

ANÁLISE NUMÉRICA DE ESCOAMENTOS SOBRE CAVIDADES ABERTAS BIDIMENSIONAIS

Luciene Muniz Frigo

Sérgio Said Mansur

UNESP Ilha Solteira

Departamento de Engenharia Mecânica - DEM

15385-000, Ilha Solteira, SP

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

Rubens Campregher

Juliano Marcelo de Arruda

Aristeu da Silveira Neto

Universidade Federal de Uberlândia - UFU

Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC

38400-902, Uberlândia, MG

campregher@mecanica.ufu.br, jm_arruda@yahoo.com.br, aristeus@mecanica.ufu.br

Resumo. Este trabalho apresenta um estudo numérico do escoamento transiente, incompressível e bidimensional no interior de cavidades abertas com razão de aspecto 1:1 e 1:2. As equações da continuidade e de Navier-Stokes foram discretizadas espacialmente pelo método dos volumes finitos, enquanto uma formulação totalmente implícita de primeira ordem foi adotada na discretização temporal. Para o acoplamento pressão-velocidade, empregou-se o algoritmo SIMPLEC, como esquema de diferenças centrais para o tratamento dos termos advectivos. As simulações foram efetuadas para número de Reynolds igual a 2648, utilizando-se malha cartesiana não uniforme. Os resultados numéricos são analisados fisicamente e confrontados com dados da literatura, com o propósito de validar recentes implementações efetuadas no programa de simulação Fluids 2D, desenvolvido por Campregher (2002).

Palavras chaves: cavidade aberta, simulação numérica, volumes finitos, escoamento transiente

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.

O desenvolvimento de um programa desta natureza envolve múltiplas etapas 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 simplificativas 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*).

Em que pese a simplicidade geométrica das chamadas cavidades abertas, o escoamento em seu interior reúne fenômenos bastante complicados, tomando 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 e 1:2 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 Fluids 2D, desenvolvido por Campregher (2002), inicialmente concebido para simular escoamentos turbulentos incompressíveis em torno de corpos cilíndricos.

2. Trabalhos Precedentes

Embora a maioria dos artigos que abordam o problema da cavidade aberta concentre-se 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 a 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. Equações governantes e procedimentos numéricos.

De maneira geral, qualquer escoamento isotérmico pode ser matematicamente bem representado pelas equações de conservação da massa e de Navier-Stokes, desde que o número de Mach seja inferior a 15. 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 impossibilita 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 diferenças centrais, por apresentar, segundo a literatura, bons resultados na solução deste tipo de problema. 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.

Os casos analisados no âmbito deste trabalho encontram-se discriminados na Tab.(1), com os parâmetros geométricos indicados na Fig.(1). Todas as simulações foram efetuadas para número de Reynolds igual 2648, baseado na altura da cavidade (h) e na velocidade uniforme do escoamento no canal entrada (U_o). Malhas não uniformes foram empregadas, com maior refinamento na região da cavidade. Em todas as faces da fronteira inferior, foram impostas condições de não deslizamento, com condição de simetria na fronteira superior e condição de Neuman na saída do domínio de cálculo.

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

Caso	b	b_e	b_s	H	Malha
A	$1 h$	$3 h$	$6 h$	$2 h$	220x95
B	$1 h$	$3 h$	$6 h$	$5 h$	220x160
C	$1 h$	$4 h$	$6 h$	$5 h$	250x160
D	$2 h$	$3 h$	$5 h$	$5 h$	270x160

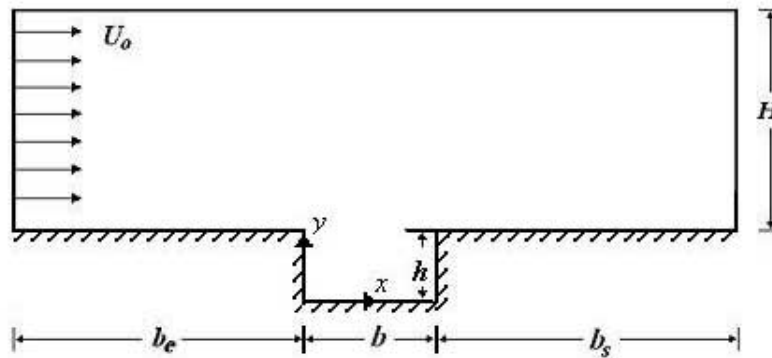


Figura 1. Definição de parâmetros geométricos e operacionais para o problema da cavidade aberta.

