8

Comentários Finais

Investigou-se o escoamento ao redor de uma placa plana a pequenos ângulos de incidência, utilizando Simulações de Grandes Escalas, com o código aberto OpenFoam, (2006). Comparou-se os resultados obtidos com dados experimentais disponíveis (Crompton, 2001), e também com resultados de simulações envolvendo metodologias RANS, usando o modelo $\kappa - \omega$ (Collie et al., 2003).

Simulações de Grandes Escalas de escoamentos aerodinâmicos externos, especialmente os que exigem um extenso domínio computacional, requerem tratamentos adicionais para evitar instabilidades numéricas geradas pelas necessárias variações dos espaçamentos de malha. Tais variações têm efeito equivalente ao de um processo dissipativo, cuja viscosidade pode vir a assumir valores negativos, causando a divergência da solução numérica e inviabilizando a aplicação da metodologia.

Uma primeira solução examinada, aplicada ao escoamento aerodinâmico em torno de uma placa plana a 1° de ângulo de ataque e número de Reynolds igual a $2,13 \times 10^5$, consistiu em selecionar o tradicional modelo sub-malha de uma equação de Yoshizawa e Horiuti, (1985). Para alcançar solução convergida, foi realizado um particionamento do domínio em duas zonas, onde são empregados diferentes esquemas numéricos. Em locais onde se esperava encontrar vórtices e estruturas transientes importantes, utilizou-se uma malha mais uniforme e o esquema de diferenças centrais, que é não-dissipativo. Nas regiões isentas de atividades turbulentas ou estruturas transientes, adotou-se o esquema *Upwind* de primeira ordem, cuja robustez permitiu que a malha criada apresentasse uma rápida variação das dimensões dos volumes de controles em direção às fronteiras, diminuindo o número de elementos utilizados e o custo computacional.

Essa abordagem garantiu a estabilidade numérica da solução, sem prejudicar a correta representação da turbulência na região da bolha de recirculação. Os resultados obtidos com o modelo sub-malha de uma equação foram bastante satisfatórios, mesmo com malhas insuficientes para a com-

pleta representação das estruturas mais próximas à parede.

Na região de interesse para o presente trabalho, os dados quantitativos obtidos ficaram bem mais próximos aos dados experimentais do que os resultados de simulações RANS disponíveis na literatura. Isso pode ser atribuído ao fato de que a maior parte da energia contida no escoamento é resolvida numericamente, ao invés de modelada por hipóteses heurísticas. Além disso, a parcela de menor energia, que necessita ser modelada, é composta de estruturas pequenas, as quais sofrem menos influência da geometria, sendo mais universais e passíveis de modelagem física.

A distribuição de pressão sobre a superfície superior da placa merece atenção especial como critério de julgamento da qualidade dos resultados, uma vez que representa a maior parcela da força resultante, a qual muitas vezes é o objetivo maior nas aplicações práticas. O desvio do coeficiente de pressão em relação a dados experimentais obtido com LES foi menor do que o obtido com modelagem RANS, em praticamente toda a corda. Porém, a variação da pressão prevista numericamente em função da coordenada x , entre o bordo de ataque e o pico de sucção na região central da bolha, pode ser aproximadamente descrita por um segmento de reta, enquanto se esperava um perfil mais suave, parabólico, encontrado experimentalmente.

Também em termos qualitativos, a metodologia se mostrou superior, uma vez que a tendência dos perfis de velocidade foi corretamente capturada, o que não ocorreu com modelagens baseadas em média de Reynolds.

Apesar do relativo sucesso obtido com os perfis de velocidade $\bar{u}_x$ no interior da bolha de recirculação, as médias de flutuações turbulentas de segunda ordem, R_{ij} , apresentaram grandes disparidades em relação aos dados experimentais, sendo subestimadas próximo ao bordo de ataque, e superestimadas em regiões posteriores. Se no primeiro caso, a explicação para o erro parece residir na excessiva dissipação provocada pelo modelo sub-malha – seja devido a uma energia sub-malha k_{SGS} elevada ou a uma espessura de malha inadequada – no segundo caso, no qual valores superiores aos experimentais são encontrados, é mais difícil encontrar uma justificativa precisa.

