

8

Conclusões e Sugestões

Cientificamente e tecnologicamente falando, a análise dos escoamentos turbulentos é uma atividade extremamente importante. Na maioria das situações de interesse prático, o escoamento turbulento prevalece. A turbulência, fenômeno complexo e fascinante, está presente em todos os aspectos da vida dos homens. Desde os primeiros estudos sobre instabilidade e turbulência, realizados por Reynolds e Rayleigh, a compreensão básica e a solução do problema da turbulência permanece ainda um desafio para os teóricos e experimentalistas numéricos e de laboratório.

Apesar das equações de Navier-Stokes serem adequadas a descrição rigorosa do fenômeno da turbulência, da crescente capacidade computacional e do aperfeiçoamento das técnicas numéricas, não há expectativa imediata da obtenção de soluções numéricas diretas, para situações de interesse industrial em futuro próximo.

Neste contexto, este trabalho se propôs investigar o chamado problema do fechamento e modelagem de turbulência, estudando as duas principais linhas de modelagem em uso: A modelagem estatística clássica e a modelagem submalha. Estas técnicas foram aplicadas na solução de escoamentos turbulentos complexos, avaliando-se as suas reais possibilidades na simulação de escoamentos de interesse prático.

Inicialmente, no capítulo 2, foram apresentados alguns aspectos físicos da turbulência, juntamente com as principais técnicas de predição dos escoamentos turbulentos. Discutiu-se brevemente a simulação numérica direta, onde foi demonstrado as elevadas exigências computacionais exigidas pela técnica. Em consequência, verificou-se que a simulação direta somente está disponível a escoamentos limitados a baixo Reynolds e geometria simples. A técnica de simulação de grandes escalas e a modelagem estatística clássica foram tratadas resumidamente nesta fase. Discutiu-se rapidamente as duas principais abordagens utilizadas na modelagem clássica: O conceito de viscosidade turbulenta; a modelagem das equações de transporte das tensões de Reynolds. As deficiências da hipótese de viscosidade turbulenta foram apresentadas, especialmente, o seu

caráter isotrópico, o conseqüente alinhamento do tensor de Reynolds com o tensor taxa de deformação, a sua definição em função exclusiva de quantidades do escoamento médio ou de escalas de turbulência e as dificuldades de se tratar a região da parede. A modelagem das equações das tensões de Reynolds foram rapidamente discutidas. Comentou-se sobre a artificialidade da separação de grandes e pequenas escalas, quando se tratou da simulação de grandes escalas e, por fim, o problema das condições de contorno e iniciais.

Os modelos κ - ε e suas variantes de baixo número de Reynolds e não linear, juntamente com os modelos κ - ε renormalizados (RNG), foram estudados teoricamente no capítulo 3. Apresentou-se as equações e discutiu-se vários aspectos relacionados a cada um dos modelos. Para estudo dos modelos de baixo Reynolds foram selecionados os modelos de Launder & Sharma (1974); modelo de Sakar (Sakar & So, 1997); modelo de Myong & Kasagi modificado (Chen et al., 1998); modelo de Yang & Shih (1993); e o modelo Lam-Bewmhorst (Patel et al., 1985; Rodi & Mansour, 1993). O comportamento assintótico na parede das tensões de Reynolds e dos termos das equações de transporte da energia cinética e de sua taxa de dissipação, em cada um dos modelos selecionados, foi estudado em profundidade. Comparou-se o comportamento dos termos modelados com o comportamento dos respectivos termos exatos. Mostrou-se que os modelos de baixo Reynolds, que em tese se propõem integrar as equações até a parede, não apresentam um comportamento assintótico correto na região da parede. Através da realização do balanço dos termos, verificou-se que, nos modelos de baixo número de Reynolds, a equação da energia cinética turbulenta não está balanceada no limite da parede. A hipótese do termo da difusão de pressão ou do gradiente de pressão ser desprezível na região da parede, adotada nos modelos de alto Reynolds, não é corretamente aplicada aos modelos de baixo número de Reynolds. A especificação da condição de contorno da equação da taxa de dissipação foi também discutida em detalhes. Mostrou-se, através do estudo do comportamento assintótico dos termos das equações da taxa de dissipação modelada, a inconsistência de vários modelos na região da parede, bem como a incorreção de algumas condições de contorno. Os modelos não lineares foram, a seguir, apresentados e discutidos.

