

SIMULAÇÃO NUMÉRICA 3D DO ESCOAMENTO SOBRE UM DEGRAU DESCENDENTE

Cleber Spode

cspode@mecanica.ufu.br

Rubens Campregher

campregher@mecanica.ufu.br

Aristeu da Silveira Neto

aristeus@mecanica.ufu.br

Faculdade de Engenharia Mecânica – FEMEC

Av. Joao Naves de Avila, 2160

38400-902 - Uberlândia, MG

Resumo: O escoamento turbulento tridimensional adiabático sobre um degrau descendente é estudado através da metodologia de volumes finitos utilizando técnicas de paralelização para a solução das equações de Navier-Stokes incompressíveis. O clássico caso do degrau é um excelente teste para a validação de novos códigos de dinâmica dos fluidos por apresentar, apesar da geometria simples, uma complexa formação de estruturas tridimensionais, influenciando enormemente o fenômeno da transição à turbulência e propriedades como frequências características de emissão de vórtices e comprimento de recolamento. Baseado na altura do degrau (h) e velocidade da corrente livre (U_0) foi simulado o escoamento a Reynolds 5100 para uma razão de expansão de 1.20. Segundo a literatura, escoamentos sobre um degrau com estas características geométricas apresentam um número de Reynolds crítico em torno de 748. Buscando modelar tal comportamento foi utilizada a metodologia de grandes escalas – Modelo Clássico de Smagorinsky – como modelagem da turbulência. O objetivo é validar o código computacional através deste caso teste. Resultados relativos à topologia do escoamento são apresentados, identificando-se instabilidades do tipo Kelvin-Helmoltz durante o período de transição do escoamento devido a inflexionalidade imposta pela corrente livre. A discretização utilizada é de segunda ordem no espaço e no tempo, com diferenças centradas para o termo difusivo e advectivo e o esquema three-time level para o termo transiente. Resultados para o comprimento de recolamento, perfis de velocidade e tensor de Reynolds apresentam boa concordância com resultados experimentais.

Palavras-chave: Dinâmica dos Fluidos Computacional, Turbulência e Paralelização.

1. INTRODUÇÃO

Escoamentos turbulentos com descolamentos e recolamentos ocorrem em diversas atividades práticas de engenharia. Escoamentos internos em difusores, canais e válvulas podem apresentar esse tipo de característica, assim como escoamentos externos sobre corpos rombudos, aerofólios ou até mesmo conjuntos de edifícios. Nessas situações gradientes adversos de pressão ou obstáculos, induzem o descolamento do escoamento que, dependendo da geometria, apresenta um posterior recolamento, formando entre essas duas zonas uma bolha de recirculação. Além disso, o escoamento é de natureza transiente e tridimensional, apresentando emissão de estruturas turbilhonares que se desprendem da zona de recirculação e são transportadas à jusante do obstáculo com frequências características.

Considerando essas propriedades, o escoamento sobre um degrau descendente torna-se um atraente caso teste sendo capaz de reproduzir, apesar de sua geometria simples, todas as características acima mencionadas.

O escoamento sobre o degrau é um antigo alvo de pesquisa. Kuehn (1980), Durst & Tropea (1981) e Ötügen (1991) estudaram a influência da razão de expansão (ER) do degrau sobre o comprimento de recolamento (X_R). Armanly et al. (1983) estudou o efeito do número de Reynolds (Re) sobre X_R . Foi observado que X_R cresce com o aumento do número de Reynolds até $Re \approx 1200$ (baseado na altura do degrau (h) e na velocidade de corrente livre (U_0)). No regime entre $1200 < Re < 6600$ o comprimento de recolamento permanece praticamente constante até que o escoamento fique totalmente turbulento com $Re \approx 6600$.

Poucas investigações foram realizadas sobre as formações iniciais das instabilidades de Kelvin-Helmoltz, bem como sua transição a turbulência. Silveira Neto *et al.* (1993) faz uma detalhada descrição da topologia do escoamento sobre um degrau, identificando estruturas tridimensionais coerentes com frequências características bem definidas. Huang & Fiedler (1997) identificaram experimentalmente o processo de formação das primeiras instabilidades de Kelvin-Helmoltz e o processo de transição a turbulência das estruturas. Arnal & Friedrich (1993) também investigaram o escoamento sobre o degrau utilizando a metodologia de grandes escalas (LES).

Um estudo estatístico refinado utilizando simulação direta da turbulência foi realizado por Le, Moin & Kim (1997) onde obtiveram excelentes resultados quando comparados aos experimentos de Jovic & Driver (1994). O Reynolds simulado foi de 5100, apresentando resultados para perfis médios de velocidade, momentos de segunda ordem, comprimento de recolamento, fator de atrito e frequências características.

