

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ESCOAMENTOS SOBRE CAVIDADES ABERTAS RASAS UTILIZANDO O MÉTODO DA FRONTEIRA IMERSA

Juliano Marcelo de Arruda

Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Mecânica
Campus Santa Mônica, 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil
jmarruda@mecanica.ufu.br

Ana Lúcia Fernandes de Lima e Silva

Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Mecânica
Campus Santa Mônica, 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil
alfsilva@mecanica.ufu.br

Alexandre Megjorin Roma

Instituto de Matemática e Estatística
Universidade de São Paulo
Cidade Universitária, 05315-970, São Paulo, Brasil
roma@ime.usp.br

Aristeu da Silveira Neto

aristeus@mecanica.ufu.br
Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Mecânica
Campus Santa Mônica, 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil

Resumo. A simulação numérica de escoamentos sobre uma cavidade aberta rasa é realizada utilizando-se o Método da Fronteira Imersa (MFI). O MFI com o Modelo Físico Virtual (MFV) vem sendo utilizado na simulação de escoamentos com a presença de cilindros. No presente trabalho esta metodologia é utilizada para simular escoamentos sobre cavidades abertas rasas. As paredes das cavidades são modeladas por um campo de força calculado pelo MFV, o qual utiliza as próprias equações de Navier-Stokes resolvidas nos pontos da interface imersa (Malha Lagrangiana). Os resultados são comparados favoravelmente com outros autores.

Palavras-chave: fronteira imersa, modelo físico virtual, cavidade aberta rasa.

1. Introdução

O Método da Fronteira Imersa foi desenvolvido com o objetivo de estudar o escoamento sanguíneo no interior do coração humano, possibilitando, assim, a otimização de projetos de válvulas artificiais (Peskin, 1972, 1977). Os bons resultados obtidos com este método estimularam a sua utilização no estudo de outros problemas de Dinâmica dos Fluidos, tais como a modelagem de processos de biofilme (Dilon *et al.*, 1996), o nado de um microorganismo em suspensão em um fluido (Fauci e Peskin, 1998), a modelagem de escoamentos bifásicos (Unverdi e Tryggvason, 1992), a modelagem de escoamentos sobre cilindros (Goldstein *et al.*, 1993; Saiki e Biringen, 1996; Lima e Silva *et al.*, 2003), entre outros.

A idéia básica deste método é resolver, numericamente, escoamentos delimitados por um domínio de cálculo euleriano, enquanto os corpos/paredes presentes no escoamento são representados por uma malha Lagrangiana. A força exercida pelos corpos, denominada força interfacial, calculada nos pontos da malha Lagrangiana, é distribuída para a malha euleriana por meio de uma função distribuição que tem a forma de uma Gaussiana. O modo de obtenção desta força interfacial tem sido motivo de intensas pesquisas, com a proposição de diferentes modelos. Unverdi e Tryggvason (1992) propuseram o Método de Captura de Interfaces, no qual os parâmetros geométricos da interface, curvatura e normal, e a tensão interfacial são utilizados para a obtenção da força interfacial. Goldstein *et al.* (1993), propuseram a Formulação de Fronteira Virtual, onde o termo de força é obtido por meio da somatória das forças inerciais sobre um corpo de massa desprezível. Lima e Silva *et al.* (2003) desenvolveram o Modelo Físico Virtual, em que a força interfacial é obtida resolvendo-se as equações de Navier-Stokes sobre cada ponto da malha Lagrangiana. Este modelo vem fornecendo bons resultados para os casos de escoamento sobre cilindros isolados, cilindros dispostos em *tandem*, cilindros dispostos em paralelo, escoamentos sobre aerofólios e geometrias diversas. Arruda *et al.*, 2003 utilizaram o MFV para a modelagem de escoamentos no interior de canais e em cavidades com tampa deslizante.

O presente trabalho utiliza o Modelo Físico Virtual para modelar as paredes de duas cavidades abertas rasas, sendo uma delas quadrada e a outra retangular, visando, assim, o estudo do comportamento deste modelo para os casos de

escoamentos internos forçados. Os resultados obtidos são comparados com os resultados experimentais de Sinha *et al.* (1982).

2. Modelo Matemático

2.1. Método da Fronteira Imersa

O Método da Fronteira Imersa tem como idéia principal a utilização de duas malhas, sendo uma malha euleriana (\vec{x}) representando o domínio de cálculo e uma malha lagrangiana (\vec{X}_k), que representa a interface imersa, como pode ser observado na Fig. (1). As malhas são geometricamente independentes e existe uma troca de informações para que se obtenha um campo de força sobre a interface. Este mecanismo será detalhado a seguir.

