

8

Comentários Finais

Neste trabalho, estudou-se o escoamento sobre uma placa plana fina e inclinada, com bordo de ataque chanfrado, sujeito à diferentes ângulos de incidência. Para isto, utilizou-se modelos de turbulência baseados nas metodologias RANS (Equações de Médias de Reynolds) e LES (Simulação de Grandes Escalas). Os resultados numéricos obtidos foram comparados com os dados experimentais de Crompton (2001).

Este tipo de escoamento é uma tarefa complexa e desafiadora para os modelos de turbulência. Assim, foram escolhidos os modelos Spalart-Allmaras (Spalart & Allmaras, 1992), SST (Menter, 2003) e RSM (Launder et al, 1975; Launder & Shima, 1989), para aplicação das Equações de Médias de Reynolds. O modelo LES Dinâmico (Germano et al, 1991; Lilly, 1992) foi adotado para a obtenção dos resultados através da Simulação de Grandes Escalas.

As soluções com estes modelos foram obtidas para o escoamento aerodinâmico em torno da placa plana com três ângulos de ataque diferentes, $\alpha = 1^\circ$, 3° e 5° . Apenas o modelo RSM não obteve resultados para os ângulos $\alpha = 3^\circ$ e 5° . Em todas as simulações, o número de Reynolds baseado no comprimento da corda foi igual a $2,13 \times 10^5$.

Nas simulações RANS foi utilizado um domínio computacional bidimensional, com malha estruturada e maior refinamento próximo a superfície superior da placa. Para o modelo LES Dinâmico, com $\alpha = 1^\circ$ e 5° , esta malha foi expandida para o caso tridimensional, sendo que para o caso de $\alpha = 3^\circ$ foi construída uma nova malha colocando a placa inclinada e o escoamento paralelo à malha.

Utilizou-se o código Fluent 6.3.26 (Fluent 2006) para aplicação dos modelos de turbulência e suas respectivas soluções. Este código é baseado no Método de Volumes Finitos. Empregou-se em todos os casos RANS o esquema QUICK (Leonard & Mokhtari, 1991) para discretização espacial, sendo que para o caso SST para $\alpha = 1^\circ$, o esquema Power-Law (Patankar, 1980) também foi adotado. Usou-se para o caso LES Dinâmico o esquema de Diferenças Centrais aliado ao método do Diagrama das Variáveis Normalizadas (Leonard, 1991) e ao

Critério de Convecção Limitada (Gaskell & Lau, 1988). O acoplamento pressão-velocidade foi realizado através dos algoritmos SIMPLE (Patankar, 1980) e PISO (Issa, 1986), para os modelos RANS e LES, respectivamente. No caso LES, cuja solução do escoamento é transiente, empregou-se discretização temporal de segunda ordem com uma formulação totalmente implícita (Patankar, 1980), por ser esta incondicionalmente estável. O código Fluent 6.3.26 soluciona os sistemas de equações algébricas através do método Multigrid (Hutchinson e Raithby, 1986). Esse conjunto de abordagens numéricas permitiu a estabilidade numérica das soluções RANS e LES.

8.1. Conclusão

Os resultados obtidos pelos modelos Spalart-Allmaras e SST apresentaram um menor crescimento da camada cisalhante livre, situada externamente à bolha de recirculação principal, com uma curvatura menos acentuada na direção do ponto de recolamento do que a observada experimentalmente. Isto se deve ao fato de que há vários fenômenos que não são capturados adequadamente pelos modelos Spalart-Allmaras e SST. Primeiramente, observa-se analisando os dados experimentais que há um aumento da taxa de mistura na região próxima ao bordo de ataque, devido à camada cisalhante livre ser agitada e instável. Outro fator importante é que analisando os dados de Crompton (2001), principalmente, nos casos de $\alpha = 3^\circ$ e 5° , que o transporte e a produção de energia cinética turbulenta dominam a dissipação de energia cinética turbulenta e κ continua aumentando ao longo do comprimento da camada cisalhante livre. O menor crescimento da camada cisalhante livre, previsto pelos modelos Spalart-Allmaras e SST, causa um maior coeficiente de pressão na maior parte do interior da bolha principal.

O escoamento reverso, no interior da bolha de recirculação principal, está sujeito a um gradiente de pressão favorável, que causa relaminarização e o surgimento da bolha secundária. Em todos os ângulos de ataque estudados esse fenômeno não foi capturado pelo modelo Spalart-Allmaras, pois ele é projetado para escoamentos completamente turbulentos, sendo inábil para modelar efeitos transitivos. Desta forma, este modelo não previu a bolha secundária próxima da extremidade principal para nenhum dos ângulos de ataque estudados.

Para $\alpha = 1^\circ$ e 3° , o modelo SST também não previu a bolha secundária.

