

6

Comentários Finais e Conclusões

Este trabalho foi projetado para estudar o fenômeno do jato incidente em uma superfície plana com transferência de calor. Para isto foram utilizados modelos de turbulência baseados nas Equações Médias de Reynolds (RANS) e Simulação de Grandes Escalas (LES). Os resultados numéricos obtidos foram comparados com os resultados experimentais de Abrantes (2005) e simulações RANS e LES da literatura. Em todas as simulações, o número de Reynolds baseado no diâmetro bocal na saída do jato foi igual a $2,1 \times 10^4$ e a razão entre a distância do bocal H e o diâmetro do mesmo D foi mantida constante e igual a $H/D = 2$. Investigou o escoamento puramente axial e com componente angular de forma a gerar um escoamento espirado. O número de *Swirl* investigado foi $S=0; 0,3$ e $0,5$.

O fenômeno do jato incidente é um problema comum em muitas aplicações da vida cotidiana, o qual precisa de um estudo bem detalhado. Jatos incidentes envolvem uma diversa gama de fenômenos tais como camada cisalhante, camada limite térmica, flutuações de velocidade, gradientes de pressão adverso, entre outros, sendo que ao ser adicionada o componente circunferencial de velocidade, as características físicas do jato são alteradas, dificultando sua previsão. Para tal feito foram escolhidos cinco modelos RANS: $\kappa-\varepsilon$ padrão (Launder and Spalding, 1972), $\kappa-\varepsilon$ Realizável (Shih et al, 1995), $\kappa-\varepsilon$ RNG (Yakhot e Orszag, 1986), $\kappa-\omega$ SST (Menter, 1994, 2003) com correções de baixo número de Reynolds (LRC), e RSM (Launder et al., 1975; Gibson e Launder, 1978; Launder, 1989) com correções de baixo número de Reynolds (LRC) e RSM com lei de parede incrementada (EWT).

A modelagem de Grandes Escalas com o modelo LES Dinâmico (Germano et al, 1991; Lilly, 1992) foi adotado somente para o caso de escoamento puramente axial ($S=0$).

Nas simulações RANS foi utilizado um domínio computacional bidimensional com uma malha não uniforme apresentado um maior refinamento na região mais próxima à parede. Para o modelo LES Dinâmico esta malha foi expandida para o caso tridimensional na região circunferencial (360°).

Foi utilizado o código Fluent 12.1 (Fluent 2010) para aplicação dos modelos de turbulência e suas respectivas soluções. O Fluent é baseado no Método dos Volumes Finitos. Nas simulações RANS o esquema QUICK (Leonard & Mokhtari, 1991) foi utilizado para a discretização espacial, sendo que para o modelo LES Dinâmico foi utilizado o esquema de Diferenças Centrais. O acoplamento entre a pressão e a velocidade (pressão-velocidade) foi utilizado através dos algoritmos SIMPLE (Patankar, 1980) para os modelos RANS, e PISO (Issa, 1986) para o modelo LES Dinâmico. Nas simulações LES cuja solução é obtida através de um escoamento transiente foi utilizada a discretização temporal de segunda ordem com formulação implícita (Patankar, 1980), por ser estável. O método de solução das equações foi realizado através do método Multigrid (Hutchinson e Raithby, 1986), o qual se encontra inserido no Fluent 12.1.

6.1 Conclusões

Dentre os diversos modelos baseados no conceito da viscosidade turbulenta investigados, o modelo $\kappa-\omega$ SST apresentou o melhor desempenho.

Os dois modelos RSM investigados diferem somente pelo tratamento da região da parede. O modelo RSM com correção de baixo número de Reynolds não apresentou resultados satisfatórios. Dessa forma, os comentários a seguir referem-se ao modelo baseado no uso de lei de parede, que apresentou bons resultados.