A modelagem da turbulência é justificável em escoamentos como o do degrau, principalmente a altos números de Reynolds, onde há multiplicidade de escalas e presença de descolamento que promovem a interação entre estruturas turbilhonares alimentando um largo espectro de frequências. Metodologias como *DNS* (*Direct Numerical Simulation*) exigem malhas extremamente refinadas e esquemas de discretização espacial e temporal de alta ordem. A metodologia de grandes escalas *LES* (*Large Eddy Simulation*) vem amenizar a necessidade de malhas muito refinadas, como as usadas em *DNS*, e é possível utilizar esquemas de menor ordem. A metodologia *LES*, como o seu próprio nome sugere, calcula as grandes estruturas e modela apenas as pequenas, onde o comportamento é mais universal. Com isso, capturam-se os fenômenos de maior relevância sem perder o caráter transiente, podendo assim fazer frente aos modelos *RANS* e *URANS* baseados nas equações médias de Reynolds que, em geral, são mais difusivos, podendo mascarar fenômenos transientes, detectando apenas as escalas de baixa frequência. Metodologias mais atuais, como a *DES* (*Detached Eddy Simulation*) e outros modelos híbridos procuram tirar vantagens da utilização combinada de modelos *LES* e *RANS*, visto que modelos *LES* apresentam um comportamento deficitário em regiões parietais, onde as metodologias *RANS* possuem seu ponto forte.

O *benchmark* do degrau é utilizado para validar o código desenvolvido no LTCM, constituído por um modelo de grandes escalas aliado a técnicas de paralelização das equações de Navier-Stokes, através da comparação de resultados com Jovic & Driver (1994).

2. MODELAGEM MECÂNICA

2.1 Domínio computacional

A Figura 1 apresenta um esquema do escoamento sobre o degrau, descrevendo suas dimensões principais. O domínio consiste em um comprimento $L = 31h$, com um comprimento de entrada $X_i = 3.12h$, da altura do domínio $H = 6h$ e de uma profundidade $W = 4h$. O sistema de coordenadas é posicionado no canto inferior do degrau, a partir do qual será medido o comprimento de recolamento X_R . A razão de expansão $ER = 6$ é dada por $ER = H/(H-h)$ (Le, Moin & Kim, 1997).

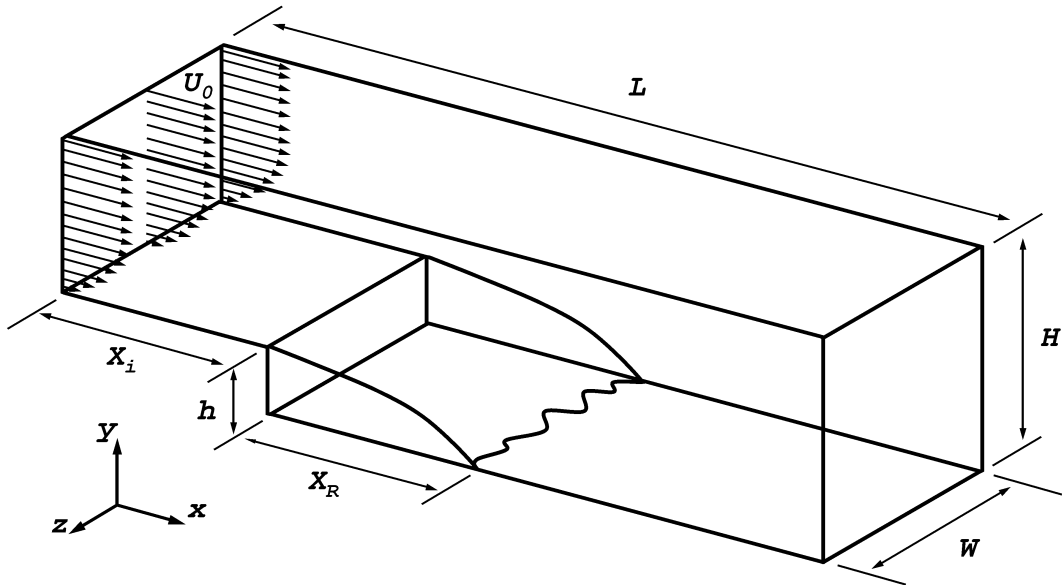


Figura 1: Esquema do escoamento sobre o degrau descendente.

O número de Reynolds é definido como:

$$Re_h = \frac{\rho U_0 h}{\mu} \quad (1)$$

Duas configurações de malha foram utilizadas. Uma configuração inicial (caso 1) e outra refinada (caso 2), conforme segue na Tabela 1. A malha é não uniforme na direção Y com um refinamento junto às paredes.

Tabela 1. Configurações de malha.

Configuração	Número de volumes		
	X	Y	Z
Caso 1	300	70	20
Caso 2	410	96	32

2.2 Método Numérico

O escoamento é modelado através das equações de Navier-Stokes incompressíveis isotérmicas filtradas, aplicando-se a metodologia de grandes escalas com o clássico modelo de Smagorinsky.

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

O primeiro termo da Equação (2) representa a variação temporal da velocidade e o segundo o termo advectivo. Do lado direito da igualdade, encontra-se o gradiente de pressão e os termos difusivos. Efeitos do campo gravitacional são desprezíveis, justificando a ausência do termo de força de corpo na Equação (2).