Embora não pareça significativa em termos de cálculo da força aerodinâmica resultante, a presença de uma bolha de recirculação secundária, que se forma após um processo de relaminarização da camada limite, foi constatada em todos os casos simulados no presente trabalho. Nenhum dos modelos RANS previamente utilizados por Collie et al. (2003) foi, no entanto, capaz de detectar essa estrutura.

Percebe-se, assim, que a filtragem decorrente do processo de média

de Reynolds é demasiadamente restritiva, levando à severa perda de informações relevantes para a evolução do escoamento. Em particular, parece pouco provável que a complexidade e a quantidade de informações contidas nas flutuações turbulentas, evidenciadas pelos contornos de R_{ij} obtidos com a simulação LES, possam ser corretamente capturados por meio de um único campo escalar, ν_t , ou por uma representação bi-dimensional do escoamento.

Nos espectros de energia dos componentes de velocidade, identificou-se um pico de energia nas baixas frequências, provavelmente associado a uma tremulação da camada de mistura, observada experimentalmente para ângulos de ataque maiores.

A título de investigação, foi proposta uma segunda alternativa para solucionar os problemas de instabilidades numéricas, baseada em conceitos fundamentais de escoamentos turbulentos e de métodos numéricos. Unindo-se a necessidade de eliminar os menores modos, numericamente problemáticos, com a de representar as características físicas universais da turbulência, segundo as quais a energia é dissipada nas menores e menos energéticas estruturas, propôs-se a adição de um termo de forçamento nas equações de transporte de momento, cuja finalidade era a de atenuar apenas as menores escalas suportadas por uma determinada malha. Com isso, esperava-se resolver, simultaneamente, os problemas de instabilidade numérica e de modelagem sub-malha.

Enquanto outras estratégias abordadas na literatura tratam a modelagem turbulenta como um processo difusivo, o termo de forçamento proposto nesta segunda solução tem caráter essencialmente advectivo. As escalas são atenuadas num tempo característico comparável ao do transporte advectivo, e preferencialmente na direção do fluxo de massa. Em outras palavras, as oscilações espaciais alinhadas com o sentido do escoamento são eliminadas mais rapidamente.

A motivação para se propor essa abordagem alternativa para o fenômeno da turbulência baseia-se no fato de que os termos de fechamento a serem modelados – seja na metodologia RANS, seja nas LES – têm origem nas manipulações algébricas do termo advectivo das equações de transporte.

A proposta apresentada foi, então, testada primeiramente em situações simples, que abrangeram desde testes estáticos, nos quais se verificava para que modos a força sub-malha era nula, até testes dinâmicos envolvendo transporte de um escalar passivo e turbulência homogênea e isotrópica numa caixa periódica.

Através dos testes estáticos, constatou-se que a modelagem proposta é

capaz de, seletivamente, agir apenas sobre os menores modos representáveis por uma determinada malha, com a escolha de parâmetros de tolerância (α_f e β_f) adequados. Isso significa que, se o esquema numérico usado como base fosse perfeito, sem erros de difusão e dispersão, o termo de forçamento afetaria apenas os últimos números de onda do espectro de energia. Mais do que isso, a rapidez com que os modos indesejáveis são eliminados, ditada pelo valor de α_f , seria irrelevante para a evolução do escoamento, uma vez que os mesmos não alteram as derivadas espaciais centradas, presentes da equação discretizada. Note-se que, na ausência de efeitos numéricos espúrios, a abordagem proposta perderia a funcionalidade de estabilizar o esquema numérico, restando apenas o papel de modelo sub-malha, atenuando as menores estruturas, as quais seriam então originadas exclusivamente por mecanismos físicos.

Isso pode ser considerado uma virtude do método, uma vez que melhorias no esquema utilizado como base não requerem reformulações no cálculo do forçamento, que delas só se beneficia.

Na prática porém, mostrou-se que os efeitos dispersivos do esquema numérico restringem, para cada valor de β_f , a faixa de valores admissíveis do parâmetro α_f . Essa última foi avaliada com base no espectro obtido em simulações de escoamentos turbulentos em caixa periódica, tomando-se como referência o espectro de Kolmogorov. Foram então encontradas diversas combinações de parâmetros α_f e β_f que reproduziram, com fidelidade satisfatória, a cascata universal de energia.