Os resultados obtidos pelos modelos $\kappa-\omega$ SST apresentam um menor crescimento da camada cisalhante livre em relação ao modelo RSM. Isto traz como consequência que diversos fenômenos não sejam capturados pelo modelo $\kappa-\omega$ SST. Já o modelo RSM pelo fato de ser um modelo anisotrópico deveria ter um melhor resultado na caracterização das flutuações de velocidade radial e axial assim como também do tensor cisalhante de Reynolds. Porém, este modelo super-estimou diversas grandezas, pelo fato de não ser um modelo fortemente dissipativo. Como consequência, resultados menos precisos foram obtidos nas regiões próximas à linha de simetria. Já nas regiões mais afastadas ao eixo, melhores resultados foram obtidos quando comparados com os dados experimentais. Isto acontece pelo fato de que o transporte e produção de energia cinética turbulenta dominam a dissipação de energia cinética turbulenta em regiões próximas à simetria. A medida que se desenvolve a camada limite, a dissipação vai

aumentando e com isso os resultados vão sendo melhores comparados aos experimentais.

O modelo $\kappa\text{-}\omega$ SST por ser um modelo dissipativo, amortece a energia cinética turbulenta associada às flutuações de velocidade, dessa forma não caracteriza da melhor forma as grandezas turbulentas em todos os casos estudados ($S=0$, $S=0,3$ e $S=0,5$). Já a velocidade média é caracterizada com maior precisão pelo modelo $\kappa\text{-}\omega$ SST, apresentando pequenas discrepâncias na região da parede pelos elevados níveis de intensidade turbulenta nestas regiões.

O modelo $\kappa\text{-}\omega$ SST apresentou melhores resultados na previsão do perfil de velocidades médio e na avaliação das grandezas turbulentas de segunda ordem para o caso $S=0$, e o modelo RSM mostrou maior coerência nos resultados das grandezas turbulentas de segunda ordem para os casos com *Swirl*.

Na avaliação do número de Nusselt para o caso $S=0$ a previsão com o modelo $\kappa\text{-}\omega$ SST é superior à previsão com o modelo RSM na região de estagnação, isto porque o modelo RANS sobre-estima da energia cinética turbulenta na região de parede perto do ponto de estagnação e o modelo $\kappa\text{-}\omega$ SST tem um amortecimento forte na energia cinética turbulenta na região de parede perto do eixo do jato. Na coordenada radial $r/D=2,0$, ocorre uma transição do escoamento dando origem a segundo nível máximo do Nusselt, o qual não foi observada por nenhum dos dois modelos testados. Este valor é associado com a região onde a energia cinética turbulenta atinge um máximo. O modelo $\kappa\text{-}\omega$ SST foi o que apresentou resultados mais próximos aos experimentais para o número de Nusselt.

A presença do escoamento espiralado cria uma região de recirculação próxima ao eixo de simetria que elimina o pico secundário do Número de Nusselt, observado para o caso do escoamento puramente axial. O componente circunferencial mais forte ($S=0,5$) gera zonas de recirculação na região de estagnação mais intensas em comparação ao caso $S=0,3$. Estas circulações geram valores mínimos de transferência de calor (avaliados pelo número de Nusselt). O pico do coeficiente de transferência de calor ocorre deslocado do eixo na região de $r/D\approx 1$. A medida que o escoamento se desenvolve na superfície a intensidade turbulenta cresce até um valor máximo em $r/D\approx 1$ para a seguir cair zero em estações r/D maiores, pois o fluido ao longe encontra-se estagnado. Para os casos com *Swirl* $S=0,3$ e $S=0,5$, os diversos modelos de turbulência RANS apresentaram valores mínimos do número de Nusselt na região de estagnação,

muito inferiores aos medidos experimentalmente, porém o nível e pico do número de Nusselt foi razoavelmente bem predito pelo modelo $\kappa-\omega$ SST.

No caso das Simulações de Grandes Escalas, através do modelo LES Dinâmico, os resultados obtidos no presente estudo aproximaram-se bem mais próximos dos dados experimentais do que os resultados obtidos pelas simulações com os modelos RANS. Os resultados obtidos com a malha escolhida para as simulações LES (5,4 M) em comparação com o melhor modelo RANS ($\kappa-\omega$ SST) no caso $S=0$, apresentaram desvios menores nas duas estações de interesse ($r/D=0,5$ e $r/D=1,0$) onde a caracterização do escoamento e grandezas turbulentas é complexo. A qualidade dos resultados LES é devido à correta determinação da cascata de energia proveniente das grandes escalas. Uma melhor concordância dos resultados LES em relação aos resultados experimentais poderia ser obtida com um maior refinamento e distribuição da malha do que a utilizada neste trabalho.

