

ANÁLISE NUMÉRICA DO ESCOAMENTO A JUSANTE DE UM DEGRAU DESCENDENTE BIDIMENSIONAL

Luciene Muniz Frigo

Sérgio Said Mansur

Departamento de Engenharia Mecânica - DEM

UNESP Ilha Solteira

15385-000, Ilha Solteira, SP

mansur@dem.feis.unesp.br, luciene@dem.feis.unesp.br

Rubens Campregher

Aristeu da Silveira Neto

Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC

Universidade Federal de Uberlândia - UFU

38400-902, Uberlândia, MG

campregher@mecanica.ufu.br, aristeus@mecanica.ufu.br

Resumo: *No presente trabalho, a metodologia de simulação de grandes escalas foi empregada na análise bidimensional do escoamento a jusante de um degrau descendente, para números de Reynolds $1,4 \cdot 10^4$ e $4,5 \cdot 10^4$. As equações da Continuidade e de Navier-Stokes foram discretizadas espacialmente pelo método dos volumes finitos, utilizando-se malha cartesiana deslocada. Uma formulação totalmente implícita de primeira ordem foi adotada na discretização temporal. Para o acoplamento pressão-velocidade, foi empregado o algoritmo SIMPLEC e o esquema QUICK consistente foi utilizado no tratamento dos termos advectivos. Os resultados numéricos foram confrontados com alguns resultados da literatura, apresentando boa concordância.*

Palavras chaves: *degrau descendente, simulação numérica, volumes finitos, simulação de grandes escalas, modelo sub-malha de Smagorinsky*

1. INTRODUÇÃO

O escoamento a jusante de uma expansão brusca (*backward-facing step*) tem sido exaustivamente estudado ao longo das últimas décadas, constituindo um problema clássico da mecânica dos fluidos. A despeito de sua simplicidade geométrica, este tipo de escoamento apresenta alto grau de complexidade, caracterizando-se pela presença de camadas limite em desenvolvimento, zona de recirculação, regiões de descolamento e recolamento, e, ainda, a geração e o transporte de instabilidades do tipo Kelvin-Helmholtz. Todos estes fenômenos, reunidos num só escoamento, tornam o problema particularmente adequado para a validação de códigos computacionais voltados para a simulação numérica de escoamentos.

No presente trabalho, simulações do escoamento isotérmico e não-permanente a jusante de um degrau descendente foram realizadas, com o auxílio de um programa desenvolvido para resolver, via solução numérica das equações de Navier-Stokes, problemas bidimensionais em geometrias cartesianas, cujos detalhes são apresentados por Campregher (2002). As equações do movimento são discretizadas no espaço pelo método dos volumes finitos. O acoplamento pressão-velocidade é feito por intermédio do método SIMPLEC, enquanto o esquema QUICK é utilizado no tratamento dos termos advectivos.

O escoamento sobre uma expansão brusca foi investigado numérica e experimentalmente por Kim *et al.*(1978), mostrando toda a complexidade inerente aos processos de descolamento, de recolamento e de redesenvolvimento da camada limite hidrodinâmica a jusante do degrau.

No trabalho de Armaly *et al.*(1983), resultados para escoamentos laminares, transicionais e turbulentos, na faixa de Reynolds entre 70 e 8000, são apresentados, mostrando que o comprimento de separação altera-se radicalmente com o número de Reynolds.

Uma análise numérica do problema turbulento bidimensional, para degraus com diferentes alturas foi realizada por Silveira-Neto *et al.*(1991). Neste estudo, o número de Reynolds, baseado na altura do canal de entrada, foi variado de 6.10^3 a 9.10^4 . Posteriormente, Silveira-Neto *et al.*(1993) retomaram este trabalho, voltando sua atenção para a análise minuciosa das estruturas turbulentas tridimensionais que se desenvolvem neste tipo de escoamento, utilizando como ferramentas as metodologias de simulação direta e de grandes escalas.

