



SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ESCOAMENTOS TRIDIMENSIONAIS EM UMA CAVIDADE ABERTA UTILIZANDO UM CLUSTER BEOWULF

Matheus Guilherme Reimann Herckert

matheusreimann@yahoo.com.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 propósito do presente trabalho é fazer um estudo numérico de um escoamento tridimensional transiente, isotérmico, incompressível no interior de uma cavidade aberta com razões de aspecto 1:1 e 1:2. O caso da cavidade aberta foi escolhido para validação, pois resultados experimentais e numéricos são encontrados facilmente na literatura e, apesar da sua simplicidade geométrica, o escoamento em seu interior reúne diversos fenômenos de uma elevada complexidade, tornando o problema um excelente caso-teste. Os testes foram realizados utilizando um código escrito em Fortran 90, empregando bibliotecas de paralelização MPI e foi desenvolvido no Laboratório de Transferência de Calor e Massa (LTCM) da Universidade Federal de Uberlândia. As equações da continuidade e de Navier-Stokes foram discretizadas, implicitamente, utilizando o Método de Volumes Finitos (FVM) com arranjo co-localizado, sendo adotada uma aproximação de segunda ordem para os termos temporais e espaciais. Para o acoplamento pressão-velocidade foi utilizado o algoritmo SIMPLEC com o esquema de diferenças centradas para o tratamento dos termos advectivos. As simulações foram efetuadas em um cluster Beowulf composto de dez máquinas Pentium IV 2.8 GHz, 1.5 Gbyte DDR RAM conectadas em rede Gigabit. Foram simulados escoamentos a números de Reynolds 2000 e 5000, utilizando uma malha cartesiana uniforme e não uniforme. Os resultados obtidos serão analisados fisicamente e posteriormente confrontados com dados encontrados na literatura.

Palavras-chave: Cavidade, escoamento tridimensional, processamento paralelo.

1. INTRODUÇÃO

A experimentação foi, durante longo tempo, o único instrumento de investigação utilizado no estudo do movimento dos fluidos. A partir dos anos 60, o notável avanço dos computadores e sua crescente disponibilidade nas universidades e centros de pesquisa estimularam a implementação de códigos computacionais voltados para a simulação numérica de escoamentos. Indiferente ao forte ceticismo demonstrado por renomados experimentalistas sobre a confiabilidade de tais ferramentas, os métodos de solução das equações de Navier-Stokes evoluíram consideravelmente, transformando estes programas em instrumento de inestimável valor para a análise de problemas de mecânica dos fluidos e transferência de calor. Hoje, programas de grande versatilidade encontram-se disponíveis no mercado e o hábito de utilizá-los se instala como cultura, não apenas no ambiente científico mas, também, nos meios industriais. Desta forma, a fluidodinâmica computacional esta se tornando uma área de grande interesse para a solução de muitos problemas práticos. Como exemplo, podem ser citados problemas de aerodinâmica, termodinâmica, hidráulica, dentre outros.

Para se estudar a Dinâmica dos Fluidos utilizando métodos computacionais, há a necessidade de modelos matemáticos os quais são estabelecidos com base nas equações de conservação da quantidade de movimento, da massa e da energia. Estas equações, quando submetidas a condições de contorno e iniciais apropriadas, representam, matematicamente, um sistema linear a ser resolvido que se torna maior à medida que mais pontos são empregados na discretização do domínio contínuo. Entretanto, ao se analisar escoamentos mais complexos, os comprimentos de escalas presentes no seio do fluido tornam-se cada vez menores necessitando-se, para bem representar o fenômeno, aumentar consideravelmente a densidade das células elementares no interior do domínio.

Neste contexto, o emprego de cluster de computadores torna-se uma área atrativa para os pesquisadores. Com efeito, a quantidade de equipamentos desta categoria vêm aumentando consideravelmente, indicando uma tendência que deve se manter até onde se pode vislumbrar. Assim, foi montado um cluster de classe Beowulf no Laboratório de Transferência de Calor e Massa (LTCM), composto de dez máquinas Pentium IV 2.8 GHz, 1.5 Gbytes DDR RAM conectadas em rede Gigabit.

