

6

Conclusões e Recomendações para Futuros Trabalhos

6.1.

Conclusões

No presente trabalho foram investigadas diversos modelos de turbulência para a simulação numérica de escoamentos neutros e estáveis sobre topografia complexa em escala de laboratório. Também foi investigada a dispersão de poluente nesses escoamentos. Os resultados obtidos nas simulações foram comparados entre si e também a dados experimentais disponíveis na literatura (Ohba, R., apud Boçon, 1998).

Para a modelagem do escoamento turbulento foram utilizados o modelo $k-\varepsilon$ clássico e o modelo de tensões de Reynolds. Para a modelagem da turbulência na região próxima à parede foram testados a Lei da Parede clássica e um modelo de duas camadas.

Foram utilizadas diferentes malhas computacionais para a solução do escoamento e para a solução da concentração. Os resultados obtidos para o escoamento foram interpolados da malha utilizada na solução do escoamento para a malha da concentração. Nesta malha, somente a equação de transporte do poluente foi resolvida. Dessa forma foi possível se obter o refinamento mais apropriado para a malha utilizada em cada problema e também a otimização do esforço computacional necessário. O cálculo das concentrações foi obtido através da solução da equação de transporte do poluente utilizando um modelo de difusividade turbulenta isotrópica.

A comparação entre os dados experimentais e os resultados obtidos com as diversas modelagens numéricas mostrou que a utilização conjunta do modelo de tensões de Reynolds e do tratamento em duas camadas produziu os melhores resultados na predição do escoamento. O desempenho dessa modelagem foi

particularmente superior na representação da recirculação presente no escoamento na região a jusante da colina.

Importantes características do escoamento investigado como, por exemplo, a presença de curvaturas, escoamento com gradiente adverso de pressão e com separação, e também efeitos de anisotropia (sobretudo nos casos relativos à atmosfera estável) explicam o sucesso obtido com a associação do modelo de tensões de Reynolds ao tratamento em duas camadas.

Um resultado interessante é que o modelo de tensões de Reynolds, quando aplicado com a Lei da Parede, e o tratamento em duas camadas empregado com o modelo $k - \varepsilon$, não produziram resultados satisfatórios com relação à representação da recirculação.

Com relação ao custo computacional requerido nas soluções obtidas através das diversas modelagens investigadas, foi verificado que a utilização do modelo de tensões de Reynolds exigiu um tempo computacional de 1,5 a 2 vezes o tempo necessário ao modelo $k - \varepsilon$. Já o emprego do tratamento em duas camadas refletiu em um aumento de 6 a 8 vezes no tempo computacional necessário àquele associado à Lei da Parede. Este fato deveu-se à necessidade de maior refinamento da malha computacional na região próxima à parede.

Com relação ao cálculo das concentrações, primeiramente foram apresentados resultados na forma de isolinhas de concentração. Estes resultados permitiram uma visão geral dos campos de concentração e mostraram que os resultados numéricos obtidos foram razoáveis nas regiões a jusante da colina, quando comparados aos experimentais. Na região mais próxima à fonte emissora, foram observadas concentrações excessivamente altas ao nível do solo. Entendemos que essas altas concentrações no solo foram decorrentes de uma excessiva dispersão vertical calculada nos estágios iniciais da pluma numérica. Na tentativa de solucionar este problema, foi também investigado um tratamento para a redução da difusividade turbulenta de massa na região próxima à emissão baseado na distribuição Gaussiana da pluma próxima à fonte.

Os campos de concentrações apresentados mostraram importantes aspectos qualitativos relativos ao problema como, por exemplo, os efeitos da estabilidade atmosférica na dispersão do poluente, que foram adequadamente previstos.

As concentrações também foram apresentadas na forma de perfis verticais e horizontais de concentração permitindo uma análise mais detalhada dos resultados. Os resultados obtidos com as diversas modelagens numéricas investigadas sobreestimaram as concentrações ao nível do solo na região próxima à emissão quando não se utilizou o tratamento para a redução da difusividade. Nas simulações em que foi empregado o tratamento para a difusividade, as concentrações ao nível do solo foram sobreestimadas em uma região mais próxima ao topo da colina.

A investigação do fator de amplificação de terreno mostrou que o emprego do tratamento para a difusividade na região próxima à fonte gerou sensível melhora na estimativa dos valores para este parâmetro, na comparação com os valores experimentais. Entende-se que este resultado deveu-se à melhoria na previsão qualitativa dos valores de concentração ao nível do solo através da utilização do tratamento para a difusividade, apesar dos valores absolutos de concentração ainda não terem sido corretamente calculados. De fato, a aplicação do tratamento levou a uma redução da dispersão vertical junto à fonte e à obtenção de resultados mais realistas quanto à posição dos picos de concentração ao nível do solo. Também foi observado que a utilização das melhores soluções de escoamento (obtidas com a combinação do modelo de tensões de Reynolds com o tratamento em duas camadas) no cálculo das concentrações levaram a previsões mais realistas do fator de amplificação de terreno.

