

1 Introdução

Escoamentos no regime turbulento fazem parte do nosso dia a dia, podendo ser encontrados na maioria das aplicações nos setores da indústria, como por exemplo, na indústria aeronáutica e automobilística. Também são encontrados em outros campos do conhecimento, como meio ambiente, agricultura, aplicações biológicas e até em materiais porosos (Assato, 2001). Um correto entendimento e descrição deste fenômeno é muito importante no avanço de diversas aplicações do cotidiano da sociedade, se mostrando de grande importância nos avanços científicos e tecnológicos, auxiliando a encontrar melhores condições de conforto e segurança para o homem. O emprego das técnicas relacionadas ao fenômeno turbulento pode ser bem exemplificado na indústria de defesa. Atualmente há um grande esforço pelo desenvolvimento e otimização de novos armamentos (Dietrich et al, 2004). Muitos projéteis são lançados e estabilizados em vôo através de aletas fixas (Figura 1.1) e móveis, onde o estudo do escoamento turbulento ao redor destas empenas pode ser bastante útil na melhoria do alcance, no controle e na precisão deste tipo de engenho. O efeito turbulento produz aumento das forças de fricção, retardo na separação da camada limite e outras características que devem ser analisadas para se obter o melhor desempenho.

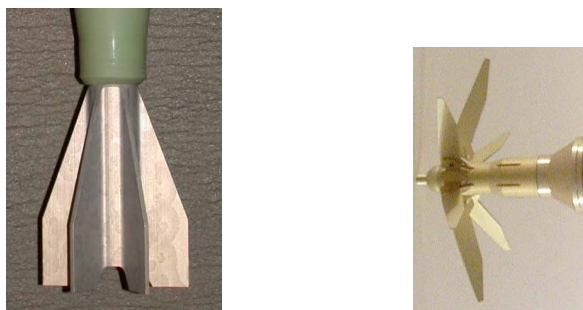


Figura 1.1 – Aletas fixas para estabilização de projéteis.

Desta forma, a busca constante de melhores técnicas experimentais e métodos numéricos que possam prever tais comportamentos dos escoamentos

turbulentos sobre estabilizadores de projéteis torna-se muito importante sobre dois aspectos: um técnico, que permite através das análises de resultados preliminares o melhor desenvolvimento do engenho bélico, e outro financeiro, que proporciona a possibilidade de execução de um menor número de testes de campo, já que cada disparo, seja de um míssil autopropulsado ou de um projétil de canhão, é bastante oneroso.

Tais aperfeiçoamentos nas técnicas de previsões balísticas (Rodano e Damario, 1976; Johnson, 1992; Sakharov e Tropp, 2005) vem melhorando de forma significativa o desempenho dos armamentos nos dias atuais. Armas que lançavam projéteis a apenas 100 metros sem grande precisão possuem capacidade hoje de alcançar marcas de 600 a 1000 metros com apurado sucesso no alvo.

Entre os projetos bélicos mais importantes que usam aletas e aerofólios estabilizadores e asas de sustentação estão os mísseis autopropulsados, que possuem aletas fixas e móveis para estabilização e controle; os projéteis de canhões, que possuem apenas aletas fixas; e os veículos aéreos não tripulados (VANT), que possuem asas para sustentação.

Fixando-se no problema da otimização de asas e aletas finas, uma forma de abordagem do assunto é estudo do escoamento turbulento ao redor de placas finas. A motivação para esta escolha deve-se ao fato da geometria ser bem simples e de haver similaridade dos fenômenos físicos envolvidos e a presença dos mesmos regimes de escoamento observados em aletas, asas e aerofólios. Estudos em aerodinâmica de placas finas ainda permitem um entendimento maior do problema físico, sobretudo quando a turbulência exerce certa importância (Crompton & Barret, 2000; Collie, 2005 & Collie et al. 2008; Sampaio 2006).

A presença de bolhas de recirculação nos escoamentos sobre aletas, aerofólios e asas, consiste no principal fenômeno físico para este tipo de escoamento. A maioria das pesquisas relacionadas aos escoamentos sobre aerofólios com superfícies arredondadas concentra-se na bolha de separação curta. Esse tipo de bolha caracteriza-se por uma separação no regime laminar seguido por uma rápida transição e recolamento, sendo seu comprimento em torno de 1% a 2% da corda. Em condições normais essa bolha ocorre próximo do bordo de ataque, porém em certas circunstâncias pode localizar-se mais a jusante da superfície de escoamento, dependendo da inclinação e da geometria do aerofólio. A existência desta bolha influencia o desempenho do aerofólio,

aumentando o arraste e, em alguns casos, a não formação da bolha provoca a perda de sustentação (*stall*).

Em determinadas circunstâncias esta zona de recirculação ocorre desde o bordo de ataque até algum ponto ao longo do aerofólio, assumindo a forma de uma bolha fina e alongada, que é o assunto desta tese.