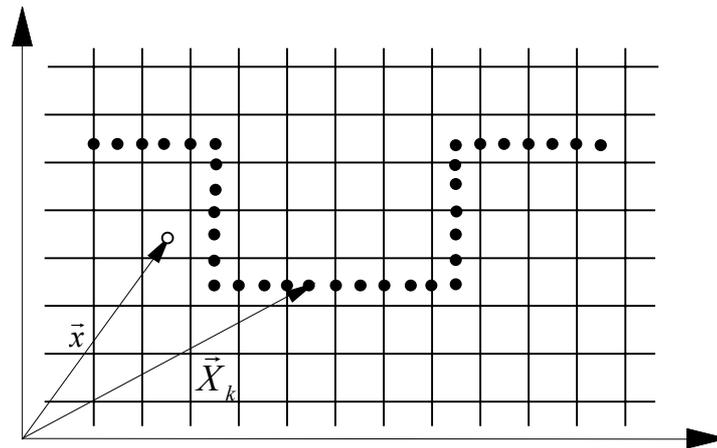


Figura 1. Representação das malhas euleriana e lagrangiana.

Assim, para modelar o escoamento sobre a cavidade aberta rasa, considera-se um fluido Newtoniano, incompressível e isotérmico, sendo as equações de conservação de massa e de Navier-Stokes, escritas como:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \cdot \vec{V} \right] = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \left[\mu (\vec{\nabla} \cdot \vec{V} + \vec{\nabla}^T \cdot \vec{V}) \right] + \vec{f}. \quad (2)$$

O termo de força Euleriana, \vec{f} , adicionado às equações do movimento é responsável por modelar a presença da interface imersa no escoamento, ou seja as paredes da cavidade.

Uma vez que o escoamento pode ocorrer em um regime de transição à turbulência, ou mesmo no regime turbulento, utiliza-se a metodologia de Simulação de Grandes Escalas (SGE) com o Modelo Sub-malha de Smagorinsky (Silveira Neto, 1991) para as simulações deste problema. Desta forma, as Eqs. (1) e (2) são rescritas como

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\bar{V}} = 0, \quad (3)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{\bar{V}}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{\bar{V}} \vec{\bar{V}}) \right] = -\vec{\nabla} \bar{p} + \vec{\nabla} \cdot \left[\mu_{ef} \left(\vec{\nabla} \vec{\bar{V}} + \vec{\nabla}^T \vec{\bar{V}} \right) \right] + \vec{\bar{f}}, \quad (4)$$

onde o símbolo $\bar{\quad}$ indica a variável filtrada e μ_{ef} é a viscosidade dinâmica efetiva que é dada por:

$$\mu_{ef} = \mu + \mu_t, \quad (5)$$

sendo, μ a viscosidade dinâmica molecular e μ_t a viscosidade turbulenta dada por

$$\mu_t = (c_s l)^2 (\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{1/2}. \quad (6)$$

c_s é a constante de Smagorinsky, determinada empiricamente, l o comprimento característico sub-malha de Smagorinsky e \bar{S}_{ij} , o tensor taxa de deformação.

O termo fonte de força, \vec{f} , é obtido por meio da densidade de força lagrangiana, \vec{F}_k , e de uma função Delta de Dirac, e é dado por

$$\vec{f}(\vec{x}) = \int_{\Omega} \vec{F}(\vec{x}_k) \delta(\vec{x} - \vec{x}_k) d\vec{x}_k. \quad (7)$$

Como não é possível a discretização da função Delta de Dirac, ela deve ser aproximada por uma função de distribuição D_{ij} tal que

$$\vec{f}_{ij} = \sum D_{ij} (\vec{x} - \vec{x}_k) \vec{F}_k(\vec{x}_k) \Delta s^2(\vec{x}_k), \quad (8)$$

onde $\Delta s(\vec{x}_k)$ é a distância entre os pontos lagrangianos, como pode ser visto na Fig. (2). O índice k é relativo aos pontos lagrangianos e os índices i e j são relativos aos pontos eulerianos. O processo de distribuição está ilustrado na Fig. (2).