Apesar disso, a utilização do tratamento para a difusividade não solucionou o problema das discrepâncias encontradas entre os resultados numéricos e experimentais relativos aos resultados de concentrações verificados nos perfis verticais e horizontais de concentração. Apesar da aplicação do tratamento ter tido um efeito positivo quanto à previsão qualitativa das concentrações ao nível do solo, parece ter também ocasionado a subestimativa da dispersão lateral do poluente. O resultado foi que os valores absolutos de concentração no solo tornaram-se ainda mais elevados na região da colina.

A origem de tal problema possivelmente está relacionada à modelagem isotrópica da dispersão turbulenta utilizada para a solução do campo de concentrações. Apesar de ter-se levado em consideração o caráter anisotrópico da turbulência atmosférica nos cálculos do escoamento (quando utilizamos o modelo de tensões de Reynolds), nos cálculos da concentração este não foi considerado.

Assim, pode-se entender que a consideração dos efeitos de anisotropia apenas na solução do escoamento não mostrou-se apropriada, sendo necessária a utilização de uma modelagem anisotrópica também para a dispersão turbulenta, para que se obtenha melhores resultados quanto à previsão do campo de concentrações.

Um outro resultado interessante observado foi que, como os efeitos anisotrópicos são menores nos escoamentos neutros do que naqueles estavelmente estratificados, os resultados obtidos com a utilização de uma modelagem isotrópica para a dispersão turbulenta afastaram-se menos dos resultados experimentais na simulação dos escoamentos neutros.

Foi também percebido que os efeitos relacionados ao emprego do tratamento para a difusividade próxima à fonte tiveram maior impacto nos casos neutros do que nos estáveis. Uma possível explicação para este fato é que mecanismo de difusão turbulenta tenha tido um papel mais importante no transporte de massa de poluente nos casos neutros do que nos estáveis. Assim, as alterações no cálculo da difusividade turbulenta, através do tratamento para a região próxima à fonte, ficaram mais evidentes nos resultados relativos aos casos neutros.

Como foi mencionado, para o cálculo da dispersão do poluente foi utilizada a equação de transporte baseada em um modelo de difusividade turbulenta isotrópica. A equação de transporte foi alimentada pelas diferentes soluções de escoamento obtidas através da utilização das diversas modelagens numéricas investigadas. Foi observado que a alimentação da equação de transporte do poluente com as melhores soluções para o escoamento não necessariamente levou à obtenção de melhores soluções para os campos de concentrações.

6.2.

Recomendações para Futuros Trabalhos

Através da utilização de modelos mais eficientes para o cálculo da dispersão turbulenta, espera-se que os avanços obtidos na solução do escoamento possam fazer diferença na qualidade do cálculo das concentrações.

A investigação de um modelo anisotrópico para a dispersão turbulenta de poluente utilizando as melhores soluções de escoamento obtidas (com o modelo de tensões de Reynolds e o tratamento em duas camadas) seria uma continuação natural do trabalho aqui apresentado. Apesar do esforço computacional necessário, espera-se que o cálculo das componentes do fluxo turbulento de concentração através das respectivas equações de transporte, de forma semelhante ao que é feito no cálculo das tensões de Reynolds ao utilizar-se o modelo de tensões de Reynolds, seja uma alternativa interessante.

Na solução dos campos de concentrações foi utilizado o esquema numérico Power-law (primeira ordem). Foi testado o esquema Quick, porém foram constatados problemas de convergência (os resíduos se estabilizavam em um patamar consideravelmente alto). Uma outra recomendação para futuros trabalhos consiste na utilização de esquemas numéricos de ordem mais elevada juntamente com malhas mais refinadas para que se supere o problema da convergência. Através da utilização de um esquema numérico de ordem mais elevada é possível que sejam obtidos resultados mais realistas.

No presente trabalho foram estudadas as condições de estabilidade neutra e estável. A investigação do escoamento e da dispersão em condições atmosféricas instáveis também traria informações valiosas com relação ao assunto.

O estudo da dispersão sobre topografia complexa em escala real também seria uma continuação para o trabalho aqui apresentado. A aplicação do modelo de tensões de Reynolds para o cálculo do escoamento sobre topografia complexa em escala real e a simulação da dispersão em escala real utilizando-se uma modelagem anisotrópica para a dispersão turbulenta do poluente seriam contribuições bastante interessantes.

A simulação de escoamentos atmosféricos através da dinâmica dos fluidos computacional permite ainda uma série de possibilidades quanto à representação dos fenômenos atmosféricos. A inclusão de mecanismos de reações químicas, os mecanismos de remoção por deposição seca e úmida são algumas destas possibilidades.