Após essa validação inicial, o modelo proposto foi testado no escoamento sobre placa plana com inclinação de um grau em relação à corrente livre e a número de Reynolds igual a $2,13 \times 10^5$, objeto principal de estudo do presente trabalho.

Em termos gerais, não se pode afirmar, com o número limitado de testes realizados, que o modelo proposto é superior ao tradicional modelo de uma equação. Porém, o fato de ter apresentado resultados especialmente precisos em regiões nas quais a hipótese de viscosidade turbilhonar falhava, sugere que há alguma peculiaridade intrínseca do esquema resultante que merece ser estudada e explorada em trabalhos futuros.

Assim, embora as dimensões da bolha de recirculação secundária tenham sido, em geral, superestimadas pelo modelo de forçamento proposto, os demais resultados quantitativos foram satisfatórios, especialmente os perfis dos momentos estatísticos de segunda ordem R_{11} , do componente da velocidade $\langle \bar{u}_x \rangle$ fora da bolha, e o coeficiente de pressão cp , no caso de valores adequados de α_f e β_f .

No caso específico do coeficiente de pressão, observou-se que os mesmos α_f e β_f considerados ideais para turbulência homogênea e isotrópica reproduziram com grande precisão os dados experimentais de pressão na superfície superior da placa plana. De fato, a coincidência entre dados numéricos e experimentais só não foi total nas adjacências das extremidades da placa, o que provavelmente aponta a necessidade de refinamento de malha nessas regiões.

Este é um resultado animador, uma vez que uma das informações mais importantes, do ponto de vista prático, é justamente a força aerodinâmica resultante. Para números de Reynolds altos, os efeitos viscosos são praticamente irrelevantes, sendo a pressão a responsável pela maior parcela desta força.

Os bons resultados para os perfis de velocidade média a jusante da bolha são também um indicativo de que, pelo menos em regiões onde a convecção é o mecanismo dominante e a produção de energia não é significativa, a representação da turbulência por um processo difusivo pode ser menos adequada do que a proposta baseada numa força "convectiva".

Além disso, a abordagem proposta se mostrou extremamente tolerante a variações de espaçamento de malha, tanto em termos de estabilidade numérica, quanto, possivelmente, em termos de erros de comutação. As variações de dimensões nos volumes de controle entre a placa e a fronteira de entrada, que normalmente seriam associadas a uma viscosidade espúria negativa e causariam instabilidades numéricas, não causaram nenhuma oscilação espacial na solução final. Ao mesmo tempo, o engrossamento de malha entre a região a jusante da bolha e o bordo de fuga não redundou em efeitos dissipativos que causassem erros nos perfis de $\langle \bar{u}_x \rangle$.

Houve uma consistência satisfatória entre os testes com turbulência homogênea e isotrópica numa caixa periódica e os de placa plana, uma vez que a mesma faixa de valores de parâmetros α_f e β_f que produzia os melhores espectros no primeiro caso, também apresentou os melhores resultados para a placa plana e fina a 1 grau de ângulo de ataque.

O entendimento físico do escoamento sobre placas planas, trazido pelas simulações com 1 grau de ângulo de ataque, foi complementado pelo emprego da metodologia proposta no caso de 3 graus de incidência. Novamente, a metodologia se mostrou estável e apresentou resultados quantitativos razoáveis. Apesar do comprimento da bolha previsto ter sido menor do que o esperado, foram grandes as similaridades entre os resultados numéricos e experimentais.

Fisicamente ficou constatada, em ambos os casos de pequenos ângulos

de ataque testados, a presença de bolhas de recirculação secundárias, internas à principal. Pelo menos numericamente, essa estrutura secundária apresentou as mesmas características das bolhas curtas laminares.

Foi também verificada a instabilidade da linha de corrente que circunda a bolha principal, porém, nas simulações, obteve-se uma transição para o regime turbulento ligeiramente tardia, devido ao limite na resolução da malha.