Friedrich e Arnal(1990) estudaram o escoamento no interior dessa geometria, para altos números de Reynolds, empregando, também, um programa baseado no método dos volumes finitos associado à técnica de simulação de grandes escalas (LES). Os cálculos foram executados com malha uniforme e os resultados tratados estatisticamente apresentaram uma boa coerência.

Akselvoll e Moin (1993) apresentaram resultados tridimensionais para o problema do degrau descendente, para um número de Reynolds igual a 5100, baseado na altura do degrau e na velocidade de entrada. A metodologia de simulação de grandes escalas foi, novamente, empregada, desta vez, com o auxílio do modelo de localização dinâmica (Ghosal *et al.*,1992). Os resultados obtidos foram comparados com dados oriundos de simulação numérica direta (DNS), de cálculos efetuados utilizando-se o modelo sub-malha dinâmica de Germano *et al.* (1991), e, ainda, com informações experimentais. Em todas as situações, os resultados dos cálculos foram considerados bastante consistentes.

2. EQUAÇÕES GOVERNANTES E PROCEDIMENTOS NUMÉRICOS

De maneira geral, qualquer escoamento isotérmico, cujo número de Mach seja inferior a 15, pode ser matematicamente bem representado pelas equações de conservação da massa e de Navier-Stokes. Sob a hipótese de escoamento bidimensional e incompressível, de um fluido newtoniano, com propriedades físicas constantes, as seguintes equações são suficientes para a representação do fenômeno.

– Conservação da massa:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0, \text{ com } j = 1, 2 \quad (1)$$

– Navier-Stokes:

$$\frac{\partial u_j}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \text{ com } i = 1, 2 \text{ e } j = 1, 2 \quad (2)$$

onde ρ representa a densidade do fluido; ν a viscosidade cinemática, u as componentes do vetor velocidade e p a pressão.

Exceto para alguns casos particulares, onde grandes simplificações podem ser feitas, a não linearidade que caracteriza os termos advectivos da equação de Navier-Stokes impossibilitam sua solução analítica. Sendo assim, torna-se necessária a utilização de métodos numéricos, através dos quais as equações governantes são discretizadas no tempo e no espaço, para fornecer uma solução aproximada para o problema. O Método dos Volumes Finitos, utilizado neste trabalho, destaca-se como um dos métodos de discretização espacial mais empregados na simulação numérica de

problemas de dinâmica dos fluidos e de transferência de calor.

Para a discretização temporal, foi adotada uma formulação totalmente implícita, onde os valores das variáveis em todo o domínio encontram-se no mesmo instante de cálculo e são desconhecidos, o que leva a resolução de um sistema linear, para obter a distribuição das variáveis no domínio de cálculo.

Para o tratamento dos termos advectivos, foi utilizado o esquema QUICK consistente, proposto por Hayase *et.al.*(1992), que consiste numa derivação do esquema QUICK de Leonard (1979). O esquema de diferenças centrais foi utilizado para representar os fluxos difusivos das equações de transporte. O método SIMPLEC foi adotado para o acoplamento pressão velocidade e, por fim, o modelo clássico de Smagorinsky (1963) foi utilizado para permitir a representação de escoamentos turbulentos, através da metodologia de simulação de grandes escalas (LES). Após uma série de testes preliminares, o valor da constante de Smagorinsky (C_s) foi ajustado em 0,18. A geometria do degrau descendente bidimensional simulado, está representada na Fig.(1).