4. Resultados e discussão

Alguns perfis de velocidade para a cavidade aberta com razão de aspecto (b/h) igual a 1 (caso A), são apresentados na Fig.(2). Estes resultados são confrontados com os dados numéricos de Arruda (2004) e com os dados experimentais de Sinha *et al.*(1982). A concordância entre resultados numéricos e experimentais é notável, sobretudo quando se considera que, tanto na investigação de Arruda (2004), quanto no presente trabalho, as simulações foram realizadas sem a imposição de turbulência residual. Além disso, deve-se observar que os dados experimentais de Sinha *et al.*(1982) foram obtidos com o auxílio de uma sonda anemométrica de fio quente, via de regra, incapaz de capturar dados confiáveis nas proximidades das paredes, justamente onde as principais divergências são observadas.

A Figura (3) apresenta, utilizando linha corrente, a evolução transiente do escoamento na cavidade quadrada aberta do caso A, onde o tempo adimensional é dado por: $t^* = t U_o/h$. Nos primeiros instantes existe uma forte interação entre o escoamento recirculante interno e o escoamento no canal acima da cavidade, observa-se que recirculações aparecem e se emparelham formando recirculações maiores. No entanto a presença e o comportamento de uma recirculação da mesma ordem da altura da cavidade (h) é notável. Esta recirculação aparece na região intermediária da cavidade e o canal, aos poucos se adentra aproximando o seu centro ao centro geométrico da cavidade até atingir o regime permanente, onde se mantém estacionária, acompanhada de duas recirculações secundárias nos ângulos inferiores da geometria. O ângulo superior esquerdo apresenta sinais de uma provável recirculação tal como ocorre no caso da cavidade induzida com tampa deslizante (*lid driven*), para número de Reynolds superiores a 2000, que não pôde ser devidamente capturada. O regime permanente é atingido por volta de $t^* = 99,0$, a partir de então o escoamento recirculante interno não é influenciado de forma significativa pelo escoamento externo a cavidade, se comportando aparentemente de forma bastante semelhante ao escoamento da cavidade induzida.

Segundo Zdanski *et al.*(2003), para evitar que a condição da fronteira superior venha a influenciar significativamente nos cálculos, a altura do canal (H) deve ser, no mínimo, de $5h$. Diante disso, uma simulação com esta configuração foi realizada (caso B). No entanto, para a cavidade quadrada com escoamento a número de Reynolds 2648, os resultados não sofreram grandes alterações e maior dispersão em relação aos dados obtidos no caso A foi de apenas 5%, na região da corrente livre, fora da cavidade.

No caso C, o comprimento de entrada do canal foi aumentado de $1 h$, e os resultados também não apresentaram alterações consideráveis.

Perfis de velocidade para a cavidade aberta de razão de aspecto igual a 2 (caso D), são apresentados na Fig. (4). Os resultados são confrontados com os resultados de Arruda (2004) e apresentam concordâncias plausíveis.

A seqüência da evolução transiente, através das linhas de corrente, deste caso está apresentada na Fig. (5). Para esta razão de aspecto a interação entre o escoamento recirculante interno e o escoamento no canal acima da cavidade se torna mais intensa e está presente de forma significativa em toda evolução temporal. Assim como ocorre para a cavidade quadrada uma maior recirculação se origina no alto da cavidade, no entanto a medida que se adentra, novas recirculações aparecem e inicia-se um processo de emparelhamento e absorção de vórtices e surgem duas recirculações contrarrotativas de ordem h .

Na Figura (5), a partir de $t^* = 28,8$, quatro recirculações contrarrotativas aparecem no fundo da cavidade, estas recirculações, são absorvidas pelas maiores estruturas e em seguida outras de mesma ordem e na mesma posição tomam a aparecer, até desaparecerem por completo, por volta de $t^* = 108,0$. A partir de então cinco estruturas se fazem presentes – duas recirculações maiores no centro da cavidade, duas recirculações nos cantos da fronteira inferior e uma recirculação no alto da cavidade, no lado esquerdo, que mantém interação direta com o escoamento do canal acima – se mantém num processo cíclico como pode ser observado na seqüência $t^* = 180,0$ a $t^* = 185,4$.