Finalmente, no capítulo 3, estudou-se os modelos κ - ε obtidos pela técnica

do grupo da renormalização (RNG) de Yakhot & Orszag (1986). O procedimento adotado pelos autores, para obtenção dos modelos foi apresentado e discutido. Nesse estudo levantou-se algumas inconsistências da técnica. Mostrou-se que todas as aproximações são válidas, quando $\lambda \rightarrow 0$ e $\omega \rightarrow 0$, mas não o são na região de $\lambda \approx \lambda_d$, onde eliminou-se a banda infinitesimal. A correção da viscosidade emerge naturalmente somente para $\lambda \rightarrow 0$ ($\lambda \ll \lambda_d$), sendo que os termos desprezados tornam-se importantes na região de $\lambda \approx \lambda_d$. Assim a equação modificada pode não ser muito precisa na extremidade do domínio ($\lambda \rightarrow \lambda_d$), embora ela seja novamente usada nesta região no próximo estágio do processo de eliminação da banda infinitesimal de λ . Outra hipótese, que parece ser fonte de imprecisão, é considerar, em cada realização, a força referente as pequenas escalas ser fracamente relacionada a velocidade das grandes escalas, embora estas sejam dinamicamente relacionadas a velocidade das pequenas escalas. Na obtenção teórica das constantes, apontada como grande vantagem do procedimento, os autores usaram $d=3$ coerente com toda a dedução no espaço tridimensional, mas de modo não claro fizeram $b=0$, na avaliação de parâmetro A_d . Esta opção é incoerente com o corpo do trabalho, pois foi utilizado sempre $b=4$, com a justificativa da coerência dos resultados com a lei espectral de Kolmogorov. Cabe ainda destacar que o uso coerente do parâmetro b levaria a obtenção de valores que não seriam consistentes com os adotados nos modelos padrões e os experimentalmente obtidos, como por exemplo a constante de Kolmogorov e C_μ no modelo κ - ε .

Especificamente no estudo do modelo RNG proposto como modelo de baixo número de Reynolds, foi demonstrado que na dedução da viscosidade turbulenta renormalizada introduziu-se a hipótese de $v_{re} \gg v$, o que em tese invalida a sua aplicação a região da parede. Mostrou-se ainda que na verdade há uma nova definição da escala de tempo da viscosidade turbulenta e que esta não deveria ser aplicada a região da parede sem qualquer correção.

A técnica da simulação de grandes escalas foi estudada e os principais modelos submalha discutidos no capítulo 4.

O método numérico foi apresentado no capítulo 5, onde os vários esquemas de interpolação utilizados (*power law*, Quick e CD-4), bem como as técnicas de

integração no tempo empregadas (implícito, Crank-Nilcoson e Simpson), foram discutidos. Pode-se dizer que o método numérico dos volumes finitos mostrou-se muito eficiente, quando a modelagem estatística clássica foi utilizada, mas que não apresentou a mesma eficiência ao ser empregado com a técnica de simulação de grandes escalas. Como foi demonstrado no capítulo 7, a aproximação das integrais nas faces dos volumes pela regra do ponto médio (uma integração de segunda ordem) faz com que o método represente de maneira pobre os maiores números de onda. A opção de se aproximar o coeficiente de difusão na fronteira do volume finito por resistência equivalente mostrou-se eficiente na modelagem clássica. Contudo na simulação de grandes escalas este tipo de aproximação fez com que as flutuações fossem eliminadas. O esquema de interpolação Quick foi robusto para convergir, quando empregado com malhas uniformes, mas apresentou dificuldades numéricas para convergir, quando utilizado em malhas não uniformes.