Essas bolhas finas e alongadas resultam da separação do escoamento em aerofólios finos, com a extremidade de ataque em forma de “faca”, sendo esta bolha conhecida como “*thin aerofoil bubble*” (Gault, 1957). Tradicionalmente, os estudos sobre este tipo de bolha receberam menos atenção que a bolha curta. Entretanto, desde a década de 50, o interesse pelo fenômeno *thin aerofoil bubble* cresceu devido ao aumento da velocidade das aeronaves e a conseqüente necessidade de utilização de aerofólios finos para reduzir efeitos de compressibilidade. Mais tarde, outras aplicações levantaram o interesse por este tipo de escoamento, como no caso do uso de aletas finas para estabilização e guiamento de engenhos de defesa bélica, projetos de pás com menores espessuras em turbomáquinas e turbinas, e no entendimento das características de aerofólios flexíveis em velas de navegação.

A bolha de separação fina e alongada, decorrente do escoamento sobre uma geometria com ponta afiada, é caracterizada por dois processos que acontecem sempre: um rápido gradiente de pressão na extremidade principal e o recolamento atrasado (o comprimento de bolha que aumenta com incidência). A natureza deste tipo de bolha está mais relacionada com a separação do escoamento devido à presença de geometrias abruptas (degraus, placas e outros semelhantes) do que a bolha de separação laminar curta em um aerofólio arredondado.

A distribuição de pressão em um aerofólio devido a uma bolha longa de recirculação ocorre principalmente devido à curvatura da camada mistura que envolve a bolha e pela própria estrutura interna da bolha. Desta forma, a maior parte da sustentação e arrasto acontece devido 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.

O formato e o comprimento da bolha fina e a curvatura das linhas de corrente que a cercam, dependem dos níveis e direções preferenciais da turbulência na camada cisalhante formada em torno da bolha e na camada limite.

Em termos de distribuição de pressão sobre os aerofólios, a bolha curta só tem um pequeno efeito no escoamento potencial externo, enquanto a bolha fina

e alongada altera completamente a distribuição de pressão ao redor do perfil aerodinâmico.

Embora uma bolha de separação deva ser evitada em muitos casos, pois normalmente resulta em perda de rendimento do aerofólio, em algumas situações pode ser vantajosa. A baixos números de Reynolds a presença da bolha pode atrasar o recolamento, induzindo ao desenvolvimento de uma camada limite turbulenta de recuperação que é resistente a separação.

Crompton (2001) realizou uma série de experimentos em túnel de vento para avaliação e visualização do escoamento aerodinâmico sobre uma placa plana e fina, utilizando-se como principal técnica de medição a Velocimetria Laser Doppler (*Laser Doppler Velocimetry* - LDV), visando o melhor entendimento dos fenômenos físicos envolvidos na formação e desenvolvimento de bolhas longas e finas. As medições de Crompton foram realizadas para escoamentos com altos números de Reynolds, apresentando estruturas turbulentas intensas e altamente anisotrópicas.

O experimento sobre a placa plana realizado por Crompton (2001) envolve as estruturas turbulentas complexas existentes no estudo de recirculações longas. Resultados como perfis e contornos de velocidades média e r.m.s. (*root mean square*), coeficientes de pressão ao longo da placa e comprimentos de recolamento, são os principais dados disponíveis. Uma vez que a geometria é simplificada e existe grande quantidade de dados, este experimento foi considerado em alguns trabalhos (Collie, 2005; Collie et al., 2008; Sampaio, 2006; Rezende & Nieckele, 2007; Rezende et al., 2008, 2009a, 2009b), permitindo realizar comparações com simulações numéricas.

No caso de placas finas e planas, o ângulo de ataque (α) é o principal fator determinante desse comprimento de recolamento. Exemplificando (Crompton, 2001), para $\alpha = 1^\circ$, 3° e 5° os comprimentos de recolamento valem 14%, 47% e 94% da corda da placa, respectivamente. Para ângulos de ataque maiores que 5 graus não há mais recolamento, pois a camada cisalhante livre não consegue mais atingir a superfície superior da placa.

Gault (1957) reportou que as bolhas longas proporcionam estruturas turbulentas maiores e mais anisotrópicas. Além disso, o regime turbulento predomina em quase toda a extensão da camada cisalhante que envolve a bolha, pois a transição de regime laminar para turbulento, que ocorre na camada de mistura livre, normalmente acontece logo após ou muito próximo da separação na extremidade de ataque. Desta forma, as bolhas do tipo *thin aerofoil bubble* oferecem grandes desafios computacionais.

O escoamento turbulento é caracterizado por ter elevados números de Reynolds e por apresentar um comportamento difusivo, tridimensional e transiente. A turbulência pode ser descrita como um fenômeno contínuo, pois as escalas envolvidas nestes escoamentos são, normalmente, muito maiores do que as escalas de comprimento do movimento molecular.