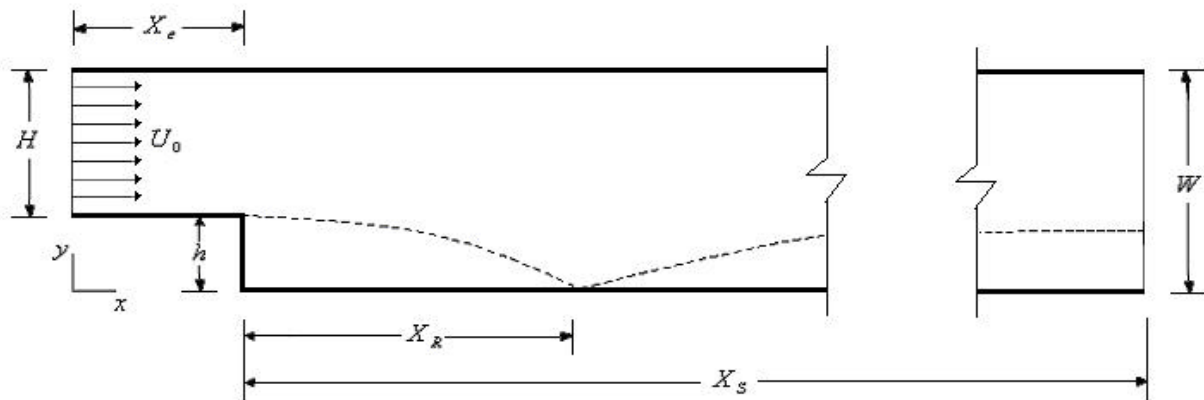


Figura 1. Definição de parâmetros geométricos e operacionais para o problema do degrau descendente (*backward-facing step*)

Os estudos aqui apresentados foram efetuados para Reynolds $1,4 \cdot 10^4$ e $4,5 \cdot 10^4$, utilizando-se malhas regulares de 400×60 e 720×60 , respectivamente. O número de Reynolds foi baseado na altura do degrau e na velocidade uniforme do escoamento no canal entrada. Condições de não deslizamento foram impostas nas fronteiras superior e inferior, com condição de Neumann na saída do domínio de cálculo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seqüência temporal do campo de isovorticidade de um escoamento em expansão brusca, para $Re_h = 1,4 \cdot 10^4$, é representada na Fig.(2), onde $X_e = 2h$, $X_s = 16h$, $r = h/H = 0,5$, enquanto o tempo adimensional é dado por: $t^* = t U_0 / h$. De maneira similar, a Fig.(3) representa o campo de isovorticidade de um escoamento com $Re_h = 4,5 \cdot 10^4$, onde $X_e = 4h$, $X_s = 32h$, $r = 0,5$. Em ambos os casos, diferentes regiões podem ser observadas ao longo do domínio de cálculo.

Sobre o degrau, ocorre um escoamento do tipo camada limite, o qual, logo após a expansão, se desprende, gerando uma zona cisalhante, com a formação de instabilidades do tipo Kelvin-Helmoltz. Sob o efeito de confinamento, e devido à influência da região de recirculação nas proximidades da parede vertical do degrau, estas estruturas turbilhonares são transportadas em direção à região de recolamento da camada limite, uma região de características bastante complexas, por apresentar estruturas turbilhonares que se chocam contra a parede inferior do canal. Em seguida, a camada limite se desenvolve novamente, mantendo uma interação com as estruturas turbilhonares que são transportadas para a saída do canal. Nota-se, também, a presença de uma região de escoamento mais estável, localizada entre a camada limite superior e as várias instabilidades presentes na parte inferior do canal. Uma análise comparativa entre estas duas

seqüências permite verificar que a complexidade do escoamento cresce com o número de Reynolds, como o esperado. É fácil observar, na Fig.(3), a forte interação que os vórtices gerados a jusante do degrau mantêm entre si e com a camada limite em desenvolvimento sobre a parede inferior.