O estudo numérico dos modelos de viscosidade turbulenta de duas equações foi realizado no capítulo 6. Inicialmente realizou-se uma avaliação da capacidade de predição dos modelos de baixo número de Reynolds de Lam-Brewmhorst e de Launder-Sharma, face aos modelos κ - ϵ tradicional e renormalizado. Os modelos foram empregados na solução do escoamento de alto número de Reynolds em degrau. Verificou-se que os modelos subavaliaram mais a região de recirculação principal que os modelos de alto Reynolds, além de não terem sido capazes de prever a existência da região de recirculação secundária. A recuperação da pressão também mostrou-se pior nos modelos de baixo número de Reynolds. Contudo, o modelo de Launder-Sharma obteve melhores resultados que o modelo de Lam-Brewmhorst. Observou-se uma efetiva melhora das predições, quando a região da subcamada laminar foi suficientemente resolvida (cerca de oito pontos nodais para $y^+ < 20$). Quando a região da parede não foi devidamente resolvida, os modelos apresentaram predições inconsistentes nessa região.

O esforço computacional do modelo de Launder-Sharma, na solução do escoamento turbulento ‘*backstep*’, foi semelhante ao modelo κ - ϵ de alto Reynolds tradicional. Porém, o esforço computacional obtido com o modelo de Lam-Brewhorst foi muito maior (em média cerca de 50%). Quando a região da subcamada laminar foi efetivamente refinada (cerca de 12 pontos nodais para

$y^+ < 20$), o modelo de Lam-Brewhorst apresentou grande dificuldade de convergência. Este modelo também se mostrou muito sensível a condição inicial de partida da solução, não só quanto ao esforço computacional como a própria convergência da solução. Uma possível explicação para estas dificuldades é a falta de balanço da equação da dissipação da energia na região da parede, além do comportamento assintótico incorreto de outros termos, como, por exemplo, a viscosidade turbulenta.

A seguir, a capacidade de predição do modelo κ - ε renormalizado (RNG), como proposto por Orszag et al. (1993), foi avaliada numericamente, complementando o estudo teórico já realizado. Os autores afirmaram que a viscosidade efetiva proposta, eq. (3.136), permitiria as equações de transporte de κ e ε serem aplicadas nas regiões de baixo número de Reynolds, sem uso de funções de parede ou amortecimento, desde que o inverso do número de Prandtl fosse obtido pela eq. (3.135). Os autores alegaram que ν_{er} e α variam lentamente, de valores moleculares a valores completamente turbulentos, de acordo com o número de Reynolds efetivo e, conseqüentemente, as equações de transporte de κ e ε teriam um efeito natural de amortecimento na região da parede. Entretanto foi demonstrado neste trabalho que, na derivação da eq. (3.136), foi introduzida a hipótese que $\nu_{er} \gg \nu$, o que, em tese, invalida o uso da equação na região de baixo número de Reynolds. Por outro lado, a decomposição da viscosidade efetiva proposta, nas parcelas molecular e turbulenta, eq. (3.143), mostra que na verdade é definida uma nova escala de tempo, para obtenção da viscosidade turbulenta. Pode-se verificar prontamente que a escala de tempo definida pela eq. (6.9) é maior que a escala de tempo do modelo κ - ε de alto Re tradicional (κ/ε), em todo o domínio. Isto significa que o modelo proposto por Orszag et al. (1993) deveria, em tese, ser representativo de maiores turbilhões, em comparação ao modelo κ - ε tradicional. Assim, o modelo somente deveria ser empregado no núcleo turbulento e não em regiões de baixo número de Reynolds.

O modelo renormalizado como proposto por Orszag et al. (1993) foi, então, utilizado na resolução do problema “*backstep*”, com várias condições de contorno, inclusive a lei da parede. Em todas as simulações, o modelo não obteve resultados satisfatórios. O melhor comportamento foi alcançado com o uso da lei da parede e

número de Prandtl turbulento constante. Um resultado que poderia ser esperado, desde que nenhuma correção para baixo número de Reynolds foi incluída tanto na equação da energia cinética turbulenta (κ) como na equação de ε . Os autores (Orszag et al., 1993) afirmaram que o procedimento renderia modificações de Baixo Reynolds, eliminando-se assim a necessidade de se utilizar a lei da parede. Contudo tais modificações, em função do número de Reynolds local efetivo, não estão claras.