A definição de cluster, em sua forma mais básica, pode ser a de um sistema que compreende dois ou mais computadores (denominados nodos) os quais trabalham em conjunto para executar aplicações ou realizar outras tarefas de tal forma que, para os usuários, existe a impressão de que somente um único computador responde por todos, criando a ilusão de um recurso único (grande computador virtual). Este conceito é denominado transparência do sistema. Como características fundamentais para a construção destas plataformas inclui-se elevação da confiança, da distribuição de carga e da performance.

Podem-se empregar os clusters para diferentes finalidades como obter alta disponibilidade, quando uma das máquinas falha a outra assume seu posto ou alto desempenho, onde um grande poder de processamento é exigido. No início de 1994, em uma tentativa de abaixar os custos dos sistemas de processamento distribuído, mantendo a elevada capacidade de processamento em diversas áreas científicas, nasceu o projeto cluster Beowulf no CESDIS (Center of Excellence in Space Data and Information Science) da NASA. Cabe salientar, que um Beowulf é mais uma “filosofia” a ser seguida na montagem de um cluster do que uma especificidade técnica, sendo que suas características mais importantes são:

- Independência de fornecedores de software e hardware;
- Nenhum de seus componentes deve ser feito sob encomenda;
- Periféricos de fácil atualização, simplificando o *upgrade*;
- Softwares de domínio público e de código aberto;
- Uso de ferramentas de uso livre e com poucas modificações;
- Retorno à comunidade das melhorias efetuadas nos códigos.

O cluster trabalha dividindo o sistema em um nó controlador (ou mestre), cuja função é a de gerenciar o cluster, monitorando e distribuindo as tarefas, atuando como um servidor de arquivos e executando o elo entre os usuários e o cluster. Já os demais nós são conhecidos como nós escravos,

e são exclusivamente dedicados para o processamento das tarefas enviadas pelo nó mestre, e não existe a necessidade de teclados e monitores, e eventualmente até sem a utilização de discos rígidos, e podem ser acessados remotamente.

Desta forma, para o desenvolvimento de um programa computacional para mecânica dos fluidos computacional e em paralelo, múltiplas etapas são envolvidas e, em cada uma delas, uma ou mais fontes de erros ou imprecisões são, em geral, introduzidas. De fato, no momento da elaboração do modelo, hipóteses simplificadoras são formuladas, a fim de que uma situação física complexa possa ser descrita matematicamente. Em seguida, novas simplificações são, quase sempre, necessárias, para permitir que as equações que integram o modelo sejam colocadas numa forma adequada à solução em computador. Por último, os resultados dos cálculos trazem consigo os erros de truncamento oriundos da forma discretizada das equações e aos erros de arredondamento decorrentes da representação finita dos números no computador. Por tudo isto, antes que os resultados de uma simulação possam ser empregados na análise física de problemas, é absolutamente imprescindível que o programa que lhes deu origem tenha sido submetido a um rigoroso processo de validação. O procedimento tipicamente adotado para cumprir este propósito consiste na realização de testes exaustivos, efetuados por intermédio da simulação de escoamentos com um certo grau de complexidade e para os quais se disponha de um bom volume de dados numéricos e/ou experimentais confiáveis, que possam servir como elementos de comparação – são os chamados casos-teste (*benchmarks*).

Para os elementos de comparação, pesa a simplicidade geométrica, e desta forma, as chamadas cavidades abertas, apresentam uma geometria muito simples, contudo o escoamento em seu interior reúne fenômenos bastante complicados, tornando o problema um excelente caso-teste para a validação de programas de simulação. No presente trabalho, os escoamentos dentro de cavidades com razão de aspecto 1:1 são investigados numericamente. Os resultados obtidos são analisados fisicamente e comparados com dados de outros autores, com o objetivo fundamental de testar algumas das implementações efetuadas no código computacional paralelo.

2. TRABALHOS PRECEDENTES

Embora a maioria dos artigos que abordam o problema da cavidade aberta sejam concentrados no estudo de escoamentos compressíveis, vários trabalhos envolvendo escoamentos incompressíveis também podem ser encontrados na literatura.

Visando otimizar os processos de absorção de calor no interior de um coletor solar, Zdanski *et al.*(2003) realizaram várias simulações de cavidades abertas com diferentes razões de aspecto, considerando o escoamento incompressível e bidimensional. Os cálculos foram efetuados para uma ampla faixa do número de Reynolds, tanto no regime laminar quanto turbulento. Neste segundo caso, as equações médias de Reynolds foram resolvidas, com o auxílio de um modelo da família $k-\epsilon$.