A Equação (3) representa a continuidade, sendo puramente definida como o divergente do vetor velocidade igual a zero, uma vez que o termo de variação de densidade é nulo devido à hipótese de incompressibilidade.

O termo μ_t representa a viscosidade turbulenta computada pelo modelo de Smagorinsky:

$$\mu_t = \mu + \rho (C_s \Delta)^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (4)$$

com μ sendo a viscosidade molecular do fluido, ρ a densidade, C_s a constante de Smagorinsky, Δ o tamanho do filtro e S_{ij} o tensor taxa de deformação, Lesieur (1990).

O filtro utilizado Δ é definido como $\Delta = dx \times dy \times dz$, onde dx , dy e dz são as dimensões de cada volume finito. A constante C_s faz um ajuste de forma que o modelo seja válido. Variações para C_s são experimentadas no presente trabalho na faixa de 0.05 a 0.18.

As equações são discretizadas por volumes finitos com diferenças centradas de segunda ordem para o termo advectivo e difusivo. O termo temporal é discretizado com o esquema three-time level (Ferziger & Peric, 1999). O arranjo é colocalizado com todas as variáveis armazenadas no centro do volume, utilizando a interpolação de Rhie & Chow para a pressão. O acoplamento pressão velocidade é feito com o algoritmo SIMPLEC, sendo o sistema de equações para a equação da correção da pressão resolvido com o SIP (*Strongly Implicit Procedure*) e o SOR (*Successive Over-Relaxation*) para os sistemas de equações das velocidades u , v e w . Essas características conferem ao algoritmo um caráter totalmente implícito.

2.3 Paralelização

O volume dos sistemas de equações gerado por malhas utilizadas na atualidade exige um grande esforço computacional. Uma solução é utilizar técnicas de paralelização, distribuindo assim a carga do problema entre diversos computadores. A filosofia de paralelização utilizada no presente trabalho consiste em dividir o domínio computacional em subdomínios, tantos quantos for o número de computadores empregados na execução do cálculo, dividindo-se assim o processamento e a memória utilizada (Baker & Smith, 1996). Cada subdomínio é processado por uma CPU distinta, havendo troca de informações com os domínios adjacentes (Figura 2) a cada processo iterativo.

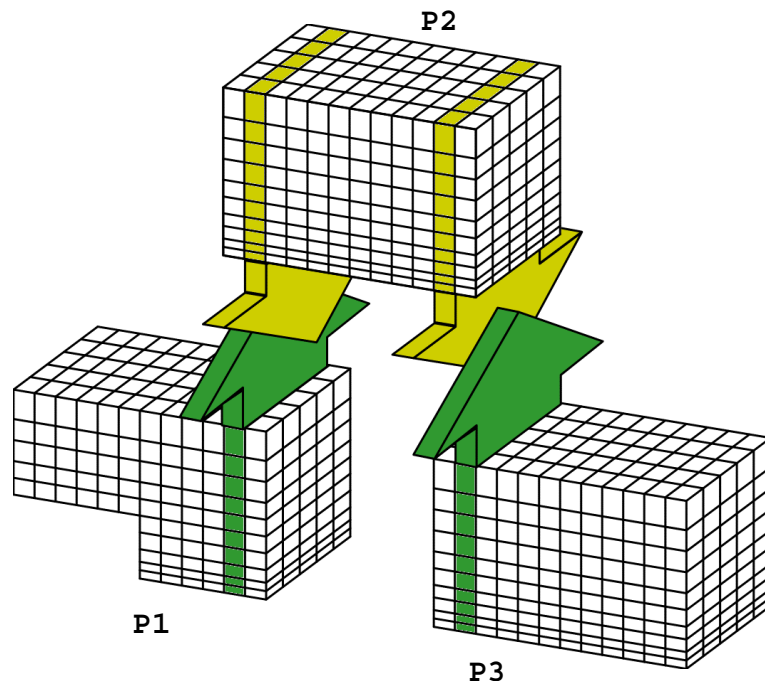


Figura 2: Troca de informação entre os subdomínios.

Para tal, utiliza-se um *cluster Beowulf* de 10 microcomputadores Pentium 4® (2.8 GHz/1.5Gb RAM) interligados por uma rede de 1 Gbps disponível no LTCM. No presente trabalho dois computadores processando o mesmo caso em paralelo foram suficientes para se obter um tempo aceitável de processamento. Fatores de performance como a escalabilidade (fator que relaciona o tempo de processamento do caso com o número de CPU's utilizadas) muitas vezes restringem o uso de infinitas máquinas para processar um mesmo caso. Conforme se incrementa o número de processadores, há aumento de tráfego da rede interna do *cluster*, gastando mais tempo trocando informações entre os subdomínios do que realmente processando cálculos, podendo chegar ao ponto em que o incremento no número de CPU's resultará em um aumento no tempo de processamento.

O código é escrito em FORTRAN 90, utilizando o compilador IFC (Intel Fortran Compiler) e a biblioteca de paralelização MPICH.