A distribuição de pressão sobre a superfície da placa mostra um pico de sucção próximo ao centro da bolha. A origem desta zona de baixa pressão está na força centrípeta necessária para manter o movimento circular do fluido no interior da mesma. Após esse mínimo de pressão, a pressão volta a aumentar até a região posterior da bolha, onde se estabiliza num valor que permanece aproximadamente constante até o bordo de fuga.

O perfil da pressão ao longo da placa apresenta uma forma razoavelmente universal. Quando a coordenada x é normalizada pela distância de recolamento, perfis correspondentes a diferentes ângulos de ataque colapsam sobre a mesma curva. Isso significa que a compreensão dos mecanismos físicos que regem o escoamento para a bolha longa de 1 grau de ângulo de ataque, são extensíveis a outras incidências e, possivelmente, a outras bolhas de aerofólio fino encontradas em membranas curvas ou outras geometrias. Daí a grande importância do estudo envolvendo a aplicação da metodologia de Grandes Escalas a placas planas e finas a pequenos ângulos de ataque.

Os contornos das componentes de R_{ij} evidenciam uma forte anisotropia, que dificilmente pode ser representada pela hipótese de Boussinesq numa modelagem RANS de duas equações. Na melhor das hipóteses, existe a possibilidade de que a modelagem do transporte do tensor de Reynolds possa ajudar nesse sentido, o que deve ser investigado em trabalhos futuros.

O objetivo a longo prazo do estudo da placa plana é permitir uma melhor compreensão do escoamento sobre aerofólios finos e membranas curvas, onde uma bolha longa, similar à estudada no presente trabalho, é formada na região próxima ao bordo de ataque. A Simulação de Grandes Escalas de tais escoamentos, no entanto, requer um número de graus de liberdade e um custo computacional extremamente elevados, principalmente se houver outra separação da camada limite após o recolamento da bolha do bordo de ataque. Nesse caso, a previsão correta do ponto de separação é crítica e requer a correta captura dos níveis de flutuações turbulentas a montante do mesmo. Uma alternativa que pode viabilizar essas simulações, a ser explorada futuramente, consiste no emprego de técnicas mistas envolvendo LES e RANS, de forma a diminuir o custo computacional.

Quanto à abordagem convectiva proposta para a modelagem sub-malha, deve-se reconhecer que o número de testes de validação aqui realizados foi extremamente limitado. Serão necessários futuros testes mais detalhados, preferencialmente envolvendo classes de escoamento completamente diferentes. Sugere-se então para futuros trabalhos, simulações de jatos livres e impingentes, com e sem rotação azimutal, nas quais além de estruturas turbulentas anisotrópicas, são avaliados os desempenhos perante malhas com razão de aspecto dos volumes de controle bem diferente da unidade. Apesar dessas anisotropias físicas e de malha estarem bem presentes no escoamento sobre placas planas, são necessários testes mais sistemáticos que possibilitem a detecção de falhas e o aprimoramento da metodologia proposta.

Cumpramos ressaltar que no presente trabalho foi apresentada apenas uma das possíveis maneiras de se modelar o termo de forçamento a partir de um "detetor de modos indesejáveis", o qual é baseado na diferença entre dois esquemas numéricos para o cálculo do gradiente. A partir desse mesmo detetor, podem-se construir outros modelos, que podem vir a apresentar resultados ainda melhores. Acredita-se, apesar dos bons resultados, que o modelo proposto ainda está longe do ideal, como pode ser constatado a partir da dificuldade da correta captura das dimensões da bolha secundária.

Futuras abordagens podem explorar, por exemplo, uma formulação implícita para o forçamento, o qual foi tratado exclusivamente de forma explícita no presente trabalho.

Em suma, considera-se fundamental uma melhor compreensão dos reais potenciais e limitações de cada uma das abordagens da turbulência sub-malha examinadas no presente trabalho. É possível, por exemplo, que o modelo proposto seja mais adequado em determinados regimes de escoamento, enquanto modelos tradicionais sejam mais apropriados em outros. Espera-se, futuramente, poder mesclar as qualidades da representação por meio de um processo advectivo, conforme proposto, com as virtudes da consagrada hipótese de Boussinesq, na qual a transferência de energia entre escalas resolvidas e não resolvidas é sintetizada por meio de um processo difusivo.