Trabalhos anteriores contribuíram significativamente para a compreensão do escoamento a números de Reynolds baixos e moderados dentro desta geometria. Sinha *et al.*(1982) investigaram experimentalmente o escoamento dentro de cavidades retangulares com razão de aspecto variando de 0,035 a 2,5 em escoamentos a números de Reynolds 662, 1342 e 2648. Este trabalho passou a ser referência para grande parte dos estudos posteriores.

Shen e Floryan (1985) analisaram numericamente as cavidades retangulares com razão de aspecto de 0,5 a 4,0, para Reynolds muito baixo, em torno de 0,01. Seus resultados foram confrontados com dados experimentais apresentando boa concordância.

Esteve *et al.*(1999) estudaram experimentalmente uma cavidade aberta com razão de aspecto igual a 10, percorrida por escoamentos com números de Reynolds igual $3,8 \cdot 10^4$ e $6,4 \cdot 10^4$. Os resultados obtidos com o auxílio de um anemômetro a Laser Doppler são comparados com o escoamento à jusante de um degrau descendente, considerado como uma cavidade de razão de aspecto tendendo a infinito. Neste trabalho, os autores observaram que, em cavidades rasas e com grande razão de aspecto, a parede vertical que delimita o fim da cavidade exerce pouca influência sobre o escoamento a montante.

No recente trabalho de Arruda (2004), resultados da simulação de cavidades abertas são apresentados, com o intuito de testar a aplicação do método da fronteira virtual em escoamentos internos forçados bidimensionais. A boa concordância com os resultados de Sinha *et al.*(1982) serviram para validar a metodologia.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA E PROCEDIMENTOS NUMÉRICOS

A solução completa de um escoamento isotérmico, incompressível consiste na obtenção dos campos de velocidade e pressão ao longo do espaço e do tempo. Para números de Mach inferiores a 15, este tipo de escoamento é muito bem representado pelo conjunto de equações que representam a conservação da massa para um sistema e o balanço de quantidade de movimento. Para um fluido de propriedades físicas constantes estas equações podem ser escritas na forma:

Conservação da massa:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

Equação do balanço de quantidade de movimento (Navier-Stokes):

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

onde ρ representa a densidade do fluido, ν viscosidade cinemática, u as componentes do vetor velocidade e P a pressão, com i e j variando de 1, 2 e 3.

Exceto para alguns casos particulares, onde grandes simplificações podem ser feitas, as fortes não linearidades que caracterizam os termos advectivos da equação de Navier-Stokes impossibilitam a solução analítica da grande maioria dos problemas envolvendo o movimento de fluidos. Para contornar este problema, torna-se necessária a utilização de métodos numéricos, a partir dos quais as equações governantes são discretizadas no tempo e no espaço, para fornecer uma solução aproximada do escoamento.

O método dos volumes finitos, utilizado neste trabalho, destaca-se como uma das técnicas de discretização mais empregados na simulação numérica de problemas de hidrodinâmica e transferência de calor. Para a discretização temporal, foi adotada uma formulação totalmente implícita, onde os valores das variáveis em todo o domínio estão no mesmo instante de cálculo e são desconhecidas, o que leva a resolução de um sistema linear para obter a distribuição das variáveis no domínio de cálculo.

A solução deste sistema foi realizada de forma iterativa, com o auxílio de diferentes algoritmos de resolução de sistemas lineares, o SIP para o sistema linear da correção da pressão e o SOR para o sistema linear das componentes do momento.

Para o tratamento dos termos advectivos e difusivos, optou-se por utilizar o esquema das diferenças centradas, que apresentou bons resultados em trabalhos anteriores.

Por fim, o método SIMPLEC foi utilizado para realizar o acoplamento pressão-velocidade e a metodologia de simulação de grandes escalas (LES), empregando o modelo clássico de Smagorinsky (1963), foi utilizado para a modelagem da turbulência. Para a paralelização do código, foi utilizada a biblioteca de paralelização MPI (*Message Passing Interface*) com a sua variação MPICH.