Porém, no caso de $\alpha = 5^\circ$, este modelo conseguiu captar a presença desta estrutura, pois o maior caminho permitido ao escoamento reverso foi suficiente para que houvesse a relaminarização do fluxo. Isto mostra que a modelagem da turbulência relativa à camada de mistura, baseada na hipótese de Bradshaw (1967) e na função de mistura que acopla os modelos $\kappa-\varepsilon$ e $\kappa-\omega$, é mais eficaz que a fornecida pelo modelo Spalart-Allmaras. Cabe ressaltar que os trabalhos de Collie (2005) e Sampaio (2006) afirmam que os modelos RANS não possuem capacidade suficiente para prever esta estrutura, sendo provado o contrário nesta investigação.

Acredita-se que a omissão da bolha secundária na maioria dos resultados RANS não seja um problema de malha, pois foram testados alguns desses casos em uma malha muito refinada e foram obtidas as mesmas previsões.

Aproximando-se do ponto de recolamento, ambos os modelos, Spalart-Allmaras e SST, amortecem a energia cinética turbulenta devido à presença da parede. Os dados experimentais mostram que as flutuações turbulentas normais à parede também são amortecidas, porém esta energia é distribuída para as flutuações turbulentas nas direções da corda e da envergadura. Os modelos Spalart-Allmaras e SST usam uma formulação mais isotrópica, devido à viscosidade turbulenta, não conseguindo modelar perfeitamente este efeito anisotrópico. Esta situação pode ser verificada nos três ângulos de incidência.

Analisando-se principalmente o caso de $\alpha = 1^\circ$, observa-se que a jusante do recolamento, os perfis de velocidade dos modelos RANS recuperaram mais lentamente o equilíbrio turbulento, comparativamente com os dados experimentais. Observando-se os dados experimentais, nota-se que as estruturas turbulentas existentes nesta região, originam-se na camada cisalhante livre separada, e internamente os turbilhões estão associados com o desenvolvimento da nova camada de limite. Desta forma, não se espera que os modelos Spalart-Allmaras e SST simulem perfeitamente este complicado processo de recuperação que envolve um espectro de turbulência irregular. Além disso, como dito anteriormente, os efeitos anisotrópicos que acontecem na camada cisalhante livre separada na região de recolamento não podem ser capturados por estes modelos de turbulência. Os modelos Spalart-Allmaras e SST simplesmente amortecem a energia cinética turbulenta associada às flutuações de velocidade normal à placa ao invés de redistribuí-las. Assim, esses dois modelos RANS simulam uma recuperação mais lenta da camada de limite a jusante do recolamento.

Comparando os modelos de uma e duas equações da metodologia RANS, considerando os três casos de $\alpha = 1^{\circ}$, 3° e 5° , verificou-se que o modelo SST mostrou maior precisão na captura dos fenômenos relacionados à bolha principal de recirculação do que o modelo Spalart-Allmaras. Além disso, o modelo SST também previu maiores níveis de energia cinética turbulenta nas proximidades do bordo de ataque, proporcionando um crescimento maior da camada de mistura em todos os casos estudados. Em geral, ambos os modelos previram os comprimentos de recolamento adequadamente. Observou-se que a camada de mistura prevista pelo modelo de SST possui maior curvatura na direção do ponto de recolamento que o modelo Spalart-Allmaras.

A utilização do modelo SST resultou em menores níveis de energia cinética turbulenta na segunda metade da bolha de recirculação principal, pois há um limite do modelo onde κ é proporcional à tensão cisalhante de Reynolds (hipótese de Bradshaw). Já o modelo Spalart-Allmaras previu valores bem menores de energia cinética turbulenta.

O uso do modelo RSM resultou numa anomalia na região próxima a zona de recolamento para $\alpha = 1^{\circ}$, que já havia sido mostrado em trabalhos anteriores referentes a escoamentos sobre degrau. Este resultado espúrio se caracteriza pela inclinação para trás da linha de corrente que divide o escoamento na direção do ponto de recolamento, gerando dobras nos perfis de velocidade nas proximidades da parede. Por este motivo, os resultados com este modelo ficaram relativamente prejudicados, como pode ser visto através dos gráficos de linhas de corrente e coeficiente de pressão. Entretanto, o modelo RSM mostrou maior coerência nos resultados das grandezas turbulentas de segunda ordem, apresentando a anisotropia que os outros dois modelos RANS não são capazes de simular. Para as simulações com $\alpha = 3^{\circ}$ e 5° , utilizando-se o modelo RSM, não houve convergência através dos métodos numéricos descritos neste estudo.