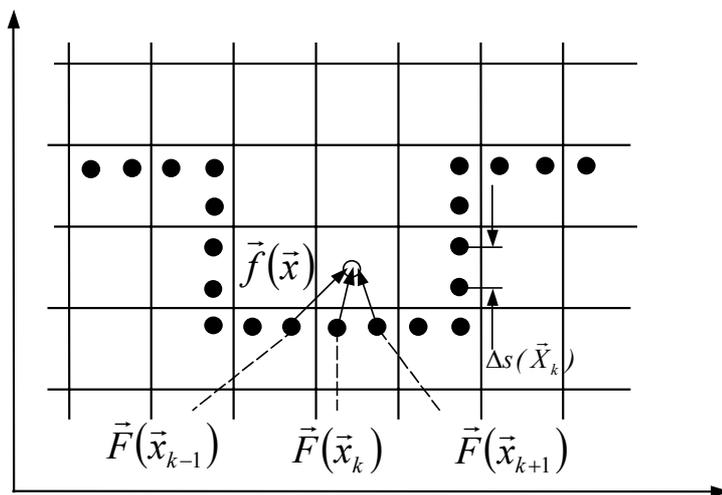


Figura 2. Método da Fronteira Imersa – Distribuição do campo de forças lagrangiano para a malha euleriana.

A função distribuição pode ser obtida por diferentes formas. Neste trabalho, optou-se pela proposta de Juric (1996), na qual a função de distribuição, que tem propriedades de uma função Gaussiana, é definida por

$$D_{ij}(\vec{x}_k) = \frac{f[(\vec{x}_k - \vec{x}_i)/h] f[(\vec{y}_k - \vec{y}_j)/h]}{h^2}, \quad (9)$$

sendo

$$f(r) = \begin{cases} f_1(r) & \text{se } \|r\| < 1 \\ \frac{1}{2} - f_1(2 - \|r\|) & \text{se } 1 \leq \|r\| \leq 2 \\ 0 & \text{se } \|r\| > 2 \end{cases}, \quad (10)$$

com

$$f_1(r) = \frac{3 - 2\|r\| + \sqrt{1 + 4\|r\| - 4\|r\|^2}}{8}, \quad (11)$$

onde r pode ser tomado como $(x_k - x_i)/h$, se a avaliação estiver sendo na direção x , ou ainda como $(y_k - y_i)/h$, se a avaliação for na direção y , sendo h o tamanho da malha euleriana.

2.2. Modelo Físico Virtual

A densidade de força lagrangiana, \vec{F}_k , é calculada pela aplicação das equações de Navier-Stokes sobre os pontos lagrangianos, sendo, definida por

$$\vec{F}(\vec{x}_k) = \vec{F}_a(\vec{x}_k) + \vec{F}_i(\vec{x}_k) + \vec{F}_v(\vec{x}_k) + \vec{F}_p(\vec{x}_k), \quad (12)$$

na qual,

$$\vec{F}_a(\vec{x}_k) = \rho \frac{\partial \vec{V}(\vec{x}_k)}{\partial t}, \quad (13)$$

$$\vec{F}_i(\vec{x}_k) = \rho (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V}(\vec{x}_k), \quad (14)$$

$$\vec{F}_v(\vec{x}_k) = -\mu \nabla^2 \vec{V}(\vec{x}_k), \quad (15)$$

$$\vec{F}_p(\vec{x}_k) = -\nabla p(\vec{x}_k), \quad (16)$$

são respectivamente os termos de força de aceleração, força inercial, força viscosa e de pressão. Estes termos são avaliados sobre a interface, usando os campos de velocidade e pressão calculados na malha euleriana. Observa-se que, sobre a interface, a velocidade do fluido, $\vec{V}_{\beta k}(\vec{x})$, e da interface, $\vec{V}_k(\vec{x}_k)$, devem ser iguais, satisfazendo, assim, a condição de não deslizamento. Uma vez obtidos os campos de pressão e de velocidade das equações (3) e (4), os seus valores são interpolados para quatro pontos auxiliares ao ponto da malha lagrangiana. A posição destes pontos auxiliares pode ser vista na Fig. (3), onde mostra-se dois pontos lagrangianos quaisquer, k_1 e k_2 .