2.4 Condições de contorno e avanço temporal

Condição de não deslizamento é aplicada às paredes inferiores do domínio ($u=0$, $v=0$ e $w=0$). As paredes laterais possuem condição de periodicidade, considerando-se o escoamento estatisticamente homogêneo.

O perfil de velocidades na entrada do domínio é permanente com componentes para u e v , de acordo com dados experimentais de Jovic & Driver (1994), ver Figura 3. Componentes de velocidade na direção z foram assumidas como nulas, na seção de entrada.

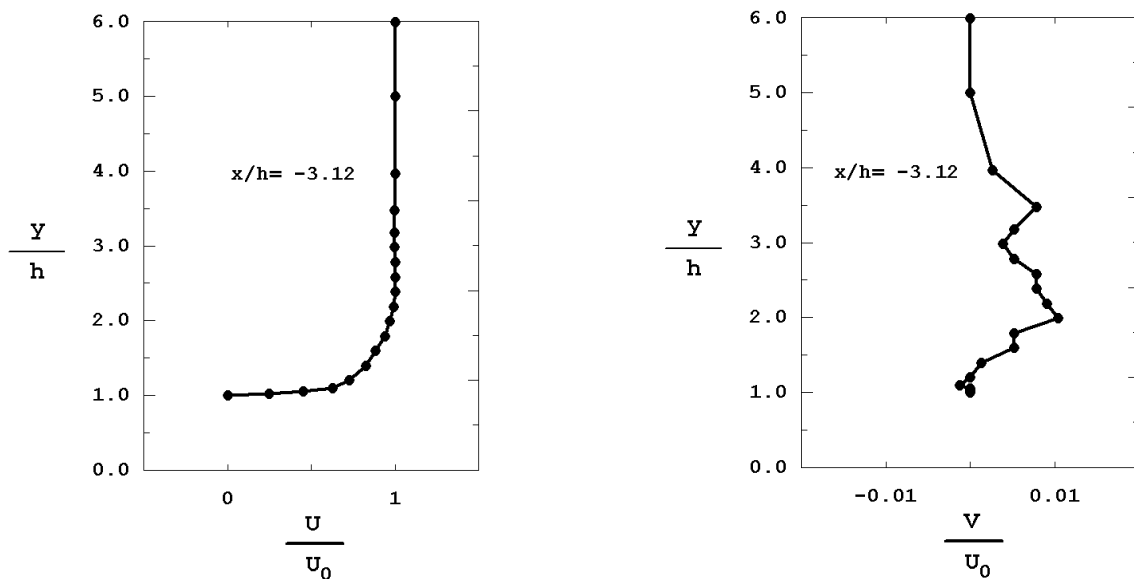


Figura 3: Perfis médios de velocidade para U e V na entrada do domínio.

A condição de saída é derivada nula para a velocidade. Estruturas turbilhonares que atingem o fim do domínio podem induzir reentrada de massa, levando o cálculo a divergência. Para evitar esse tipo de situação, optou-se pelo emprego de uma função de amortecimento para a componente de velocidade u , de acordo com Souza et al. (2002).

Tratando-se de um código totalmente implícito, têm-se estabilidade incondicional, estando livre para impor o Δt . Porém, devido à necessidade de capturar propriedades inerentes ao fenômeno, é conveniente adotar um passo de tempo suficientemente pequeno, de forma a não perder a capacidade do método em descrever as frequências naturais do escoamento. Le, Moin & Kim (1997) utiliza um avanço temporal constante de $\Delta t = 0,0018h/U_0$, sendo este muito pequeno devido à metodologia empregada, *DNS*, e por tratar-se de um método semi-implícito.

O avanço no tempo utilizado no presente trabalho é $\Delta t = 0,008h/U_0$ fixos ao longo de toda a simulação. Apesar de ser superior ao Δt utilizado por Le, Moin & Kim (1997) este passo de tempo é menor que o tempo necessário para que a velocidade de referência cruze a distância do menor volume do domínio, garantindo assim capacidade em descrever o fenômeno de forma fidedigna.

O tempo total de simulação foi $t_{total} = 477h/U_0$, sendo descartados os $273h/U_0$ iniciais gastos para atingir um regime estatisticamente desenvolvido. O descarte de um longo tempo inicial é necessário para ter certeza de que estruturas turbilhonares decorrentes do fenômeno transição já tenham se desenvolvido e não interfiram na análise estatística. Toda a estatística do trabalho foi desenvolvida considerando os $204h/U_0$ finais, utilizando 2537 amostras (uma a cada 10 passos de tempo).

3. RESULTADOS

Resultados de fenômenos transientes, como a formação de instabilidades de Kelvin-Helmoltz e desprendimento de rolos de vórtices são apresentados, verificando-se a multiplicidade de estruturas turbilhonares. Perfis de velocidade média para u e momentos estatísticos de segunda ordem $\overline{(u'^2)}^{1/2}/U_0$, $\overline{(v'^2)}^{1/2}/U_0$ e $-\overline{v'u'}/U_0^2$ são apresentados em estações de interesse, juntamente com comprimentos de recolamento médios no plano central do domínio ($z = W/2$).