No caso da Simulação de Grandes Escalas, através do modelo LES Dinâmico, os resultados quantitativos obtidos para a região de interesse do presente estudo ficaram bem mais próximos dos dados experimentais do que os simulados através dos modelos RANS. Isto é devido ao fato de que a maior parte da energia existente no escoamento é calculada numericamente, ao invés de ser modelada, como acontece nos casos RANS. Além disso, a parcela que possui menos energia e necessita ser modelada na metodologia da Simulação de Grandes Escalas é composta de estruturas menores, que sofrem pouca influência da geometria e são mais universais e passíveis de modelagem física.

A melhor forma de comparação entre os resultados LES e RANS é através de uma atenta análise da distribuição de pressão sobre placa, pois esta variável influi bastante na força de sustentação resultante, a qual na maioria dos casos é o maior objetivo nas aplicações de engenharia. Os resultados obtidos com o modelo LES Dinâmico, para $\alpha = 1^\circ$, 3° e 5° , apresentaram desvios menores do coeficiente de pressão do que os proporcionados pelos modelos RANS, quando comparados com os dados de Crompton em quase todo o comprimento da corda. Acredita-se que a qualidade dos resultados LES é devido a correta determinação da cascata de energia proveniente das grandes escalas é corretamente modelada pela formulação tri-dimensional transiente. Conclui-se que a piora nas previsões com o LES Dinâmicos dos casos $\alpha = 3^\circ$ e 5° , é relacionada ao refinamento e distribuição da malha empregados neste trabalho.

A Simulação de Grandes Escalas também se mostrou superior na previsão dos resultados referentes aos perfis de velocidade para todos os ângulos de ataque estudados. Com o ângulo de ataque $\alpha = 1^\circ$, verificou-se uma excelente concordância das curvas de velocidade entre os dados LES Dinâmico e experimentais, tanto no interior da bolha principal quanto à jusante do ponto de recolamento, sendo que nessa última região foi observado que não houve a lenta recuperação da camada limite turbulenta, como ocorrido com os modelos RANS.

Com relação as médias de flutuações turbulentas de segunda ordem, o modelo LES Dinâmico proporcionou resultados melhores que todas as outras simulação realizadas anteriormente para este problema da placa plana, levando-se em consideração os três ângulos de incidência $\alpha = 1^\circ$, 3° e 5° . Pôde-se observar que a captura da anisotropia do problema foi fator fundamental para a superioridade dos resultados, principalmente sobre os modelos SST e Spalart-Allmaras, que adotam a hipótese de Boussinesq para simular as tensões de Reynolds. Além disso, o modelo LES Dinâmico simulou a distribuição de energia próxima ao ponto de recolamento de forma mais coerente, ou seja, a energia amortecida das flutuações turbulentas normais à parede foram difundidas para as flutuações turbulentas nas direções da corda e da envergadura.

Na comparação com o modelo f-LES para $\alpha = 1^\circ$, os resultados das grandezas de segunda ordem do modelo LES Dinâmico também foram mais consistentes com os dados de Crompton. O modelo f-LES mostrou que as médias das flutuações turbulentas de segunda ordem foram subestimadas próximo ao bordo de ataque e superestimadas em regiões posteriores. Isto

indica que a escolha da malha, relativos ao refinamento e uniformidade, foi mais adequada que nos casos estudados em trabalhos anteriores.

A presença da bolha de recirculação secundária, formada após o processo de relaminarização da camada limite reversa no interior da bolha principal, foi constatada em todos os casos simulados com o modelo LES Dinâmico nesta investigação. Apenas um único caso RANS foi capaz de detectar essa estrutura, que foi com o modelo SST para $\alpha = 5^\circ$.

Desta forma, conclui-se que o processo de filtragem decorrente da metodologia RANS é bastante restritiva, levando à perda de informações inerentes ao escoamento. Em particular, parece ser difícil que a complexidade e a quantidade de informações existentes nas flutuações turbulentas, confirmadas através dos resultados obtidos nas grandezas de segunda ordem com o modelo LES Dinâmico, possam ser corretamente conseguidas por meio de um único campo escalar, v_t , ou por uma representação bi-dimensional do escoamento, como foram os casos dos modelos SST e Spalart-Allmaras. O modelo RSM pode ser considerada uma solução melhor neste sentido, porém necessita de maior investigação para o caso em estudo.