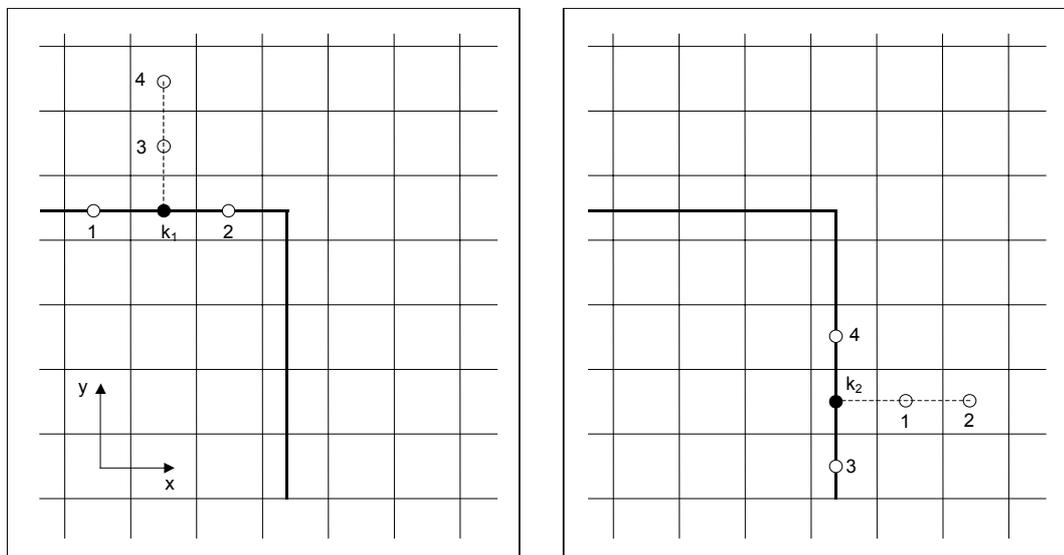


Figura 3. Modelo Físico Virtual – Ilustração da posição dos pontos auxiliares 1, 2, 3 e 4 para o processo de interpolação das variáveis e cálculo das derivadas espaciais e temporais.

No processo de interpolação, Fig. (4), as velocidades e pressões do campo euleriano são interpolados para os pontos 1, 2, 3, 4 e k . Os pontos auxiliares são posicionados na região do escoamento de interesse, ou seja no interior da cavidade. A Figura (4) ilustra o processo de interpolação da componente horizontal da velocidade para o ponto auxiliar 3. As malhas eulerianas localizadas na área sombreada não contribuem no processo de interpolação por não estarem na região de interesse. Esta seleção das malhas que contribuirão para a interpolação é feita utilizando-se uma função Indicadora, proposta por Unverdi e Tryggvason (1992), a qual permite identificar, no escoamento, diferentes regiões.

Maiores detalhes do processo de interpolação e do Modelo Físico Virtual são encontrados em Lima e Silva *et al.* (2003) e Arruda (2004).

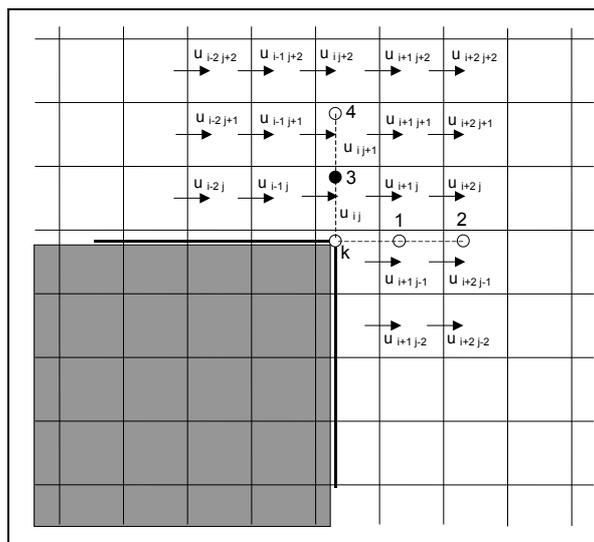


Figura 4. Modelo Físico Virtual – Esquema de interpolação da velocidade na direção horizontal para o ponto 3.

3. Método Numérico

As equações governantes foram discretizadas pelo Método das Diferenças Finitas, utilizando, para isto, o esquema de diferenças centradas de segunda ordem para o espaço e o esquema de discretização de Runge-Kutta de segunda ordem para o tempo.

O acoplamento pressão-velocidade (P - V) é realizado pelo Método não iterativo dos Passos Fracionados através do cálculo de uma correção de pressão (Armfield e Street, 1999).

O sistema linear da correção de pressão foi resolvido pelo *Modified Strongly Implicit Procedure – MSI* (Schneider e Zedan, 1981).

4. Resultados

O escoamento em uma cavidade aberta rasa apresenta interessantes características, tais como a formação de vórtices em diferentes posições e de diferentes tamanhos. Estas características a tornam um caso clássico para a validação de modelos matemáticos e de métodos numéricos.