No caso das flutuações turbulentas de segunda ordem, o modelo LES Dinâmico proporcionou resultados melhores que os resultados obtidos com o melhor modelo para o caso $S=0$, $\kappa-\omega$ SST. Observou-se que a captura da anisotropia do problema foi um fator fundamental para a superioridade dos resultados em comparação ao $\kappa-\omega$ SST, que adota a hipótese de Boussinesq para simular as tensões de Reynolds. Pode-se observar que a melhora substancial nos resultados das flutuações turbulentas radial, axial e cisalhante nas estações de caracterização mais complexas ($r/D=0$ e $r/D=1,0$) foram bem sucedidas com a abordagem LES. Nos modelos RANS o processo de filtragem é bastante restritivo, o que leva na perda de informações inerentes ao escoamento. Os modelos $\kappa-\omega$ SST e RSM mostraram dificuldade na obtenção de bons resultados nas estatísticas de segunda ordem, sendo que uma grande complexidade de informação existente nas flutuações turbulentas não pode ser caracterizado por uma representação bi-dimensional do escoamento tal como realizado com os modelos RANS.

Na previsão do número de Nusselt com as simulações de Grandes Escalas (LES Dinâmico), houve uma melhora em comparação ao modelo $\kappa-\omega$ SST. Pode-se notar que tanto os valor máximo no ponto de estagnação ($r/D=0$) e o segundo nível do Nusselt ($r/D=2,0$) são melhor caracterizados pela abordagem LES.

A principal contribuição deste trabalho foi constatar que com relação a custo benefício, o modelo $\kappa-\omega$ SST é capaz de prever razoavelmente bem o problema de jato espiralado incidente à uma placa. No entanto, para ajudar no entendimento do fenômeno

do jato incidente, é necessário utilizar a metodologia de Grandes Escalas, devido o fornecimento de detalhes do escoamento, além da alta capacidade de predição. Com este estudo pode-se aperfeiçoar aplicações práticas onde o jato incidente é aplicado a nível industrial.

6.2 Recomendações

Os modelos RANS apresentam resultados qualitativamente satisfatórios, porém não fornecem uma riqueza dos detalhes do fenômeno como os obtidos pelas Simulações de Grandes Escalas. No entanto, os modelos RANS requerem um baixo custo. Por outro lado as Simulações de Grandes Escalas exigem a solução de um número elevado de graus de liberdade o que traz consigo um elevado custo computacional. Uma opção para futuros estudos é investir na pesquisa de modelos híbridos (RANS-LES) visando diminuir o custo computacional.

Uma malha mais refinada pode ser testada com a finalidade de capturar com maior precisão as estruturas turbulentas e os níveis de transferência de calor. Esta malha poderá ser estendida na avaliação dos casos com *Swirl* na modelagem LES, sendo uma malha recomendada que apresente um valor de $y^+ < 1$, o que seria ideal para simulações com a modelagem de Grandes Escalas.

A condição de entrada de escoamento totalmente desenvolvido pode ser investigada na modelagem LES. Recomenda-se comparar com os resultados obtidos com a simulação do perfil de entrada perturbado (atual trabalho), visando identificar a influência desta condição nos níveis de turbulência do escoamento e na distribuição do número de Nusselt ao longo da placa onde o jato incide.

Pode-ser avaliado o desempenho da Simulação Numérica Direta (DNS) na previsão do fenômeno do jato incidente, já que com a evolução de equipamentos de processamento paralelo, com os quais o Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio conta, pode ser possível a sua utilização. Mesmo com um refinamento maior, e um maior custo computacional, esta modelagem pode ser uma das soluções ao problema complexo do jato incidente.