Dos três ângulos de ataque simulados com o modelo LES Dinâmico, o maior erro no comprimento de recolamento (X_R) foi obtido para $\alpha = 3^\circ$. Para $\alpha = 1^\circ$ e 5° esse resultado foi mais preciso. No caso da simulação com o ângulo $\alpha = 3^\circ$ existe uma maior influência das regiões antes e após o recolamento, ou seja, há a dificuldade da correta previsão do fenômeno da bolha de recirculação principal juntamente a necessidade de um resultado coerente para zona de recuperação que não se completa totalmente, dificultando à correta solução do valor do comprimento de recolamento nesse caso. Para $\alpha = 1^\circ$, a bolha é bem menor e a camada limite turbulenta é completamente recuperada a jusante do ponto de recolamento. Com o ângulo de ataque $\alpha = 5^\circ$, o tamanho da bolha principal de recirculação é quase igual ao comprimento da corda e não há praticamente influência da zona de recuperação para previsão de X_R . Desta forma, conclui-se que as regiões antes e após o recolamento influenciam numericamente o cálculo de X_R , sendo que para melhorar os resultados há a necessidade de se ter uma malha mais refinada e uniforme sobre toda a extensão da placa.

Com estas informações, para $\alpha = 3^\circ$ foi testada uma outra malha com mais volumes de controle e maior homogeneidade sobre a placa, além disso, definiu-se o domínio de forma a que o escoamento na entrada do domínio fosse

paralelo a malha, numa tentativa de diminuir a difusão numérica. Assim o valor do comprimento de recolamento para este ângulo melhorou, comprovando a conclusão de necessidade de melhoria da malha.

Através das simulações numéricas do escoamento sobre uma placa plana com três diferentes ângulos de ataque, houve um maior entendimento físico deste fenômeno. O efeito mais importante da mudança do ângulo de ataque foi a alteração no comprimento da bolha de separação. Com o aumento da incidência, o ponto de recolamento se move progressivamente para o bordo de fuga, até o momento em que a camada cisalhante não recola mais.

Sabe-se que nos três casos de pequenos ângulos de ataque investigados há a presença de bolhas secundárias internas à bolha principal. Essa estrutura secundária demonstrou possuir as mesmas características das bolhas laminares, como pôde ser visto nas simulações com o modelo LES Dinâmico.

Com relação a distribuição de pressão na superfície superior da placa, há um pico de sucção localizado próximo ao centro da bolha. Esta região de baixa pressão se origina devido a força centrípeta que deve existir a fim de manter a circulação do fluido no interior da bolha. Posteriormente a essa zona de mínima de pressão, há um aumento da pressão até a região posterior da bolha, que se estabiliza e continua quase constante até o fim da placa.

8.2. Recomendações

Referente à estudos futuros, o conhecimento obtido nesta investigação possibilitará um melhor entendimento do escoamento sobre aerofólios finos, como os existentes em aletas de mísseis, foguetes e projéteis, onde há o surgimento da uma bolha longa similar a apresentada neste trabalho. Os modelos RANS requerem menor custo computacional, porém não fornecem a riqueza de detalhes dos modelos LES. Entretanto, a Simulação de Grandes Escalas desta classe de escoamentos exige um número de graus de liberdade e um esforço numérico muito altos, pois podem aparecer outras estruturas, dependendo da geometria aerodinâmica. Desta forma, a determinação do local da separação do escoamento é fundamental e depende da solução correta dos níveis de turbulência a montante deste ponto. Pode-se investigar também, visando diminuir o esforço computacional, o uso de metodologias híbridas RANS e LES.

Um próximo passo natural para esta investigação é o projeto de uma malha mais refinada e regular para avaliação deste parâmetro que vêm sendo considerado um dos maiores problemas para captação perfeita da bolha de recirculação.

Além disso, com a evolução constante dos equipamentos para processamento paralelo computacional, pode-se avaliar os resultados através da Simulação Numérica Direta. O uso desta metodologia aliada a um refinamento maior da malha pode solucionar melhor este escoamento complexo, como no caso mais difícil do ângulo de incidência de $\alpha = 3^\circ$.

Outro importante teste futuro é utilizar a malha com a placa inclinada para obter resultados para os ângulos $\alpha = 1^\circ$ e 5° , visando obter maiores informações sobre a influência da malha nestes escoamentos.

Crompton (2001) também realizou testes experimentais para outros números de Reynolds menores, sendo que a simulação numérica com a variação deste parâmetro pode trazer novas conclusões ao fenômeno físico em estudo.

Um outro passo interessante na evolução deste trabalho é a simulação numérica envolvendo placas planas finas e curvas, com geometrias próximas as aletas dos engenhos aerodinâmicos. Este estudo foi iniciado superficialmente por Collie com alguns resultados com a metodologia RANS, porém há dados experimentais na literatura que sugerem um aprofundamento deste tipo de problema através da abordagem numérica.

Finalmente, o trabalho foi considerado muito importante para o estudo do fenômeno do surgimento da bolha longa sobre uma placa plana fina. A utilização dos modelos de turbulência aliados aos métodos numéricos complementaram e trouxeram novas conclusões para o caso investigado. Através deste estudo será possível a otimização de perfis aerodinâmicos para aplicações de interesse bélico do Governo Brasileiro.