3.1 Resultados Transientes

Instabilidades de Kelvin-Helmoltz são induzidas pelo perfil inflexional gerado pela corrente livre que escoar sobre o degrau, apresentando comportamento semelhante ao de uma camada de mistura. Os primeiros rolos de vórtices nascem com um comportamento bidimensional, desprendendo-se e sendo transportados. Rapidamente começam a sofrer influência de instabilidades inerentes ao escoamento, fazendo com que essas estruturas coerentes transicionem e adquiram um caráter totalmente tridimensional, ver Figura 5.

A formação de estruturas coerentes no escoamento sobre um degrau foi amplamente estudada por Silveira Neto et al. (1993), onde foram encontradas estruturas de topologia semelhante às apresentadas aqui. Células contra-rotativas são observadas em um plano de corte $Z \times Y$, Figura 4, caracterizando a tridimensionalidade do escoamento.

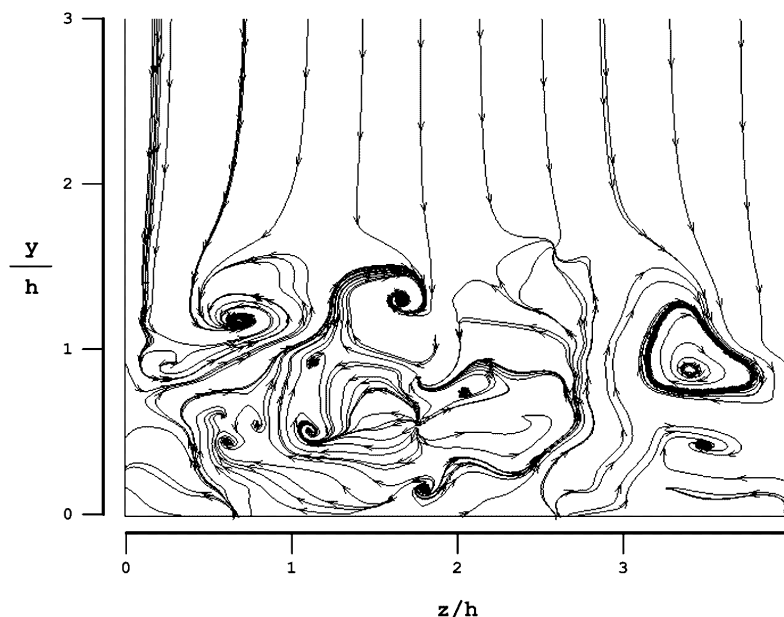


Figura 4: Linhas de corrente sobre o plano $Z \times Y$ em $x/h = 4.0$ - $t = 360h/U_0$ - Caso 2.