Em todas as simulações a viscosidade efetiva, gerada pelo modelo RNG Baixo Re foi maior que a produzida pelo modelo RNG Alto Re, o que tornou a equação da quantidade de movimento muito difusiva e confirmou o estudo teórico realizado. Regiões de recirculação foram suprimidas e um recolamento prematuro foi alcançado. A nova escala de tempo anulou os efeitos positivos obtidos pela inclusão do termo R (eq. 3.119) na equação da taxa da dissipação. A ausência desse termo nos modelos RNG, faz a versão Alto Re diferir do estabelecido por Launder & Jones (1972) (κ - ε Alto Re tradicional) somente no valor das constantes.

Pode-se então concluir que, ao menos com a proposta da viscosidade efetiva apresentada por Orszag et al. (1993), eq. (6.6), o modelo não deve ser empregado sem que outras correções, além do número de Prandtl turbulento variável, sejam introduzidas.

Dando continuidade ao trabalho, realizou-se, a partir de resultados de simulação direta, uma criteriosa avaliação das predições, na região da parede, dos modelos de baixo número de Reynolds selecionados. Excluiu-se dessa análise o modelo de Lam-Brewmhorst, devido aos resultados obtidos na simulação anterior. Resumindo, pode-se dizer que quatro modelos de turbulência de duas equações, tipo κ - ε , com extensão para a região da parede, foram empregados, para calcular um escoamento turbulento complexo (“*backstep*”), do qual dados experimentais e resultados de simulação direta encontravam-se disponíveis (Le et al., 1997). Os resultados indicaram claramente um limitado desempenho dos vários modelos, para descrever, junto à parede, este tipo de escoamento. A análise global dos resultados revelou uma performance superior dos modelos Launder-Sharma e de Sakar. Contudo, registra-se que mesmo estes modelos obtiveram sucesso parcial na região da parede.

Outro estudo realizado nesta fase, foi avaliar a influência do perfil de velocidade na entrada do domínio sobre as predições dos modelos. Da comparação dos resultados, obtidos com diversos perfis de velocidade na entrada, verificou-se que mesmo pequenas perturbações no perfil de velocidade provocam diferenças sensíveis nos resultados. Esta constatação indica que a definição do perfil de velocidade na entrada é fundamental para análise do escoamento tipo ‘*backstep*’.

Dos resultados da simulação direta, sabe-se que o termo do gradiente de pressão-velocidade, da equação de κ , é muito significativo na região da parede ($y^+ < 10$) no escoamento em degrau. É a difusão de pressão que irá contrabalançar a dissipação e os termos de transporte de turbulência, na região da parede. A hipótese de que a deficiência efetiva dos modelos de baixo Reynolds, na região da parede, venha do fato da difusão de pressão ser basicamente desprezada nestes modelos motivou a seqüência do estudo. Procurou-se, então, avaliar numericamente o comportamento assintótico dos vários termos da equação da energia cinética turbulenta e a real influência do termo do gradiente de pressão sobre as predições dos modelos de turbulência de Baixo Reynolds.

Sinteticamente, pode-se dizer que investigou-se com ajuda dos dados da simulação direta do escoamento turbulento em degrau (“*backstep*”), o comportamento, junto a parede, dos vários termos que compõem a equação da energia cinética turbulenta, dos quatro modelos κ - ε para baixo número de Reynolds selecionados. Avaliou-se também o comportamento de duas correlações, propostas na literatura, para modelagem do termo de difusão de pressão da referida equação, e as conseqüências destas correlações nas predições dos modelos.

Da análise teórica das equações modeladas verificou-se que a equação de κ não está perfeitamente representada no limite da parede ($y \rightarrow 0$). Há necessidade do termo de difusão turbulenta ($D_\kappa = T_\kappa + \pi_\kappa$) ter um comportamento y no limite da parede. Este comportamento é próprio do termo π_κ . Todavia, o modelo de difusão turbulenta utilizado nos quatro modelos comporta-se como y^3 . As predições numéricas validaram esta análise. O comportamento assintótico da difusão turbulenta modelada é diferente daquele apresentado pela simulação direta. Enquanto a declividade do termo modelado é nula na parede ($y=0$), a correspondente difusão na simulação direta possui uma derivada positiva

($\partial D_{\kappa}/\partial y > 0$). Há, na parede, um forte desbalanceamento da dissipação e da difusão viscosa previstas pelos modelos. Os modelos de Myong & Kasagi modificado e Yang & Shih predizem, na parede, valores de difusão viscosa e dissipação muito maiores que os previstos pela simulação direta. Por outro lado, o modelo Launder & Sharma tem um comportamento assintótico incorreto. Este modelo prediz o pico de dissipação e difusão viscosa fora da parede ($y^+ = 2$). Os termos só se aproximam da referência ('DNS') a partir de $y^+ = 5$. Já o modelo Sakar subavalia a difusão turbulenta, na maioria das seções transversais ao domínio, e a taxa de crescimento da dissipação (ε) e da difusão viscosa (D_{μ}) no limite da parede.