5. Conclusão

No presente trabalho, uma análise bidimensional de escoamentos sobre cavidade aberta de razão de aspecto 1 e 2, para Reynolds 2648, foi efetuada, com o objetivo principal de validar as implementações do código computacional recentemente desenvolvido para a simular escoamentos turbulentos, por intermédio da metodologia de simulação de grandes escalas. A evolução transiente foi analisada, e em ambos os casos puderam ser observada a influência das interações entre o escoamento recirculante interno a cavidade e o escoamento acima da mesma. Os resultados numéricos foram confrontados com dados experimentais e numéricos reportados da literatura, apresentando uma concordância satisfatória.

6. 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.

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.
- 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.
- 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.
- Shen, C., Floryan, J. M., 1985, “Low Reynolds number flow over cavities”, *Phys. Fluids*, vol 28, pp 3191 - 3202.
- Sinha, S. N, Gupta, A. K., Oberai, M. M., 1982 “ 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.

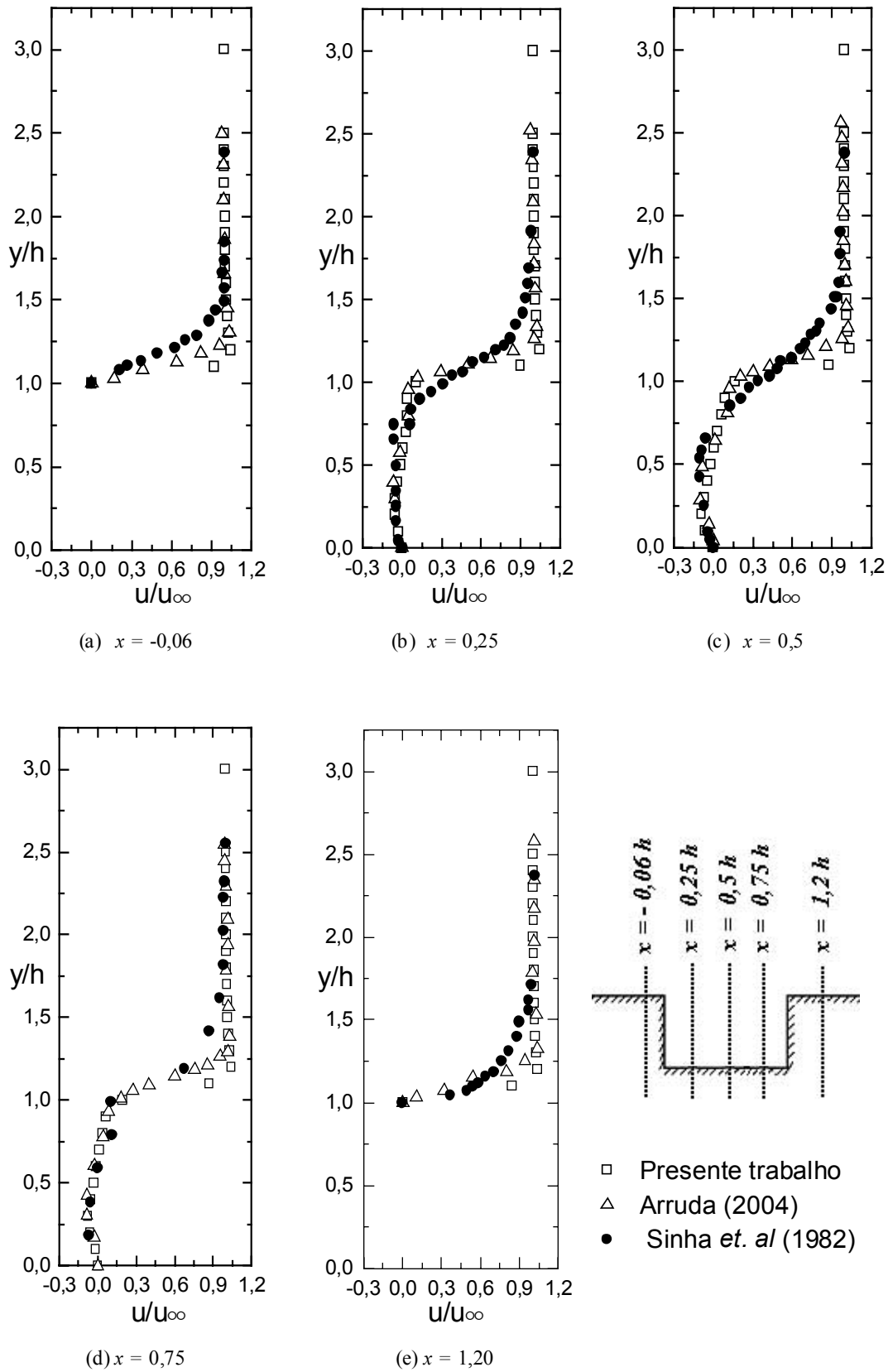


Figura 2 : Perfis de velocidade u , $b/h = 1$ e $Re = 2648$

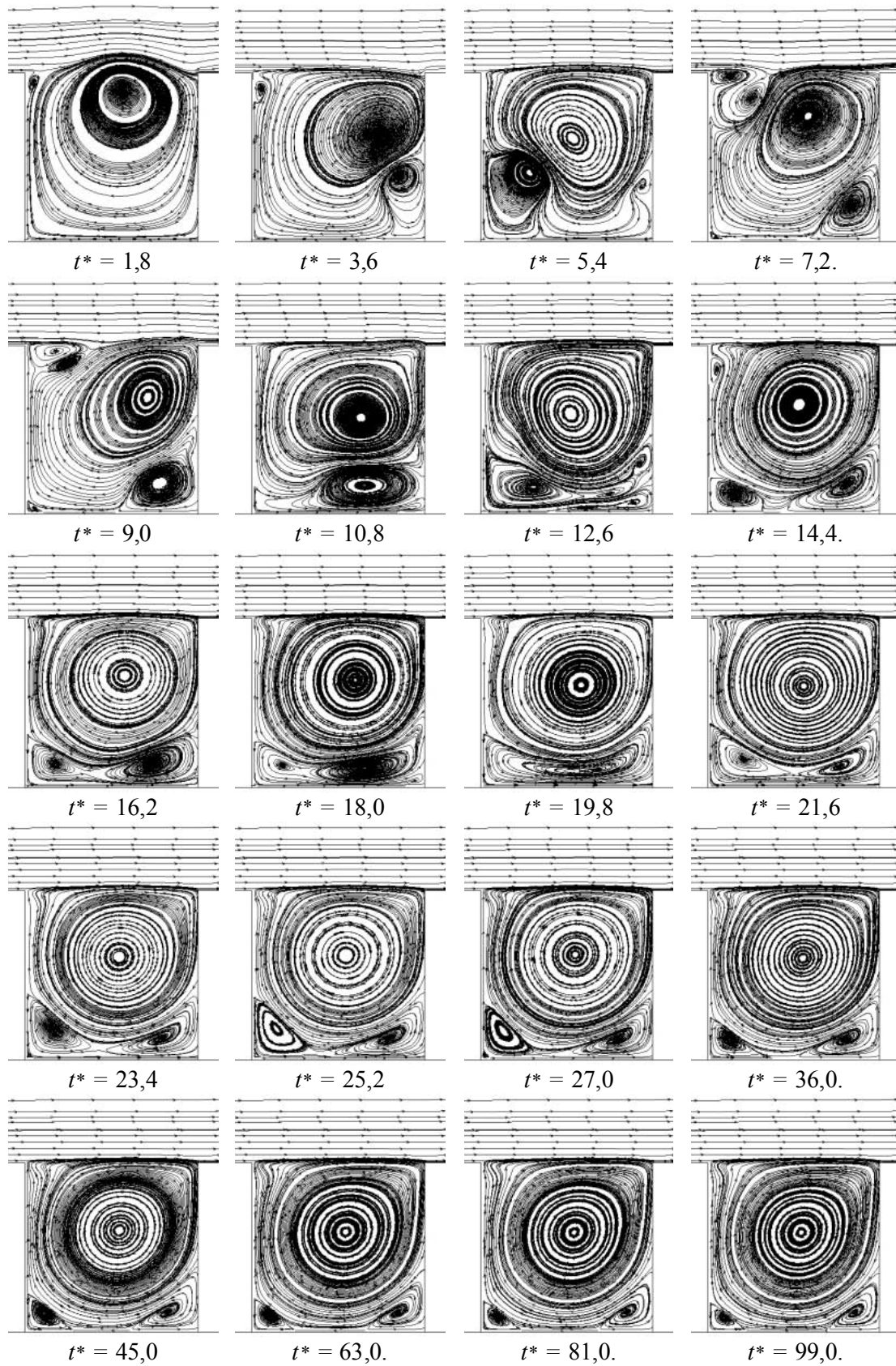


Figura 3 : Linhas de corrente em evolução temporal, $b/h = 1$ e $Re = 2648$

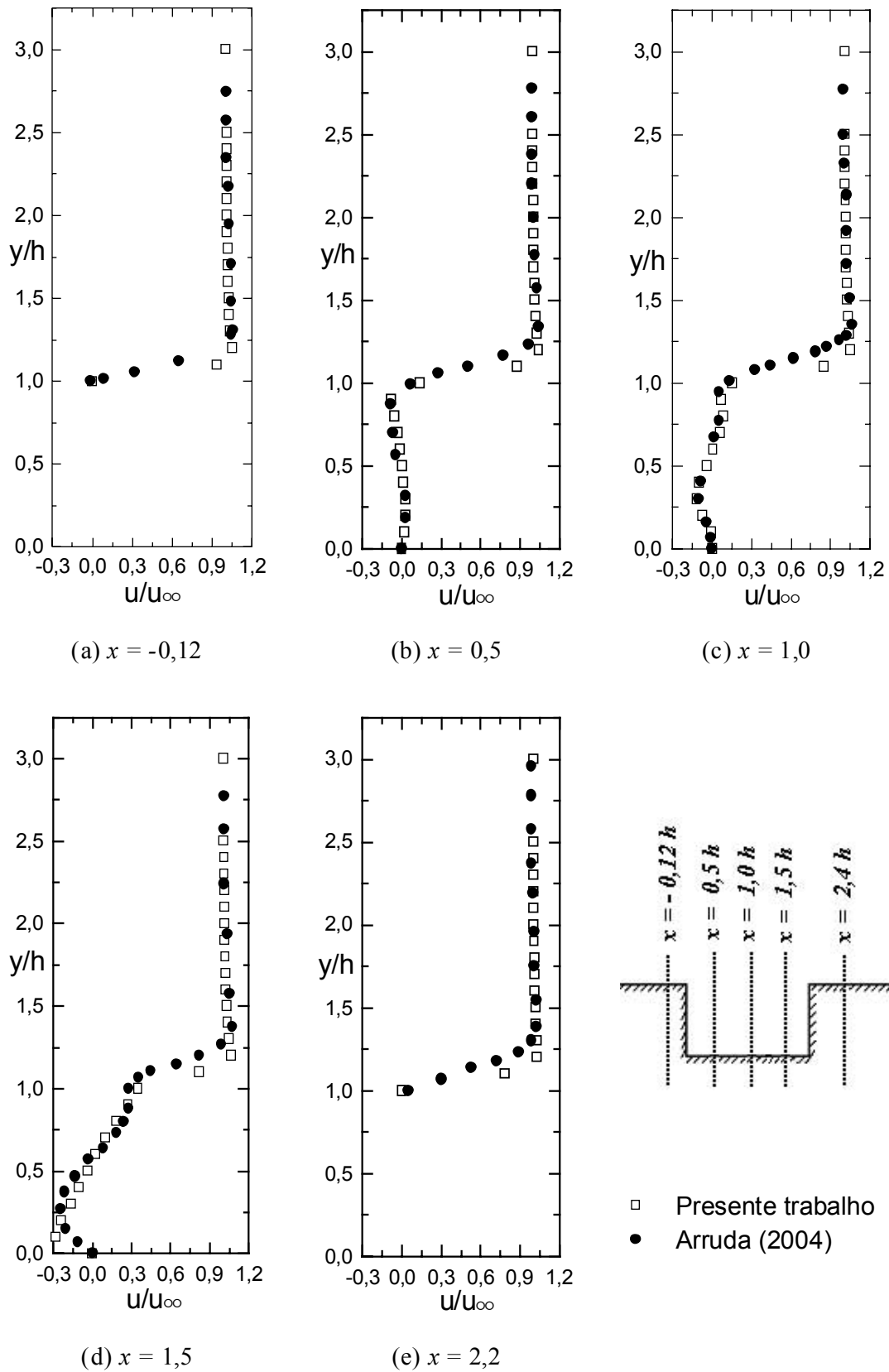


Figura 4 : Perfis de velocidade u , $b/h = 2$ e $Re = 2648$

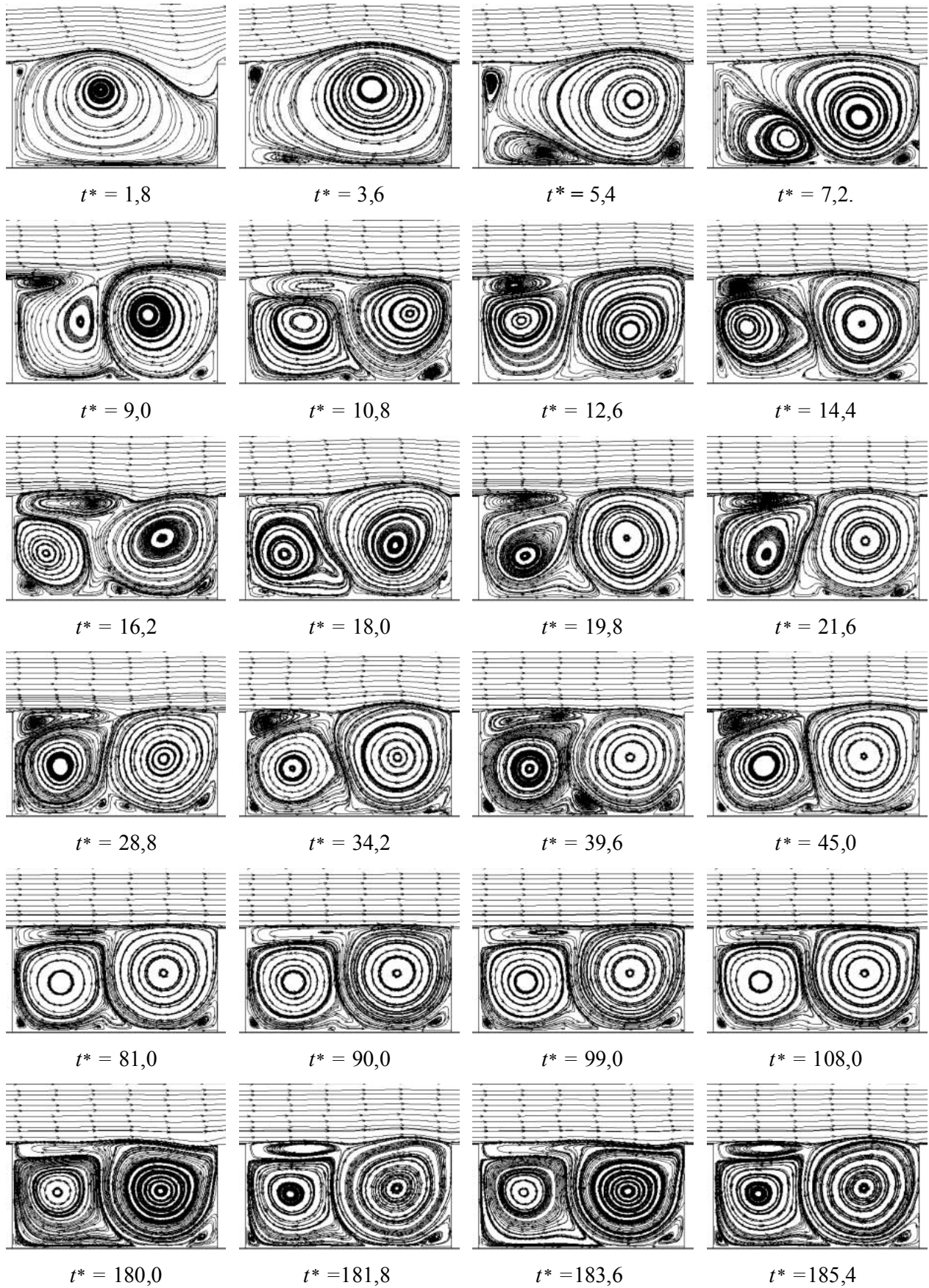


Figura 5 : Linhas de corrente em evolução temporal, $b/h = 2$ e $Re = 2648$

NUMERICAL ANALYSIS OF THE FLOW OVER OPEN CAVITIES

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

Juliano Marcelo de Arruda

Aristeu da Silveira Neto

Mechanical Engineering Faculty
Federal University of Uberlândia - UFU
38400-902, Uberlândia, MG
campregher@mecanica.ufu.br, jm_arruda@yahoo.com.br, aristeus@mecanica.ufu.br

Abstract

This work presents a numerical study of the flow over open cavities of aspect ratio 1:1 and 1:2 at Reynolds number of 2648. Unsteady two-dimensional simulations have been carried out by means of an incompressible finite-volume code employing cartesian staggered grids. A difference central 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: open cavity, numerical simulation, finite volume, unsteady flow