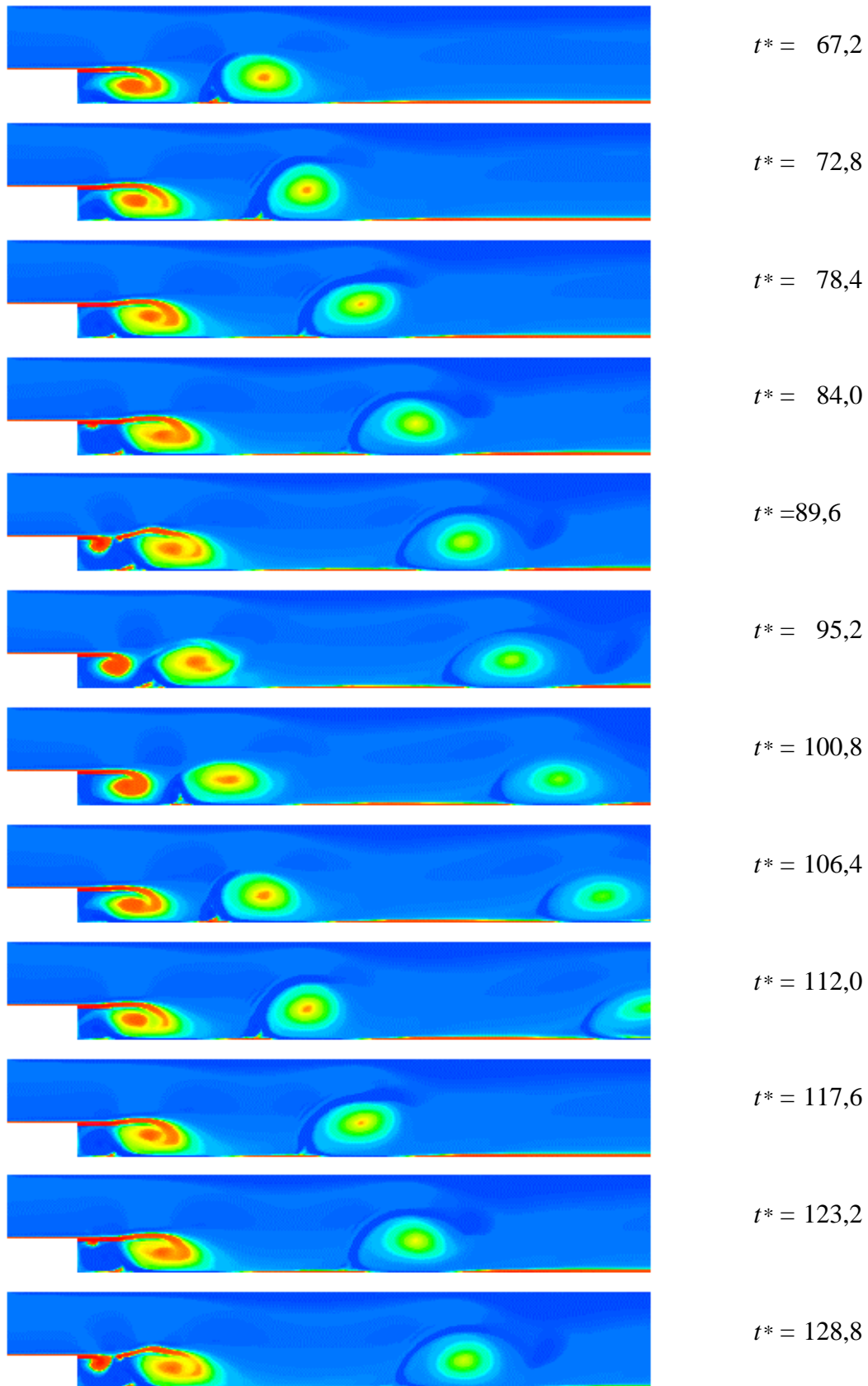


Figura 2. Evolução temporal do campo de isovorticidade, $Re_h = 1,4 \times 10^4$

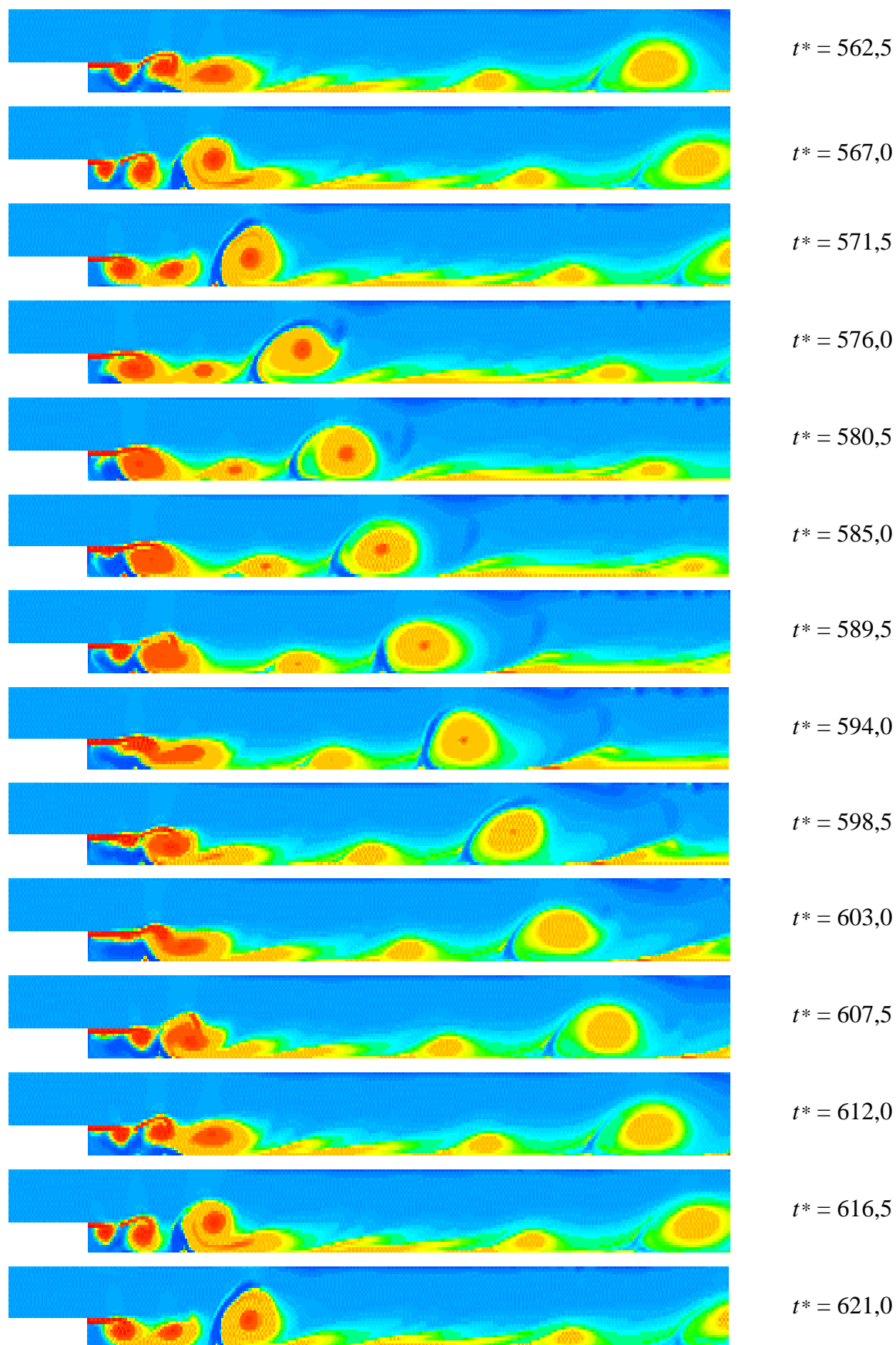


Figura 3. Evolução temporal do campo de isovorticidade, $Re_h = 4,5 \times 10^4$

Na Figura (4), o perfil médio de velocidades obtido para $Re_h = 4,5 \cdot 10^4$, na estação $x = 2,77 h$, é comparado com dados de diferentes autores, mostrando uma boa concordância, sobretudo na região

central do canal. Nas proximidades das paredes, todos os resultados dos cálculos se distanciam dos dados experimentais de Kim *et al.*(1978), o que pode ser atribuído à natureza bidimensional das simulações e à ausência de turbulência residual nas condições de cálculo.