Para as simulações do presente trabalho foi utilizado o domínio representado na Fig. (5) onde L e H são, respectivamente, as dimensões na direção horizontal e vertical, h é a altura da cavidade, b o comprimento da cavidade, b_e e b_s são os comprimentos de entrada e de saída a montante e a jusante da cavidade e U_0 a velocidade do escoamento na entrada do canal. Neste figura também é representada a região de interesse acima da fronteira virtual, na qual o escoamento será analisado.

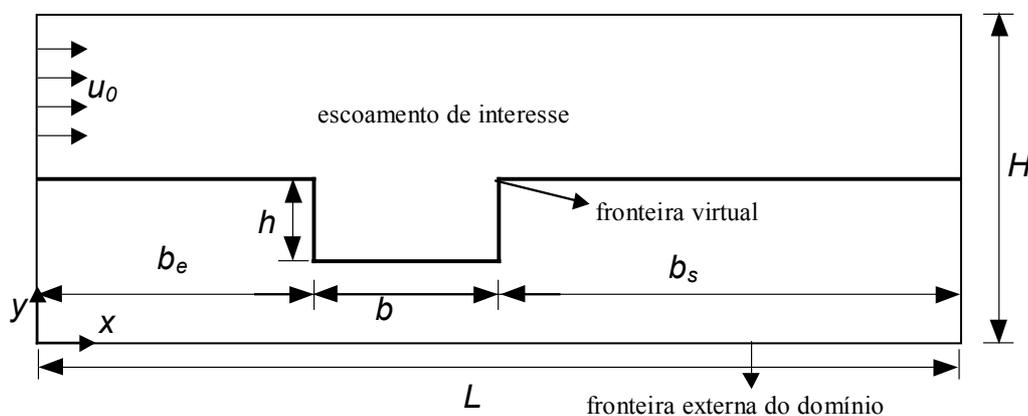


Figura 5. Cavidade aberta rasa – modelo físico.

Foram simulados dois casos diferentes, sendo o primeiro com uma cavidade retangular a um número de Reynolds de 1.324 e o segundo com uma cavidade quadrada para Reynolds igual a 2.648. As condições das simulações para cada caso são apresentadas na Tab. 1. A malha euleriana tem 250x100 pontos, e a lagrangiana 1201 pontos.

Tabela 1. Cavidade aberta rasa – Condições das simulações para cada caso.

Re	h [m]	b [m]	b_e [m]	b_s [m]	u_0 [m/s]	L [m]	H [m]
1.324	0,025	$2h$	$3h$	$5h$	0,9	$10h$	$4h$
2.648	0,025	$1h$	$3h$	$6h$	1,8	$10h$	$4h$

A Figura (6) apresenta os campos de pressão para os dois casos. Embora não tenham sido encontrados resultados semelhantes na literatura para comparação, pode-se fazer uma analogia entre a cavidade com razão de aspecto $b/h = 1,0$ e a cavidade com tampa deslizante.

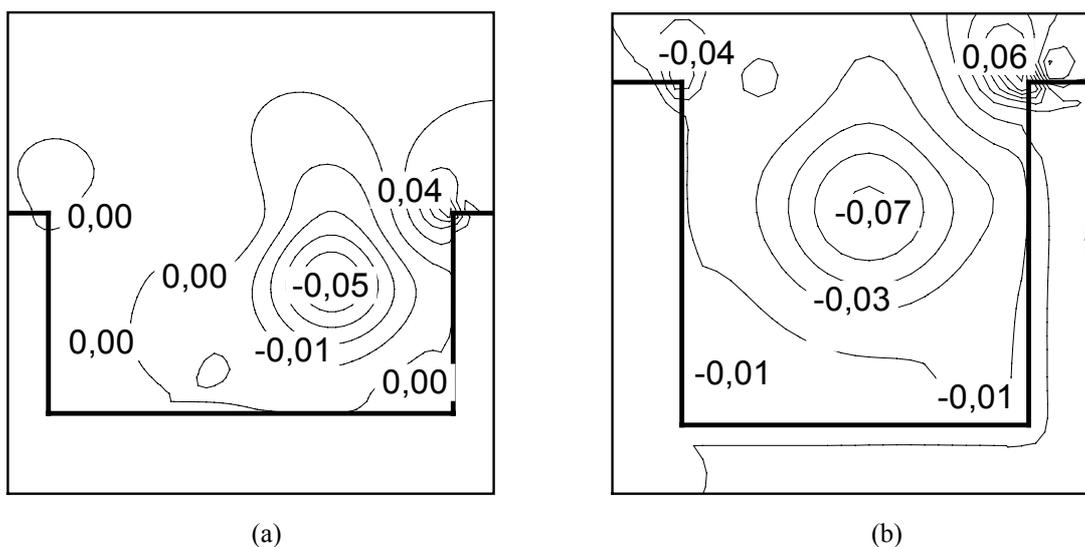


Figura 6. Isolinhas de pressão: (a) $Re = 1.324$, $b/h = 2,0$ e (b) $Re = 2.648$, $b/h = 1,0$.