Os casos analisados no âmbito deste trabalho encontram-se discriminados na Tabela 1, com os parâmetros geométricos indicados na Figura 1. Todas as simulações foram efetuadas para número de Reynolds igual 2000, baseado na altura da cavidade (h) e na velocidade uniforme do escoamento no canal entrada (U_o). Em todas as faces da fronteira inferior, foram impostas condições de não deslizamento, na fronteira superior foi usada uma condição de simetria e, nas regiões de entrada e saída do domínio, foi imposto um fluxo de massa e de derivada nula para todas as componentes de velocidade, respectivamente.

Tabela 1: Definição dos domínios utilizados na simulação para as cavidades abertas

Caso	Re	b	b _e	b _s	H	Z	Malha
A	2000	1 h	2.5 h	2.5 h	2 h	1 h	120x10x60
B	2000	1 h	2.5 h	6.5 h	2 h	1 h	200x10x60
C	5000	2 h	2 h	2 h	2 h	1 h	200x10x75

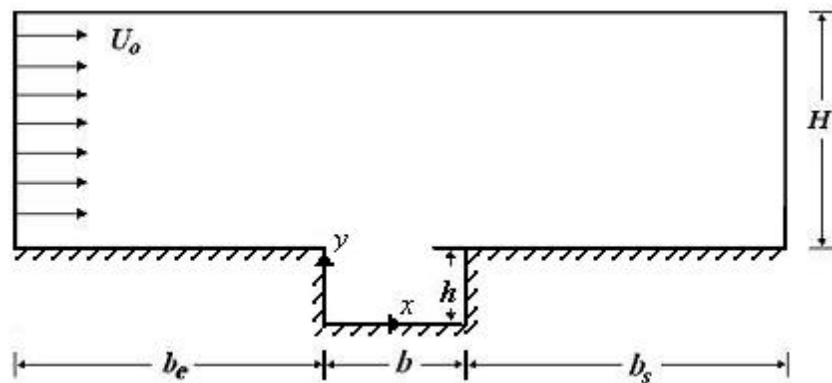


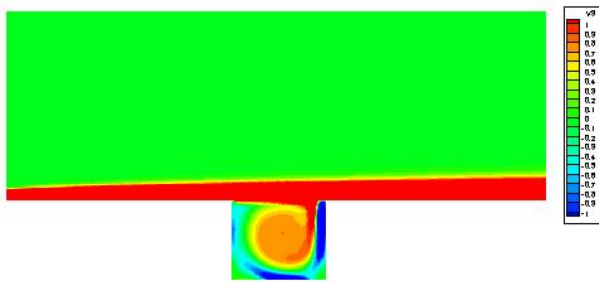
Figura 1: Definição de parâmetros geométricos e operacionais para o problema da cavidade aberta

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

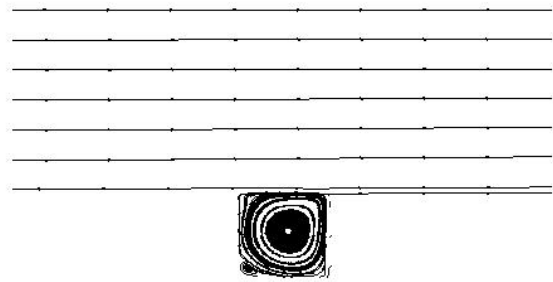
Através das Figuras (2) e (3), observa-se a formação de vórtices contra-rotativos no interior da cavidade, com estruturas semelhantes, não influenciando assim o comprimento de saída, importando sim, a geometria da cavidade.

Já no caso C, representado na Figura (4), observa-se a formação das estruturas de vórtices contra-rotativos ao longo do tempo, e após um determinado tempo, a degradação destas estruturas em turbulência, devido a tridimensionalização destas últimas.

Além disto, observou-se que houve um ganho considerável em relação ao tempo de resolução dos problemas ao se utilizar mais de um processador. Entretanto, dependendo da densidade da malha, o rendimento do código diminuía consideravelmente, o que é característico de situações onde o tempo de comunicação entre os subdomínios supera o tempo de cálculo em cada um deles.



(a) Distribuição de Vorticidade



(b) Linhas de corrente

Figura 2: Iso-vorticidade e linhas de corrente para o Caso A



(a) Distribuição de Vorticidade



(b) Linhas de corrente

Figura 3: Iso-vorticidade e linhas de corrente para o Caso B

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho, uma análise tridimensional de escoamento em uma cavidade aberta, com Reynolds de 2000 e de 5000, foi efetuada visando validar implementações do código computacional recentemente desenvolvido para a simular escoamentos turbulentos por intermédio da metodologia de simulação de grandes escalas. Os resultados numéricos foram confrontados com dados experimentais e numéricos reportados da literatura, apresentando uma concordância qualitativa satisfatória.