As equações de conservação de massa, energia e quantidade de movimento da mecânica dos fluidos, obtidas da mecânica do contínuo, são utilizadas como modelo matemático para estudo de escoamentos, tornando-se um sistema complexo de equações diferenciais parciais. Este sistema contém equações constitutivas, condições iniciais e de contorno, que devem ser resolvidas, muitas vezes, em domínios de geometria variável, acrescentando maior dificuldade ao problema.

Devido à discretização espacial e temporal, imprescindível para qualquer simulação direta de todas as escalas envolvidas (simulação numérica direta da turbulência), este tipo de análise torna-se inviável para a maioria dos casos de engenharia. Esta inviabilidade é causada pela enorme quantidade de equações a serem processadas, que geram a necessidade de grande armazenamento de dados, bem como longos tempos de processamento.

Quando a simulação direta é inviável, utilizam-se metodologias alternativas. Modelos baseados nas equações médias de Reynolds (*Reynolds Average Navier-Stokes* – RANS) vêm sendo adotados em determinados problemas de engenharia envolvendo escoamentos turbulentos. Nesta técnica as equações de conservação da massa, quantidade de movimento e energia são resolvidas considerando a média sobre intervalos de tempo para o estudo da turbulência. Por causa deste método de média no tempo surgem nestas equações, incógnitas denominadas de tensões turbulentas, que são modeladas para representar os efeitos totais da turbulência no escoamento médio. A solução obtida consiste em valores médios das variáveis do escoamento.

Outra técnica bastante utilizada é a Simulação de Grandes Escalas (*Large Eddy Simulation* – LES), que consiste em resolver as equações de conservação para as grandes escalas dos escoamentos e empregar modelos para representar os efeitos das escalas inferiores à resolução obtida pela discretização espacial do problema, denominadas escalas sub-malha (Vasilyev et al, 1998; Lesieur et al, 1997).

No caso específico deste estudo, que é a simulação numérica do escoamento complexo e turbulento sobre uma placa plana fina visando prever a bolha de recirculação formada, a região próxima à parede apresenta

características especiais e constituem, talvez, o maior desafio dos modelos de turbulência atualmente. A anisotropia acentuada e a necessidade de se simularem escalas de tamanhos bem inferiores aos do resto do escoamento são os dois maiores motivos para este desafio. Assim, apropriados modelos de turbulência baseados nas metodologias das equações médias de Reynolds e da Simulação de Grandes Escalas são aplicadas para resolver o escoamento complexo proposto nesta tese.

1.1. Objetivo e Escopo do Trabalho

O objetivo do presente trabalho consiste em compreender o fenômeno físico da formação e desenvolvimento de bolhas de recirculação longas, originado do escoamento sobre uma placa plana e fina. Estudos anteriores (Crompton, 2001; Collie, 2005; Collie et al., 2008; Sampaio, 2006) mostram a importância e o interesse pelo aprofundamento deste tema. Através da aplicação de modelos de turbulência (RANS e LES) neste tipo de escoamento, pode-se obter um melhor entendimento dos fenômenos envolvidos.

As principais características do modelo RANS neste tipo de análise são a rapidez e viabilidade computacional que este tipo de abordagem oferece, sendo normalmente preferido nas aplicações industriais. Entretanto, o modelo LES é uma ferramenta mais poderosa de análise e entendimento físico de escoamentos complexos, mesmo tendo um custo computacional mais elevado.

Desta forma, escoamentos sobre placas planas finas e inclinadas com extremidade de incidência em forma de faca são avaliados neste estudo, através de selecionados modelos RANS e LES. A geometria básica de simulação é análoga às empregadas nos experimentos de Crompton (2001) e nos resultados numéricos de Collie (2005) e Sampaio (2006). A opção por esta geometria da placa plana para estudos sobre bolhas longas é devido a sua simplicidade e pela certeza de que as bolhas formadas são do tipo “*thin aerofoil bubble*”, sendo estas as mesmas motivações dos trabalhos dos autores anteriores. Se fossem usados aerofólios finos com baixos ângulos de ataque, não haveria certeza da ocorrência deste fenômeno, especialmente se a razão entre o raio de curvatura do bordo de ataque e o comprimento da bolha não for desprezível.

Os trabalhos anteriores de Collie (2005) e Sampaio (2006) enfatizaram suas pesquisas numéricas no caso do ângulo de ataque de um grau ($\alpha = 1^\circ$) para a placa plana. Estes autores ressaltam que para este caso o comprimento

da bolha é menor, diminuindo o número de elementos da malha e, conseqüentemente, levando a um custo computacional menor. Collie (2005) abordou o caso apenas sob o enfoque RANS, enquanto Sampaio (2006) utilizou somente a modelagem LES. Ambos os autores ainda apresentaram resultados para $\alpha=3^{\circ}$, porém houve grandes discrepâncias, que foram atribuídas à qualidade da malha. Resultados para ângulos maiores não foram apresentados em ambos os estudos anteriores.