A Figura (6.a) apresenta um núcleo de baixa pressão, circundado por áreas de pressão crescente. Este núcleo está deslocado do centro da cavidade para a região mais à direita da mesma. Na região à esquerda, encontra-se outra área de baixa pressão, de menor tamanho. A Figura (6.b) também apresenta um núcleo de baixa pressão circundado por áreas de maior pressão, ocorrendo ainda, nos cantos superiores da cavidade, regiões de alta e baixa pressão.

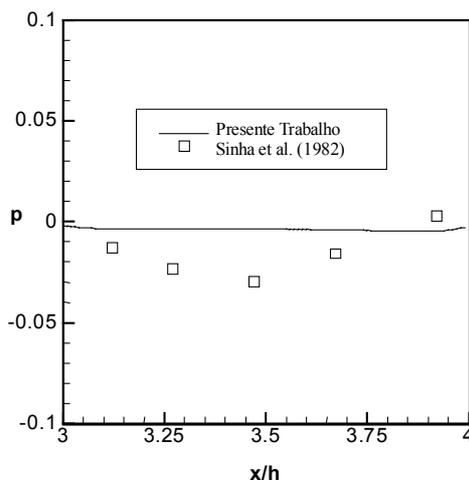


Figura 7. Distribuição da pressão comparada com resultados experimentais para $Re = 2.648$ e $b/h = 1,0$.

A distribuição da pressão no fundo da cavidade é apresentada na Fig. (7). Os resultados obtidos são comparados com os resultados experimentais de Sinha *et al.* (1982) e mostram uma concordância qualitativa, sendo as diferenças, quantitativas, maiores no centro da cavidade.

Os perfis da componente horizontal da velocidade para várias posições x/h são mostrados na Fig. (8). Sabendo que no fundo da cavidade a velocidade deve ser nula, pode-se notar, sobre as curvas, que esta componente assume valores negativos e positivos. Assim, constata-se uma recirculação maior predominante, para a cavidade com razão de aspecto $b/h = 1,0$ e duas recirculações contra-rotativas de dimensões equivalentes, para o caso da cavidade com razão de aspecto $b/h = 2,0$.

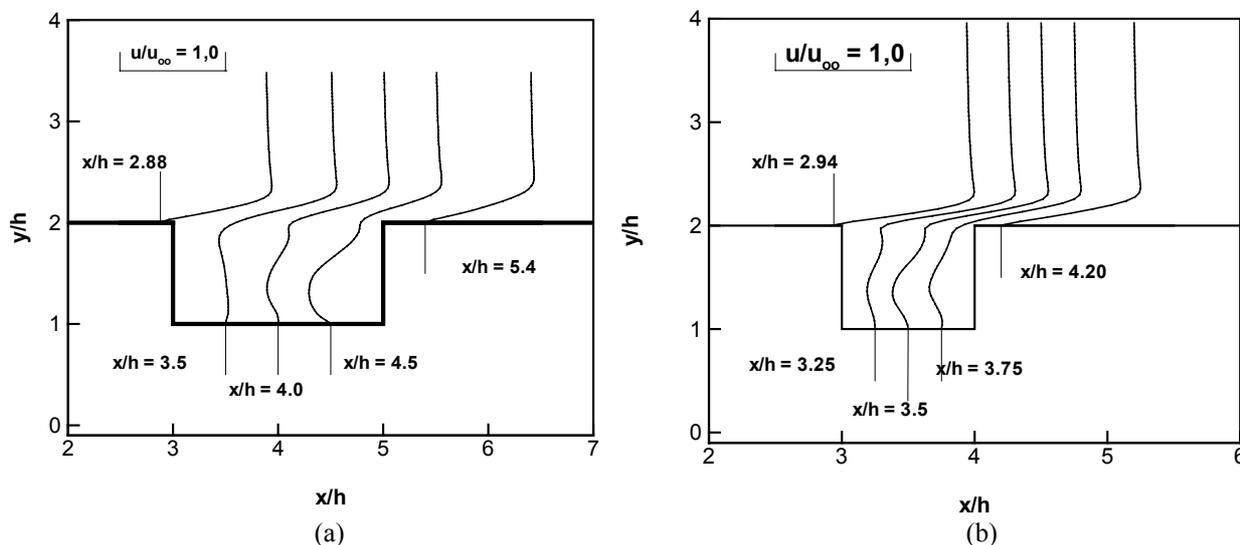


Figura 8. Evolução do perfil da componente horizontal de velocidades: (a) $Re = 1.324$, $b/h = 2,0$ e (b) $Re = 2.648$, $b/h = 1,0$.