Da análise teórica e da simulação numérica das propostas de Chen et al. (1998) e So e Lai (1990), para modelagem do termo do gradiente de pressão (π_{κ}), verificou-se que as duas correlações não possuem o comportamento assintótico desejado. A correlação de Chen et al. (1998) torna-se negativa no limite da parede, quando o perfil de velocidade é negativo nesta região, enquanto a correlação de Lai & So (1990) é sempre negativa. Entretanto, o termo do gradiente de pressão é sempre positivo na região da parede. Outra deficiência da proposta de Chen et al. é a predição de valores significativos fora da região da parede, especialmente na região da camada de cisalhamento. A correlação não possui uma função que limite a sua ação a região de baixo número de Reynolds. A importância do termo π_{κ} se restringe a uma pequena faixa junto a parede ($y^+ < 5$), a qual cresce na zona de recirculação ($y^+ < 10$).

A inclusão da proposta de Chen et al. (1998) nos modelos selecionados fez com que os resultados se afastassem mais do padrão desejado. Registre-se que os modelos só convergiram, quando a constante C_{π} da correlação foi tomada como 0,01162 e não como originalmente proposta (116,2). Já a correlação de Lai & So (1990) melhorou as predições dos modelos Launder & Sharma, Myong & Kasagi modificado e Yang & Shih. Esta correlação, por ser negativa, atua como um termo de destruição na equação de κ . Os citados modelos foram os que obtiveram os maiores níveis de energia cinética turbulenta.

Dos resultados obtidos pode-se então concluir que não é a modelagem do termo de difusão turbulenta uma fonte de inconsistência decisiva, no atual estágio de desenvolvimento dos modelos κ - ε para baixo número de Reynolds. Mesmo que fosse desenvolvida uma correlação representativa do comportamento do termo do

gradiente de pressão, a sua inclusão direta nos modelos não seria garantia de um melhor comportamento dos modelos.

Dos modelos aqui estudados, somente o modelo SA, pelos níveis de energia cinética turbulenta capturados, poderia receber, no limite da parede, uma correção referente ao termo π_κ . Porém, o comportamento do termo de difusão turbulenta não é uniforme. Em grande parte do domínio, este termo é subavaliado. Contudo, no início da recuperação do escoamento ($x/H=7,0$), o modelo prediz uma difusão turbulenta da mesma magnitude da simulação direta, não necessitando de correção.

Considerando-se que uma melhor predição das tensões de Reynolds é importante na correta previsão de escoamentos complexos com separação, particularmente no caso do escoamento em degrau, pretendeu-se, nessa fase do trabalho, investigar a capacidade de predição e o comportamento computacional dos modelos não lineares propostos por Speziale (1987) e por Yakhot et al. (1992), nesse tipo de escoamento.

Em consequência, o comportamento numérico e a capacidade de predição dos modelos não lineares, propostos por Speziale (1987) e Yakhot et al. (1992), foram examinados em comparação a dados experimentais das quantidades médias e tensões de Reynolds e ao desempenho dos modelos lineares κ - ε tradicional e κ - ε RNG, para o escoamento em degrau (“backstep”). Os modelos não lineares demonstraram ter em geral um melhor comportamento que os modelos lineares, particularmente na capacidade de prever a região de recirculação secundária. O modelo não linear de Speziale, em função dos termos convectivos da derivada de Oldroyd, não foi de fácil convergência, necessitando de um forte subrelaxamento. A convergência tornou-se melhor, quando os referidos termos convectivos, na direção preferencial de escoamento, foram tratados com o esquema “*upwind*”. Já o modelo RNG não linear, por desprezar os termos convectivos da derivada de Oldroyd (Yakhot et al., 1992), é mais robusto para convergir, embora as suas predições tenham sido mais pobres que as do modelo de Speziale (1987) em muitas estatísticas (recirculação secundária, tensão de Reynolds, recuperação de pressão e etc).

