobre placas finas a baixo ângulo de incidência pode trazer contribuições valiosas para a compreensão dos fenômenos envolvidos. Além de uma poderosa ferramenta de análise e entendimento físico de escoamentos complexos, a LES pode ainda possibilitar futuros aperfeiçoamentos ou adaptações dos modelos RANS, específicos para esta classe de escoamentos, os quais devem ainda continuar por muitos anos como a alternativa mais rápida e viável para projetos e otimizações requeridas pelas aplicações industriais.

Sendo assim, são analisados neste trabalho escoamentos sobre placas finas e planas, com bordo de ataque em faca, de geometria idêntica às utilizadas nos trabalhos experimentais de Crompton (2001) e numéricos de Collie et al. (2006), através da metodologia de grandes escalas. A escolha desta geometria de estudo segue a mesma motivação dos autores acima, que consideraram a placa fina como uma excelente candidata a servir futuramente como caso-teste padrão para estudos envolvendo bolhas longas, não só pela simplicidade da geometria, como também pela certeza de que as bolhas formadas são do tipo “longo”. A mesma garantia não se pode esperar de aerofólios finos, mesmo operando em ângulos de ataque extremamente baixos, principalmente se o raio de curvatura do bordo de ataque não for desprezível comparado ao comprimento da bolha.

Os trabalhos anteriores de (Crompton e Barret, 2000; Crompton, 2001, e Collie et al. (2003)) evidenciaram enormes similaridades entre os vários casos de ângulos de ataque examinados, para a mesma geometria da placa plana e fina, a altos números de Reynolds (maiores que 10^5). Em particular, nota-se que os coeficientes de pressão sobre a superfície da placa, obtidos para ângulos de incidência entre 1 e 5 graus, colapsam numa mesma curva quando a distância sobre a placa é normalizada pelo comprimento da bolha de recirculação. Sendo assim, para efeitos do presente estudo, considera-se o caso de ângulo de incidência de 1 grau o representante desta classe de escoamento, por conter todas as estruturas importantes encontradas nos demais casos, porém numa região menos extensa, já que o comprimento da bolha é menor, o que diminui o número de elementos de malha requeridos.

Visando a melhor compreensão das estruturas e fenômenos envolvidos, o presente estudo utiliza simulações de grandes escalas, que, apesar de consideradas computacionalmente dispendiosas, disponibilizam detalhes transientes e tridimensionais do escoamento, não visíveis em simulações empregando metodologias RANS. As simulações de grandes escalas podem ser empregadas, não só com o intuito de se obter um resultado e compará-lo com os dados experimentais disponíveis, mas também no sentido de complementar as informações providas por estudos experimentais. Adicionalmente, os resultados das simulações numéricas podem indicar deficiências do procedimento experimental, já que as fontes de erros neste último diferem completamente das encontradas em métodos numéricos. No presente caso, apesar do grau de certeza dos experimentos de Crompton (2001) ser grande, o autor encontrou dificuldades para eliminar as vibrações do bordo de ataque, oriundas de interações fluido-estrutura altamente instáveis. Isso gera sus-

peitas de que o nível de turbulência medido seja realmente o de uma placa rígida. Além disso, muitas vezes, limitações físicas dificultam a eliminação de influências de paredes no túnel de vento, o que pode, por exemplo, tornar questionável a hipótese de escoamento sobre geometria de envergadura infinita (bi-dimensional). Sem tal hipótese, esse potencial candidato a caso-teste perde grande parte de sua simplicidade, uma vez que toda simulação numérica teria que envolver detalhes tri-dimensionais do túnel de vento empregado. Isso não só aumentaria o custo computacional das simulações como também adicionaria elementos de incerteza extra, dificultando o isolamento e compreensão das deficiências do método empregado.