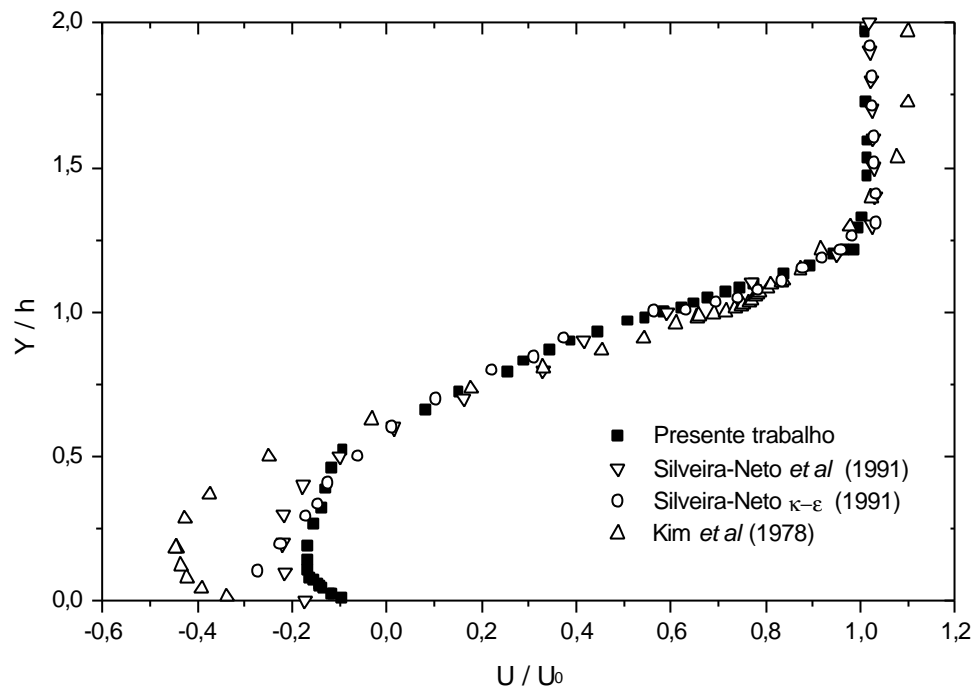


Figura 4. Perfil da velocidade u , para $x = 2,77 h$, $Re_h = 4,5.10^4$.

4. CONCLUSÃO

No presente trabalho, uma análise bidimensional do escoamento a jusante de um degrau descendente (*backward-facing step*), para Reynolds $1,4.10^4$ e $4,5.10^4$, foi efetuada, com o objetivo principal de avaliar as potencialidades de um código computacional recentemente desenvolvido para a simular escoamentos turbulentos, por intermédio da metodologia de simulação de grandes escalas. A simplicidade geométrica e o alto grau de complexidade desse tipo de escoamento fazem do degrau descendente um excelente caso-teste para a realização desta tarefa. Os resultados numéricos foram confrontados com dados experimentais e numéricos reportados da literatura, apresentando uma concordância satisfatória.

5. AGRADECIMENTOS

O presente artigo foi desenvolvido com o suporte financeiro da FAPESP (Processos 03/11737-2 e 01/12251-0) e da CAPES, através do programa PROCAD, que permitiu uma forte interação científica entre as equipes do Laboratório de Transferência de Calor e Massa da Universidade Federal de Uberlândia e os Laboratórios de Mecânica dos Fluidos Computacional e Visualização de Escoamentos, da UNESP Ilha Solteira.