A comparação dos resultados dos modelos κ - ε linear e κ - ε RNG linear, no escoamento em degrau de Alto Reynolds, permitiram verificar a superioridade das

predições obtidas pelo modelo κ - ε RNG linear. Muitas das vantagens do modelo RNG linear sobre o κ - ε tradicional foram atribuídas a inclusão do termo R , na equação da taxa de dissipação (eq. 3.116 e 3.117), e aos valores das constantes. Entretanto, esta avaliação não se repetiu, quando a relação constitutiva não linear tensão-deformação de Speziale foi incorporada a estrutura dos modelos. Fato este que, ao menos, questiona a universalidade das propostas apresentadas (novas constantes e termo R) pela técnica do grupo de renormalização.

Por fim, na modelagem clássica, investigou-se numericamente a capacidade de predição dos modelos κ - ε não linear de Speziale e κ - ε não linear RNG, em escoamento turbulento em duto quadrado de Baixo número de Reynolds. Os modelos foram resolvidos até a parede sólida, utilizando-se uma função de amortecimento da viscosidade turbulenta, a fim de considerar os efeitos da viscosidade molecular naquela região, como proposto por Mompean et al. (1997). A função foi ajustada, para cada modelo, com base na solução dos parâmetros empíricos conhecidos, tal como fator de atrito. O modelo RNG mostrou-se 10% mais rápido. Os modelos foram capazes de prever a existência do escoamento secundário, embora sub-avaliem a sua intensidade e falhem na predição dos seus efeitos sobre o escoamento médio e distribuição da tensão cisalhante na parede. Já o escoamento principal foi bem predito pelos modelos. De um modo geral, o modelo RNG obteve melhores resultados. Talvez a maior dificuldade do modelo de Speziale venha, como no caso do escoamento “*backstep*”, dos termos convectivos da derivada de Oldroyd. Os efeitos da viscosidade turbulenta necessitaram ser muito mais fortemente amortecidos no modelo de Speziale do que no modelo RNG.

Deve-se registrar que este escoamento foi resolvido com a hipótese de escoamento periódico na direção desenvolvida. Neste caso, não houve necessidade de se ter a priori dados da turbulência na fronteira de entrada do domínio. Além disso, a obtenção do campo de velocidade, neste tipo de escoamento complexo, sem qualquer informação antecipada, poderá ser usada como condição inicial em soluções numéricas diretas ou de grandes escalas.

Posteriormente foram realizadas simulações numéricas de escoamento turbulentos de baixo número de Reynolds com a técnica de simulação de grandes escalas. Inicialmente realizou-se uma simulação bidimensional do escoamento em

canal de placas planas. A simulação permitiu ajustar os parâmetros, tais como função de amortecimento, coeficiente do modelo, entre outros, que seriam utilizados na simulação tridimensional. Os resultados da simulação tridimensional confirmaram a validade desse procedimento. Houve, desta forma, uma efetiva redução do custo computacional da solução tridimensional. Os resultados obtidos na simulação de grandes escalas bidimensional foram estimulantes, no que se refere a correção das predições. Por exemplo, o perfil de velocidade obtido ajustou-se melhor aos dados experimentais que o obtido com o modelo $\kappa-\varepsilon$ tradicional, embora o seu custo computacional seja maior.

Na solução tridimensional do escoamento turbulento em canal de placas planas, com o modelo de Smagorinsky, as estatísticas de primeira ordem foram corretamente previstas, com base nos parâmetros levantados na solução bidimensional. A solução foi obtida com a hipótese de escoamento periódico na direção desenvolvida e na transversal. O campo inicial foi o obtido pela simulação bidimensional e as equações foram integradas até o escoamento mostrar um comportamento estatisticamente em regime permanente. O escoamento foi analisado e verificou-se a existência de estruturas vórticas significativas na região da parede. Pode-se observar que algumas estruturas crescem em direção à parede e são transportadas na direção da fronteira aberta transversal. Esse processo se mostrou contínuo durante todo o tempo de análise do escoamento. No centro do canal, foi possível ver a existência de pequenos vórtices e contra-vórtices (ω_z) que se sucedem em direção às paredes. Estas estruturas se mostraram mais estáveis no tempo, enquanto os vórtices ω_y exibiram um comportamento totalmente aleatório nessa região.