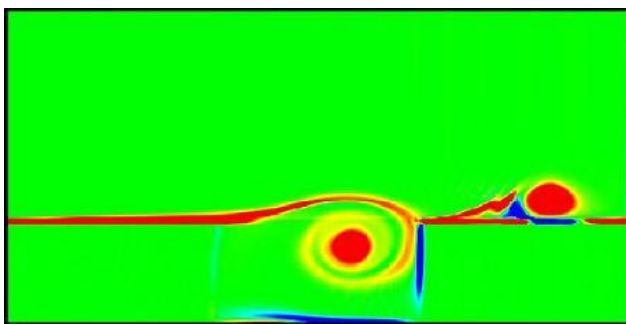
6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio encontrado na Universidade Federal de Uberlândia, aos órgãos de fomento à pesquisa, CAPES/CNPQ e FAPEMIG, e a todos que de alguma forma auxiliaram a realização deste trabalho.

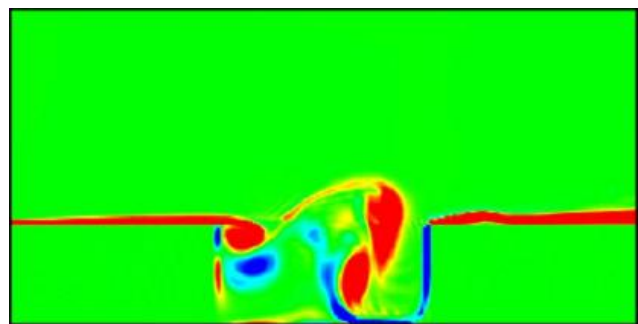
7. REFERÊNCIAS

- Arruda, J. M., 2004, "Modelagem Matemática de Escoamentos Internos Forçados Utilizando o Método da Fronteira Imersa e o Modelo Físico Virtual", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, 2004.
- Babu, V. and Korpela, S. A., 1994, "Numerical Solution of the Incompressible, Three-Dimensional Navier Stokes Equations", Computers Fluids, Vol. 23, No. 5, pp. 675-691, Elsevier Science Ltd., Great Britain.
- Esteve, M. J. P., Reulet, P., Millan, P., 2000, "Flow field characterisation within a rectangular cavity", 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisboa, Portugal.
- Frigo, L. M. and Mansur, S. S. and Campregheer, R. and Arruda, J. M. de and Neto, A. da S., 2004, "Análise Numérica de Escoamentos sobre Cavidades Abertas Bidimensionais", ENCIT 2004, ABCM, Rio de Janeiro, Brasil.

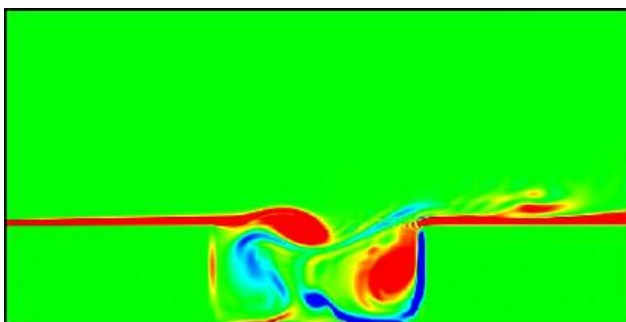
- Frigo, L. M. and Mansur, S. S. and Campregher, R. and Arruda, J. M. de and Neto, A. da S., 2004, "Simulação Numérica 2D e 3D de uma Cavidade com Tampa Deslizante, a Baixos Números de Reynolds", Anais do 3º Congresso Temático de Dinâmica e Controle da SBMAC, Ilha Solteira, Brasil.
- Shen, C., Floryan, J. M., 1985, "Low Reynolds number flow over cavities", Phys. Fluids, vol 28, pp 3191 - 3202.
- Sheu, T. W. H. and Tsai, S. F., 2002, "Flow Topology in a Steady Three-Dimensional Lid-Driven Cavity", Computers & Fluids, pp. 911-934.
- Sinha, S. N, Gupta, A. K., Oberai, M. M., 1982 " ar Separating flow over backsteps and cavities Part II: Cavities", AIAA Journal, vol 20, pp.370 - 375.
- Smagorinsky J., 1963, "General circulation experiments with the primitive equations I: The basic experiment", Mon. Weather Rev., vol.91, pp.99-164.
- Zdanski, P. S. B., Ortega, M. A., Fico Jr, N.G.C.R., 2003, " Numerical study of the flow over shallow cavities", Computers & Fluids, vol 32, pp. 953 - 974.