A verificação destes perfis é realizada através a comparação com os dados experimentais de Sinha *et al.* (1982) para a cavidade quadrada e $Re = 2.648$, apresentada na Fig. (9). Observa-se novamente uma boa concordância, exceto na região de contato entre o fluido do canal e o fluido da cavidade ($y/h = 2$), região esta de forte nível de cisalhamento.

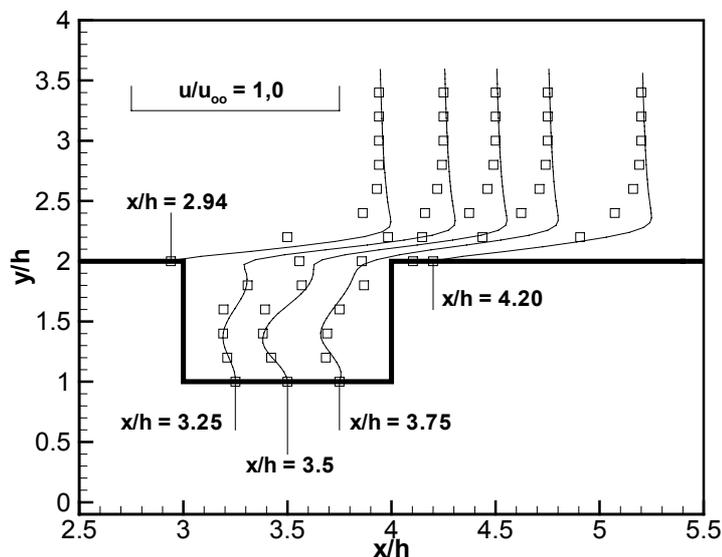


Figura 9. Comparação dos perfis de velocidades da componente horizontal para $Re = 2.648$ e $b/h = 1,0$ (—) presente trabalho e (□) Sinha *et al.* (1982).

A estrutura do escoamento pode ser melhor compreendida ao analisar-se as linhas de corrente, apresentadas nas Fig. (10). A Figura (10.a) mostra as linhas de corrente para o escoamento na cavidade retangular, no qual observa-se a influência desta geometria. Nota-se a presença de duas recirculações maiores contra-rotativas. A primeira delas, que apresenta uma prolongação na direção da parede vertical à esquerda da cavidade, localiza-se ao lado da parede à direita da cavidade. A segunda recirculação localiza-se ao lado da parede à esquerda da cavidade. Também aparecem as linhas

de uma pequena recirculação no canto inferior direito da cavidade e os sinais de uma provável célula recirculante no canto inferior esquerdo.