A seguir foram realizadas simulações numéricas bidimensionais e transientes, tipo simulação de grande escalas, do escoamento turbulento incompressível, em canal de placas planas com dupla expansão de área. Foram realizadas três simulações com diferentes valores do coeficiente de Smagorinsky. Verificou-se que a partir de certo valor do coeficiente a solução se estabilizava e o escoamento mostrou um padrão fixo. A solução neste caso teve um comportamento típico das soluções com modelos $\kappa-\varepsilon$ de duas equações. O comportamento transiente do escoamento só foi observado, quando o coeficiente do modelo foi tomado como 0,1. Neste caso, o escoamento se mostrou altamente

transiente, sendo perfeitamente possível analisar o comportamento das estruturas vórticas presentes na região do degrau. Foi possível observar a formação de pequenos vórtices e contra-vórtices na região do degrau, o movimento da camada de cisalhamento e a oscilação efetiva do ponto de recolamento, conforme observado experimentalmente. Pode-se verificar uma efetiva mudança de forma na camada de cisalhamento, indicando uma forte interação entre as camadas. Toda a análise conduzida permitiu concluir que há uma formação periódica de um vórtice, girando em sentido contrário ao grande vórtice da recirculação principal, junto à parede vertical do degrau. Esse vórtice secundário é transportado em direção ao ponto de recolamento, sofrendo um processo de estiramento e também deformando o grande vórtice (sentido horário). Esse deslocamento faz com que exista um movimento de toda a região de recirculação, particularmente da camada de cisalhamento que se movimenta na direção vertical. O grande vórtice, ao ser deformado, parece introduzir em seu interior o vórtice secundário, desprendendo-o da parede e fazendo aparecer em seu ceio dois vórtices. A existência de dois vórtices, girando em sentido horário, só se justifica com a presença, entre estes vórtices, de uma pequena estrutura, girando em sentido contrário. Esse pequeno vórtice seria a seguir ejetado da região de recirculação e o vórtice principal retomaria novamente a forma predita pela maioria dos modelos de duas equações, ou seja, um grande vórtice girando em sentido horário e ocupando toda a região de recirculação. Novamente se forma uma nova estrutura junto à parede vertical e todo o processo se reinicia.

No que se refere as estatísticas, pode-se dizer que as predições obtidas com os maiores valores do coeficiente do modelo de Smagorinsky concordam melhor com os dados experimentais. Porém, estas soluções, como já foi dito, não se prestam ao estudo dinâmico das complexas estruturas presentes no escoamento.

O último escoamento simulado com a técnica de simulação de grandes escalas foi o escoamento turbulento de baixo número de Reynolds em duto de seção quadrada. Simulou-se somente um quarto do domínio, a fim de se obter uma melhor resolução da região da parede. As estatísticas de primeira ordem foram corretamente capturadas, mas a resolução da região da parede se mostrou insuficiente. A tensão na parede não foi corretamente predita, embora o seu valor médio esteja em boa concordância com o resultado obtido do gradiente de pressão

imposto. A velocidade axial foi bem capturada, mas o escoamento secundário foi subavaliado. Da solução transiente, pode-se verificar a dinâmica do problema. Há um movimento contínuo dos vórtices de expansão e contração alternada, o qual faz com que a posição do núcleo de cada célula não seja fixo no tempo. Pode-se verificar também que vórtices são continuamente transportados em direção a parede sendo lá dissipados.