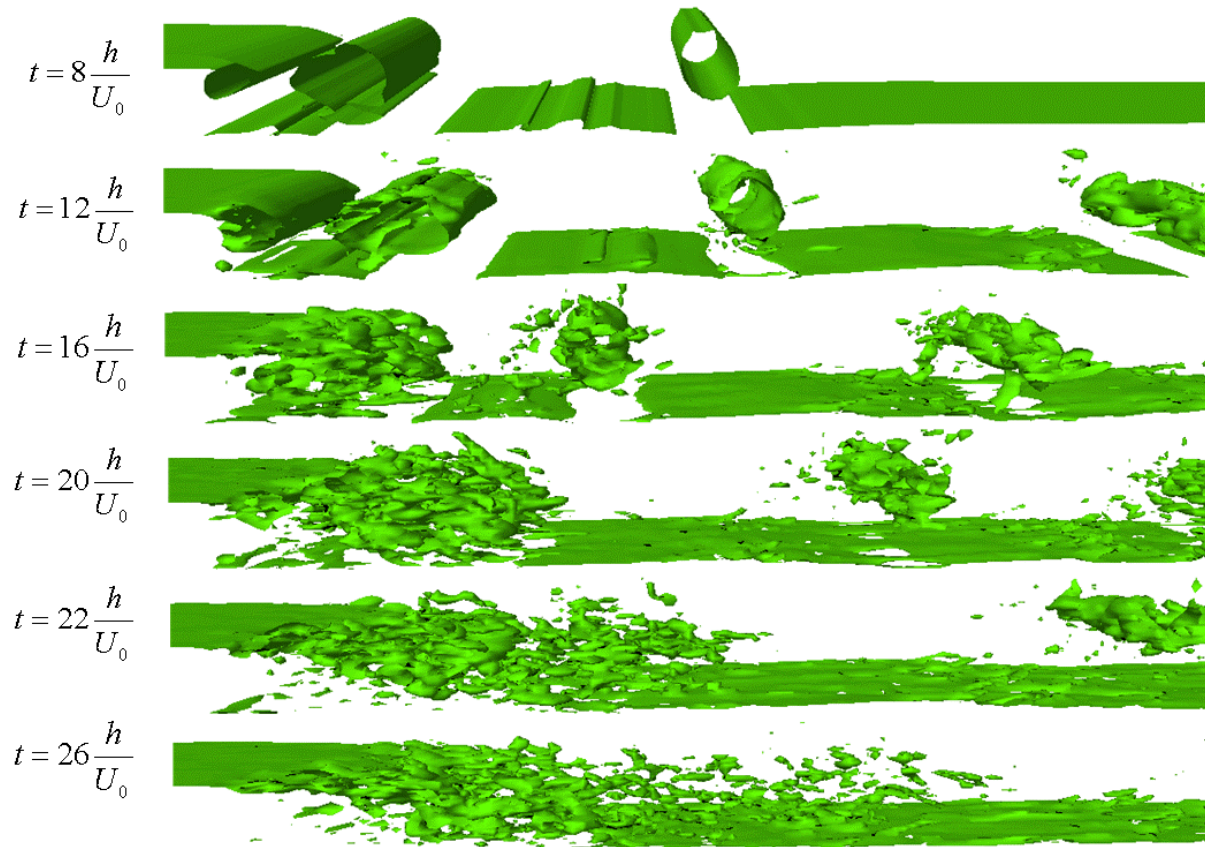


Figura 5: Iso-superfícies de vorticidade $\omega_z = 1,26h/U_0$ - Caso 2.

3.2 Perfis de velocidade média e tensor de Reynolds

A quantificação precisa do escoamento sobre o degrau passa necessariamente pela análise de perfis médios de velocidade e momentos de segunda ordem, quantidades essas apresentadas em quatro estações representativas, nas regiões de recirculação ($0 < x < X_R$), recolamento ($x \approx X_R$) e desenvolvimento da camada limite ($x > X_R$). A influência da constante de Smagorinsky pode ser avaliada através dos perfis de velocidade média U , ver Figura 6 e dos momentos de segunda ordem, ver Figura 7, quando comparados ao dados experimentais de Jovic & Driver (1994).

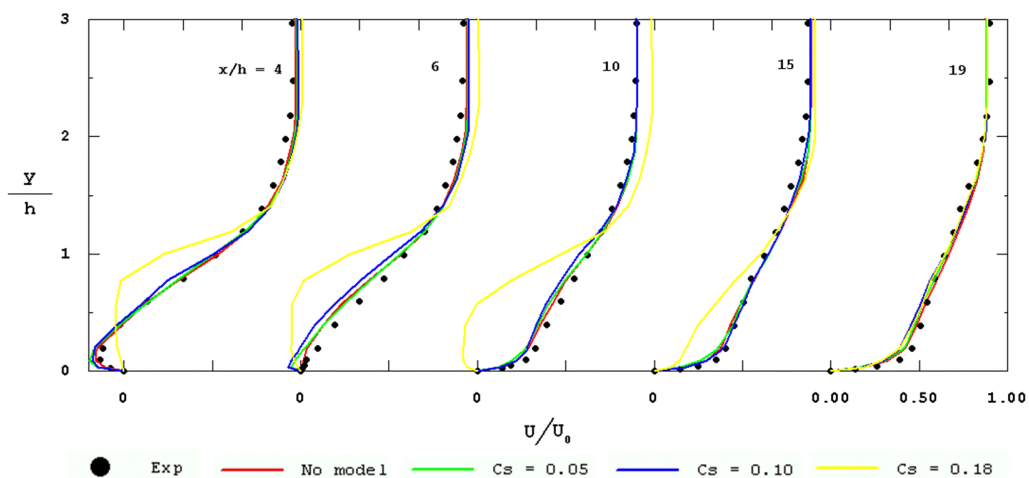


Figura 6: Perfis de velocidade média U em estações de interesse – Caso 1.

Para $Cs = 0,18$ nota-se um comportamento difusivo, com perfis médios de velocidade e momentos de segunda ordem distorcidos.