Além de se almejar maior compreensão física do escoamento, um segundo objetivo deste trabalho é um aprofundamento no entendimento da metodologia LES. Assim, buscou-se obter um maior conhecimento de como os métodos numéricos envolvidos se comportam, quando se tornam instáveis, como estabilizá-los, quais as principais limitações da metodologia, e, na medida do possível, sugerir formas alternativas para contornar esses problemas.

Como subproduto do entendimento trazido pelas simulações realizadas com modelos sub-malha tradicionais, propôs-se uma abordagem alternativa para a modelagem das pequenas estruturas. Essa nova proposta foi concebida com o intuito de testar e comprovar, de forma simples, alguns conceitos relativos à turbulência, esquemas numéricos, e Simulações de Grandes Escalas.

1.2

Organização do Trabalho

Uma rápida revisão bibliográfica sobre a física do escoamento sobre placas planas, e sobre a metodologia de grandes escalas é apresentada no Capítulo 2.

O Capítulo 3 apresenta detalhadamente os aspectos da modelagem numérica da turbulência mais relevantes no contexto do presente trabalho. A transformação do sistema contínuo de equações que governam o escoamento, num sistema discreto que descreve a evolução das grandes escalas, envolve processos de filtragem e discretização, comuns a qualquer modelagem numérica. Tais processos implicam na introdução de erros, cujo entendimento é fundamental para a aplicação da metodologia. Embora a metodologia RANS não faça parte do escopo deste trabalho, mostra-se que sua semelhança com a LES é bem maior do que se poderia inicialmente supor, o

que motiva pesquisas para a integração das duas metodologias numa única. São então derivadas, a partir das Equações de Navier-Stokes, as equações que regem as Simulações de Grandes Escalas, e são detalhados dois dos principais erros cometidos neste processo: o erro de comutação e o erro que dá origem ao tensor sub-malha, o qual deve ser modelado a partir de hipóteses heurísticas. A compreensão e o controle desses erros são fundamentais para qualquer estudo envolvendo a metodologia, e se reflete, não só na modelagem física dos termos de fechamento, que é a essência do método, como também em aspectos do pré-processamento, como os cuidados necessários na geração da malha. Em especial, apresentam-se alguns modelos sub-malha, dentre os quais o escolhido pelo presente trabalho.

Havendo-se escolhido um código aberto (OpenFoam, 2006) escrito em C++, de distribuição gratuita e disponível na internet, como base para os desenvolvimentos necessários para este estudo, o Capítulo 4 descreve os esquemas numéricos empregados, relevantes não só para a aplicação dos modelos sub-malha tradicionais, como também para o entendimento da modelagem alternativa, apresentada no Capítulo 5.

O Capítulo 5 trata desta nova proposta que, baseada em conceitos fundamentais e simples, tenta assumir simultaneamente os papéis de modelar a cascata direta de energia, e de estabilizar os esquemas numéricos.

Visando auxiliar a compreensão da dinâmica envolvida nos esquemas numéricos e nas evoluções das estruturas turbulentas, a modelagem proposta é submetida a testes de validação no Capítulo 6. A proposta é testada em ordem crescente de complexidade, mostrando o funcionamento do esquema proposto para transporte linear de um escalar passivo unidimensional, bidimensional, e, posteriormente, para a evolução não-linear da turbulência numa caixa periódica, com o clássico caso de turbulência homogênea e isotrópica.

No Capítulo 7 são então finalmente apresentados e analisados os resultados obtidos para o escoamento aerodinâmico incompressível sobre placas planas e finas. O caso de ângulo de ataque de 1 grau, é exaustivamente testado, tanto com o clássico modelo sub-malha de uma equação (Yoshizawa e Horiuti, 1985), com a utilização de várias malhas, quanto com a modelagem proposta. São então apresentados ao final do capítulo, alguns resultados para o caso de 3 graus.

O Capítulo 8 conclui o trabalho, resumindo os pontos principais, e discutindo os principais problemas encontrados e sugestões para trabalhos futuros.