Neste trabalho são abordados ambos os modelos RANS e LES, para os ângulos de incidência $\alpha = 1^{\circ}, 3^{\circ}$ e 5° , visando o maior entendimento do fenômeno estudado. A importância deste estudo torna-se interessante à medida que os resultados são mostrados, pois determinadas conclusões sugeridas pelos autores anteriormente mencionados são reformuladas neste trabalho, como é o caso do aparecimento de uma segunda bolha de recirculação para $\alpha = 5^{\circ}$, com um dos modelos RANS apresentado. Collie (2005) e Sampaio (2006) concluíram que usando esta abordagem não haveria possibilidade de prever esta segunda bolha.

Definido o objetivo principal, que é obter um melhor entendimento físico deste escoamento complexo, uma segunda finalidade desta tese é a maior compreensão dos modelos de turbulência (RANS e LES) utilizados. Desta forma, procurou-se um maior aprofundamento no comportamento dos métodos numéricos envolvidos, apontando os melhores resultados, as principais limitações dos modelos de turbulência estudados e sugerindo formas alternativas para contornar essas limitações.

A modelagem LES pode ser usada, não somente na comparação de resultados com os dados experimentais disponíveis, mas também com o objetivo de complementar as informações obtidas por estudos experimentais. Os resultados numéricos com a Simulação de Grandes Escalas podem sugerir deficiências da metodologia experimental, pois os erros encontrados nos experimentos são totalmente diferentes dos obtidos numericamente. Isto pode ser exemplificado através dos relatos de Crompton (2001), descrevendo sobre a influência das paredes do túnel de vento, que pode gerar dúvidas sobre a hipótese de bidimensionalidade da geometria estudada. Sem esta hipótese, a simulação teria que envolver detalhes tridimensionais das dimensões do túnel de vento empregado, aumentando o custo computacional das simulações e dificultando o isolamento e a compreensão das deficiências do método empregado, pois adiciona outros fatores de incerteza. Outro exemplo descrito por Crompton é associado as dificuldades encontradas na eliminação das vibrações provenientes das interações fluido-estrutura altamente instáveis

ocorridas no bordo de ataque, provocando suspeitas de que o nível de turbulência medido seja realmente o de uma placa rígida.

Portanto, as simulações numéricas do escoamento sobre a placa plana com os modelos de turbulência RANS e LES e os três ângulos de ataque propostos formam uma investigação ampla sobre a ocorrência da bolha longa e fina (*thin aerofoil bubble*).

Para alcançar o objetivo descrito, utilizou-se o software comercial GAMBIT para gerar a geometria e malha e Fluent 6.3.26 para determinar o campo de velocidade, pressão e grandezas turbulentas. Para pós-processar os dados, utilizou-se os softwares MATLAB, TecPlot e Paraview 3.4.0.

1.2.

Organização do Trabalho

O segundo capítulo descreve uma breve revisão bibliográfica sobre o fenômeno físico da formação e desenvolvimento de bolhas longas e finas, resultantes do escoamento sobre placas planas. Além disso, também inclui comentários sobre a revisão dos modelos de turbulência utilizados.

O terceiro capítulo apresenta as equações que governam o escoamento de um fluido incompressível. A partir destas equações são desenvolvidos e apresentados os modelos de turbulência (RANS e LES) utilizados neste trabalho. Os modelos RANS selecionados para analisar o escoamento, são Spalart-Allmaras (Spalart & Allmaras, 1992), SST $\kappa-\omega$ (Shear-Stress Transport $\kappa-\omega$) (Menter et al, 2003) e RSM (Reynolds Stress Model) (Launder et al, 1975; Launder & Shima, 1989). Para simulação LES selecionou-se o modelo Smagorinsky Dinâmico (Germano et al, 1991; Lilly, 1992).

A discretização das equações de transporte e os métodos numéricos necessários às simulações desta tese são apresentados no Capítulo 4.

Os Capítulos 5, 6 e 7 finalmente apresentam e analisam os resultados obtidos para os ângulos de ataque $\alpha = 1^\circ$, 3° e 5° , respectivamente, referente ao escoamento incompressível sobre a placa plana fina. Os principais resultados contidos nestes três capítulos são os perfis e contornos das grandezas de primeira e segunda ordem do escoamento, além de contornos tridimensionais que mostram a evolução da turbulência.

A conclusão do trabalho encontra-se no oitavo capítulo, resumindo os pontos principais, e discutindo os principais problemas encontrados e sugestões para trabalhos futuros.