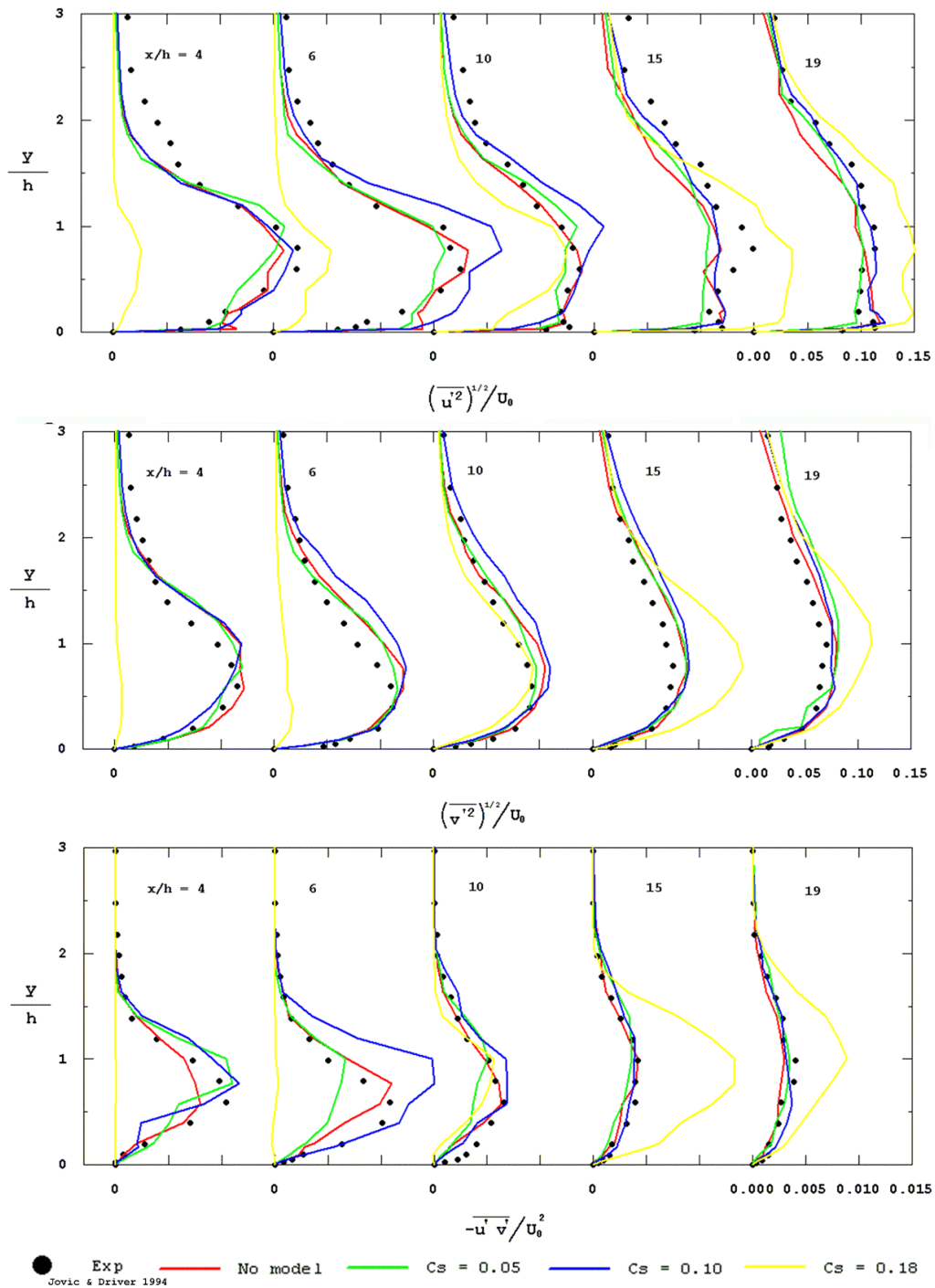


Figura 7: Perfis para momentos de segunda ordem em estações de interesse – Caso 1.

Para valores entre 0,05 e 0,10 obtêm-se bons resultados, com algumas zonas de superávit e outras com déficit. Também são apresentados resultados sem modelagem da turbulência, sendo igualmente satisfatórios, mas com alguns déficits nas variáveis de momento de segunda ordem. Resultados quantitativos muito precisos não eram esperados empregando o modelo clássico de Smagorinsky, uma vez que ele apresenta sérias dificuldades em descrever fenômenos parietais.

3.3 Comprimento de Recolamento

O comprimento de recolamento é um dos fatores mais importantes na caracterização do escoamento sobre o degrau descendente, sendo o resultado de iterações entre o descolamento forçado pela expansão brusca do degrau e estruturas turbilhonares. A correta determinação desse ponto pode dar indícios de êxito ou falha de um código computacional.

A metodologia empregada na determinação do ponto de recolamento foi o método p.d.f (Adams & Johnston, 1985), que avalia a porcentagem de amostras positivas de velocidade u em relação às amostras totais no primeiro volume acima da parede, sendo o ponto de recolamento o local onde essa fração atinge os 50%. A Tabela 2 apresenta os resultados para as diferentes configurações.

Tabela 2. Comprimentos de recolamento – Caso 1.

Método	$X_R (x/h)$
Experimental (Jovic & Driver, 1994)	6.0 (+/- 0.15)
DNS (Le, Moin & Kim, 1997)	6.28
Sem modelagem	6.94
Cs = 0.05	6.63
Cs = 0.10	7.1
Cs = 0.18	>8.0

4. CONCLUSÕES

Resultados satisfatórios foram obtidos para o escoamento sobre o degrau descendente a Reynolds 5100. A opção por processamento paralelo se mostrou válida, gerando bons resultados e economizando tempo de processamento.

Resultados topológicos identificaram instabilidades de Kelvin-Helmoltz e posterior transição a turbulência, fazendo uma descrição tridimensional do escoamento. Perfis de velocidade média e de momentos de segunda ordem foram validados com dados experimentais, obtendo-se a precisão esperada para o modelo de turbulência empregado. O comprimento de recolamento obtido é satisfatório, visto que a modelagem empregada apresenta dificuldades em regiões parietais.