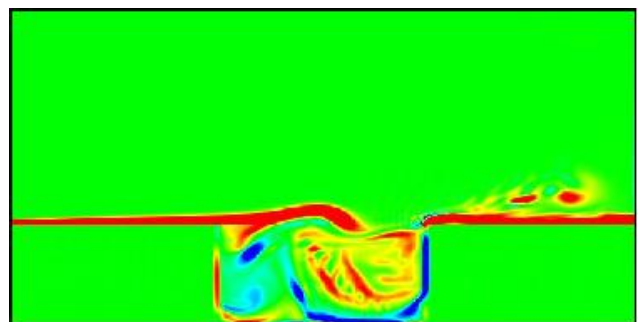
(a) Distribuição de Vorticidade no tempo de 5 s



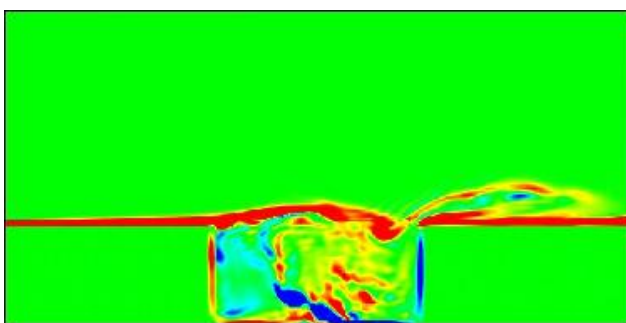
(b) Distribuição de Vorticidade no tempo de 10 s



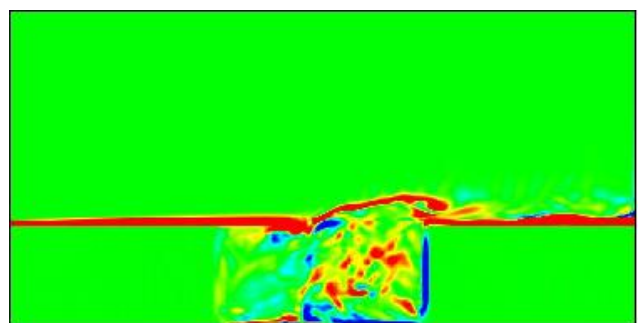
(c) Distribuição de Vorticidade no tempo de 20 s



(d) Distribuição de Vorticidade no tempo de 37 s



(e) Distribuição de Vorticidade no tempo de 40 s



(f) Distribuição de Vorticidade no tempo de 51 s

Figura 4: Valores de iso-vorticidade para o Caso C

NUMERICAL SIMULATION OF THE THREE DIMENSIONAL OPEN CAVITY FLOW IN A BEOWULF CLUSTER

Matheus Guilherme Reimann Herckert

matheusreimann@yahoo.com.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 proposal of this work is to simulate the three-dimensional isothermal transient flow inside an open cavity having an aspect ratio of 1:1 and 1:2. The open cavity case has been chosen as a validation test because it is very popular in literature and, despite its geometric simplicity, the flow has very complex structures. The tests have been run on a Fortran90 numerical code, using the MPI parallel library, and developed at the Heat & Mass Transfer and CFD Laboratory (LTCM) of the School of Mechanical Engineering (FEMEC). The continuity and Navier-Stokes equations have been discretized by the implicit Finite Volume Method (FVM) in a co-located arrangement. Furthermore, it has been used a second order approximation for the space and time derivatives, the SIMPLEC algorithm for pressure-velocity coupling, and the Central Difference Scheme (CDS) for the advective term. The simulations have been run on a Beowulf-class cluster having ten Pentium IV 2.8 GHz, 1.5 GBytes DDR RAM connected by a Gigabit network. It was used both uniform and non-uniform cartesian meshes and the results have been analyzed in a physical basis and, in a future work, would be compared against the literature.*

Keywords: *Open cavity, Three-dimensional flow, Parallel processing*