Do estudo realizado pode-se então concluir que, apesar das muitas deficiências apresentadas pelos modelos, a modelagem estatística clássica tem a grande vantagem da economia computacional. A nível industrial muitas vezes se está interessado somente em informações globais do problema. Daí a enorme demanda pelos modelos com média de Reynolds. O fato de se poder resolver escoamentos turbulentos de interesse industrial com rapidez e alguma precisão, obtendo-se informações relevantes do problema, é a grande vantagem da técnica e que fará com que a mesma ainda esteja em uso durante muitos anos. Portanto ainda hoje é importante o desenvolvimento, o aperfeiçoamento e avaliação constante dos modelos com média de Reynolds. Em contrapartida, a metodologia da simulação de grandes escalas, acoplada a técnica numérica de volumes finitos e ao modelo de Samgorinsky, mostrou-se, em escoamentos complexos parientais, mais apropriada ao estudo da dinâmica das estruturas do escoamento. A técnica tem uma enorme demanda de pontos na região da parede, o que faz com que o custo da simulação seja ainda muito elevado. A referida técnica estaria hoje ainda mais direcionada a ajudar na compreensão do problema da turbulência e no desenvolvimento dos modelos de média de Reynolds, do que na obtenção de informações à nível de engenharia.

Na resolução dos escoamentos turbulentos com a técnica de simulação de grandes escalas, os resultados exibiram uma majoritária contribuição submalha face as contribuições de malha obtidas. As estatísticas de segunda ordem mostraram que os níveis de turbulência capturados estiveram aquém do esperado. Houve um excessivo amortecimento das flutuações, em parte provocado pela função de amortecimento utilizada na região das paredes e em parte pelo modelo de Smagorinsky. Ainda influenciando na precisão da solução tem-se o esquema de interpolação espacial de segunda ordem quick, e o esquema de integração temporal. Vale mencionar ainda, que as técnicas utilizadas para resolver o

acoplamento pressão-velocidade de forma segregada (Simple e Simplec) também podem influenciar na precisão, devido ao acúmulo de erros de truncamento, e do desacoplamento das variáveis a cada iteração. Finalmente, é preciso ressaltar que o método iterativo de solução do sistema algébrico (TDMA linha por linha) pode tornar lenta a convergência, causando um excessivo tempo de computação.

As deficiências apresentadas pelo método numérico, quando da utilização da metodologia de simulação de grandes escalas, não permitem que seja realizada uma comparação direta da capacidade de predição e do esforço computacional de cada uma das técnicas de modelagem utilizadas neste trabalho. Enquanto o método numérico se mostrou perfeitamente compatível com a modelagem estatística clássica, na simulação de grandes escalas melhoramentos devem ser introduzidos, a fim de que a comparação seja então propriamente realizada.

Verificou-se assim na prática uma estreita interligação entre as três áreas trabalhada nesta tese. O levantamento das flutuações na parede, importante para continuação da pesquisa dos modelos com média de Reynolds naquela região, depende fundamentalmente dos melhoramentos introduzidos na modelagem submalha e no método numérico utilizado, para a solução das equações da referida técnica. Portanto, as deficiências levantadas nas três áreas trabalhadas, modelagem estatística clássica, simulação de grandes escalas e método numérico, sugerem que novas pesquisas devam ser realizadas.

Na modelagem estatística clássica, deve-se continuar perseguindo o perfeito balanceamento da equação da energia cinética turbulenta na região da parede. Com esta finalidade, é necessário:

- investigar novos modelos para a equação da taxa de dissipação na região da parede, de modo que os termos exatos estejam melhor representados no seu comportamento assintótico.
- Estar em condições de levantar com clareza o nível das flutuações de pressão na região da parede.
- Propor e testar novos modelos para o termo de difusão de pressão.

Paralelamente, deve-se continuar a investir na extensão dos modelos não lineares à região da parede.

Na técnica de simulação de grandes escalas, a qual tem um papel

fundamental de apoio a pesquisa proposta na modelagem clássica, ao permitir que sejam levantadas com uma aproximação aceitável as flutuações na região da parede, sugere-se:

- A utilização do procedimento dinâmico para obtenção dos parâmetros do modelo.
- A utilização de modelos menos difusivos, como, por exemplo, o modelo misto.
- Realizar uma investigação mais cuidadosa da função de amortecimento, se o modelo de Smagorinsky for utilizado;

Por fim, quanto ao método numérico, sugere-se:

- Investigar e melhorar a técnica de solução do acoplamento pressão-velocidade.
- Investir na solução do sistema algébrico de forma a ser mais eficiente.
- Melhorar os esquemas de interpolação, talvez, utilizando o próprio esquema CDS-4 em todas as direções.
- Investigar o efeito do uso da malha deslocada na avaliação das grandezas turbulentas.