Modelos de Grandes Escalas como o Dinâmico tentam solucionar esse tipo de problema fazendo um cálculo dinâmico da constante, através da dupla filtragem. Uma alternativa é o emprego de metodologias híbridas que combinam modelos do tipo *RANS* ou *URANS* com modelos de grandes escalas. Modelagem desse tipo combina a boa descrição parietal das metodologias *RANS* com as características transientes na descrição das grandes estruturas através da metodologia *LES*.

Os resultados com e sem modelagem apresentaram grande semelhança, possivelmente devido ao fato do número de Reynolds ser modesto. Porém o comprimento de recolamento pode dar um indicativo da importância da modelagem, com um resultado mais próximo do experimental. Casos a Reynolds 38000 serão estudados, visando realçar o papel da modelagem da turbulência.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores Cleber Spode e Aristeu da Silveira Neto agradecem o apoio financeiro do CNPq e Rubens Campregher a CAPES.

6. REFERÊNCIAS

- Adams, E. W., Johnston, J. P., 1985, "Experimental studies of high Reynolds number backward-facing step flow", Proceedings of Fifth International Symposium on Turbulent Shear Flows, Cornell University, 5.1-5.6.
- Baker, L. Smith, B.J., 1996, "Parallel Programing", Computing McGraw-Hill.
- Durst, F., Tropea, C., 1981, "Turbulent, backward-facing step flows in two-dimensional ducts and channels", Proceedings fo Third International Symposium on Turbulent Shear Flows, University of California, Davis, 18.1-18.5.
- Ferziger, J.H. and Perić, M., 1999, "Computational Methods for Fluid Dynamics", Springer.
- Friedrich, R., Arnal, M., 1990, "Analysing turbulent backward-facing stepflow with the lowpass filtered Navier-Stokes equations", J. of Wind Eng. Industrial Aerodynamics 35, 101-128.

- Huang, H. T., Fiedler, H. E., 1997, "A DPIV study of a starting flow downstream of a backward-facing step", *Experiments in Fluids* 23, 395-404.
- Hung, L., Moin, P., Kim, J., 1997, "Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step", *Journal of Fluid Mechanics* 330, 349-374.
- Jovic, S., Driver, D., 1994, "Backward-Facing Step Measurements at Low Reynolds Number, $Re_h=5000$ ", NASA Technical Memorandum 108807.
- Kuehn, D. M., 1980, "Some effects of adverse pressure gradient on the incompressible reattaching flow over a rearward-facing step", *AIAA Journal* 18, 343-344.
- Lesieur, M., 1990, "Turbulence in Fluids", Second Revised Edition, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Ötügen, M. V. 1991., "Expansion ratio effects on the separated shear layer and reattachment downstream of a backward-facing step", *Experiments in Fluids* 10, 273-280.
- Silveira Neto, A., Grand, D., Metais, O. Lesieur, M., 1993, "A Numerical investigation fo the coherent vortices in turbulence behind a backward-facing step", *Journal of Fluid Mechanics* 256,1-25.
- Souza, L., Mendonça, M., Medeiros, M., Kloker, M., 2002 "Three Dimensional Code Validation for Transition Phenomena", III Escola de Primavera de Transição e Turbulência – Florianópolis.

3D NUMERICAL SIMULATION OF BACKWARD-FACING STEP FLOW

Cleber Spode

cspode@mecanica.ufu.br

Rubens Campregher

campregher@mecanica.ufu.br

Aristeu da Silveira Neto

aristeus@mecanica.ufu.br

Faculdade de Engenharia Mecânica – FEMEC

Av. Joao Naves de Avila, 2160

38400-902 - Uberlândia, MG

Abstract: *The adiabatic three-dimensional turbulent flow over a backward-facing step has been studied here by the Finite Volume Method using parallel processing techniques applied to the incompressible Navier-Stokes equations. The classical flow over the backward-facing step is a benchmark for new fluid dynamics codes due to the fact that, despite its simple geometry, it presents a complex generation of three-dimensional structures, influencing transition phenomenon and the properties such as characteristic frequencies of vortex emission and re-attachment length. Based on the step height (h) and free stream velocity (U_0) the flow was simulated at Reynolds 5100 for an expansion ratio of 1.20. According to the literature, backward-facing step flows having such characteristics present a critical Reynolds number around 748. A Large Eddy Simulation technique with the Classical Smagorinsky model was applied. The objective of this work is to validate the computational code developed by performing this test case. Topological results of the flow are presented, identifying Kelvin-Helmoltz instabilities during the transition period. A second order scheme in the space and time, with centered differences for the diffusive and advective terms and the three-time level method for the time-dependent term was adopted. The results for re-attachment length around $6h$, for the velocity profiles, and for Reynolds stress tensor present good agreement against Direct Numerical Simulations and against experimental data.*

Keywords: *Computational Fluid Dynamics, Turbulence and Parallel Processing.*