6. REFERÊNCIAS

- Armaly, B.F., Durst, F., Pereira, J.C., Schönung, B., 1983, "Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow", *J.Fluid Mech*, vol.127, pp. 423-496.
- Asksevoll, K., Moin, P., 1993, "Application of the dynamic localization model to large-eddy simulation of turbulent flow over a backward facing step", *Engineering Applications of Large Eddy Simulations*, FED - vol.162, pp.1-6.

- Campregher, R., 2002, “*Simulação Numérica de Escoamentos Transicionais e Turbulentos ao Redor de Geometrias Cartesianas*”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, Ilha Solteira, Brasil.
- Friedrich, R., Arnal, M., 1990, “Analysing turbulent backward facing step flow with the low passfiltered Navier Stokes equations”, *J. Wind Engng Ind. Aerodyn*, vol.35, pp.101-128.
- Germano, M., Piomelli, U., Moin, P., Cabot, W.H., 1991, “A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model”, *Phys. Fluids A*, vol. 3, pp. 1760-1765.
- Ghosal, S., Lund, T.S., Moin, P., 1992, “*A Local Dynamic Model for Large Eddy Simulation*”, Annual Research Briefs, Center for Turbulence Research, Stanford University, Stanford.
- Hayase, T., Humphrey, J.A.C., Greif, R., 1992, “A consistently formulated QUICK scheme for fast and stable convergence using finite-volume iterative calculation procedures”, *J. Computational Physics*, vol.98, pp.108-118.
- Kim, J., Kline, J., Johnston, J.P., 1978, “*Investigation of Separation and Reattachment of a Turbulent Shear Layer: Flow Over a Backward-Facing Step*”, Report MD-37, Thermosciences Division, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Stanford.
- Leonard, B.P., 1979, “A stable and accurate convective modeling proceed based on quadratic upstream interpolation”, *Comp. Meth. Applied Mech. Eng.*, vol.19, pp.59-97.
- Silveira Neto, A., Grand, D., Métais, O., Lesieur, M., 1993, “A numerical investigation of the coherent vortices in turbulence behind a backward-facing step”, *J. Fluid Mechanics*, vol.256, pp.1-25.
- Silveira Neto, A., Grand, D., Lesieur, M., 1991, “Simulation numérique bidimensionnelle d’un écoulement turbulent stratifié derrière une marche”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol.34, pp.1999-2011.
- Smagorinsky J., 1963, “General circulation experiments with the primitive equations I: The basic experiment”, *Mon. Weather Rev.*, vol.91, pp.99-164.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE FLOW PAST A TWO-DIMENSIONAL BACKWARD-FACING STEP

Luciene Muniz Frigo

Sérgio Said Mansur

Department of Mechanical Engineering

São Paulo State University at Ilha Solteira - UNESP

15385-000, Ilha Solteira, SP

mansur@dem.feis.unesp.br, luciene@dem.feis.unesp.br

Rubens Campregher

Aristeu da Silveira Neto

Mechanical Engineering Faculty

Federal University of Uberlândia - UFU

38400-902, Uberlândia, MG

campregher@mecanica.ufu.br, aristeus@mecanica.ufu.br

Abstract: Large eddy simulation of the flow over a backward-facing step has been performed at Reynolds number of $1.4 \cdot 10^4$ and $4.5 \cdot 10^4$. Unsteady two-dimensional simulations have been carried out by means of an incompressible finite-volume code employing cartesian staggered grids. A QUICK scheme has been implemented for the advective terms treatment in the Navier-Stokes

equations. Furthermore, fully implicit first-order time discretization has been used for all variables and the SIMPLEC algorithm has been employed for the pressure-velocity coupling. The flow patterns and the velocity profiles have been evaluated and confronted with some results from the literature, showing a good agreement.

Keywords: *backward-facing step, numerical simulation, finite volume, large eddy simulation, Smagorinsky subgrid model*