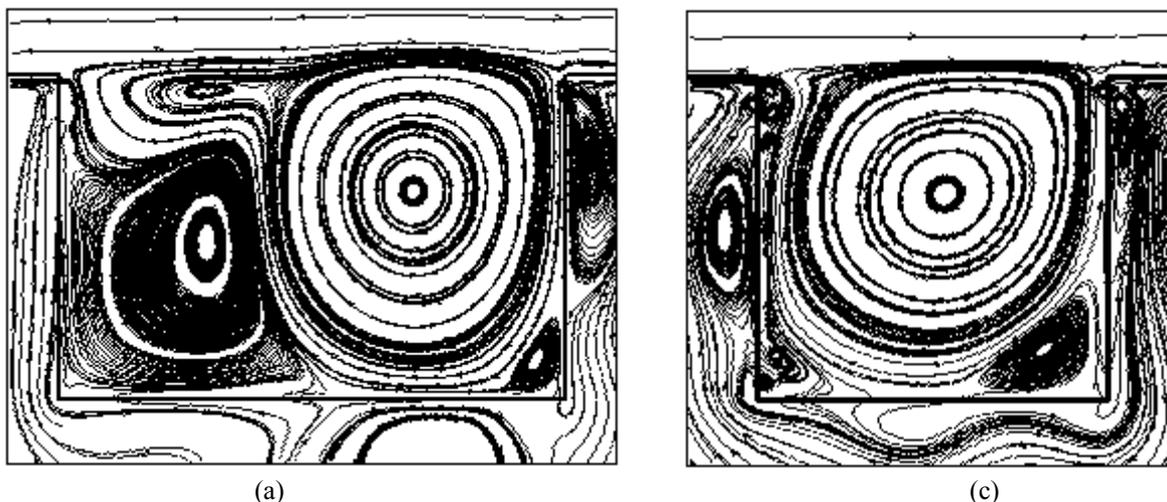


Figura 10. Linhas de corrente: (a) $Re = 1.324$, $b/h = 2,0$ e (b) $Re = 2.648$, $b/h = 1,0$.

Observa-se, na Fig. (10.b), a formação de uma célula central na cavidade, acompanhada de três outras células menores, uma na região superior à esquerda e duas nos cantos inferiores. A recirculação à esquerda da cavidade na região inferior não foi devidamente capturada, embora seja possível perceber sinais de sua presença. A recirculação superior começa a surgir na cavidade a partir de um número de Reynolds próximo a 2.000, como obtido por Hou *et al.* (1995) no estudo da cavidade com tampa deslizante.

As linhas de corrente que surgem externamente à cavidade, cujas paredes são modeladas pelo *MFV*, são relativas ao escoamento induzido na parte externa ao domínio de interesse (região externa à cavidade). É importante lembrar que a fronteira virtual está imersa no domínio euleriano, que está dividido em duas partes. A primeira parte contém o escoamento gerado pela imposição da velocidade na entrada, velocidade esta imposta somente na região acima da parede virtualmente modelada. A segunda parte do domínio euleriano contém um escoamento induzido, de forma a fazer com que nas paredes virtuais a velocidade do fluido seja igual à velocidade da parede. As condições de contorno para as fronteiras externas do domínio são do tipo derivada nula para a velocidade. Isto faz com que a solução seja obtida de forma livre, ou seja, que nesta região a solução encontrada seja função do escoamento existente na região interna à cavidade.

Analisando-se ainda a Fig. (10) na região próxima à parede da cavidade observa-se que as linhas de corrente apresentam sempre sentidos contrários. Este resultado traduz a condição de não-deslizamento sobre a fronteira virtual. Traduz ainda o aparecimento da clássica malha virtual utilizada para se impor a condição de contorno de não deslizamento sobre paredes sólidas. As mudanças de sentido nas linhas de corrente externas correspondem sempre às regiões de recirculações internas.

As posições dos vórtices gerados no escoamento da cavidade aberta são semelhantes àquelas presentes na cavidade com tampa deslizante.

A Tabela 2 mostra a localização das recirculações, enquanto a Tab. 3 apresenta o comprimento das mesmas. Os casos (a) e (b) são relativos às configurações para $Re = 1.324$ e $b/h = 2,0$ e para $Re = 2.648$ e $b/h = 1,0$ respectivamente.

Tabela 2. Localização das recirculações formadas na cavidade aberta rasa.

Caso	Vórtice principal		Vórtice esquerdo		Vórtice superior		Vórtice direito	
	x [m]	y [m]	x [m]	y [m]	x [m]	y [m]	x [m]	y [m]
(a)	0,70	0,64	0,29	0,48	0,29	0,95	0,94	0,13
(b)	0,54	0,64	0,06	0,13			0,82	0,16

Tabela 3. Tamanho das recirculações formadas na cavidade aberta rasa.

Caso	Vórtice esquerdo		Vórtice superior		Vórtice direito	
	l_x [m]	l_y [m]	l_x [m]	l_y [m]	l_x [m]	l_y [m]
(a)	0,0264	0,0197	0,0199	0,0074	0,0055	0,0063
(b)	0,0066	0,0048			0,0101	0,0118

A Figura (11) apresenta as isolinhas de vorticidade para os escoamentos simulados. Nota-se claramente a formação de um núcleo de alta vorticidade, que, no caso da cavidade quadrada, situa-se no centro da mesma e nos outros casos próximo à parede a jusante da cavidade. As regiões vizinhas às paredes apresentam zonas cisalhantes. Entretanto, na cavidade retangular, elas apresentam uma menor intensidade nas paredes a montante da cavidade. Pode-se perceber ainda na Fig. (11), a presença da camada cisalhante entre as regiões de escoamento do canal e da cavidade, e a formação de uma pequena ondulação na região de maior vorticidade, que está sobre a maior estrutura presente no escoamento.

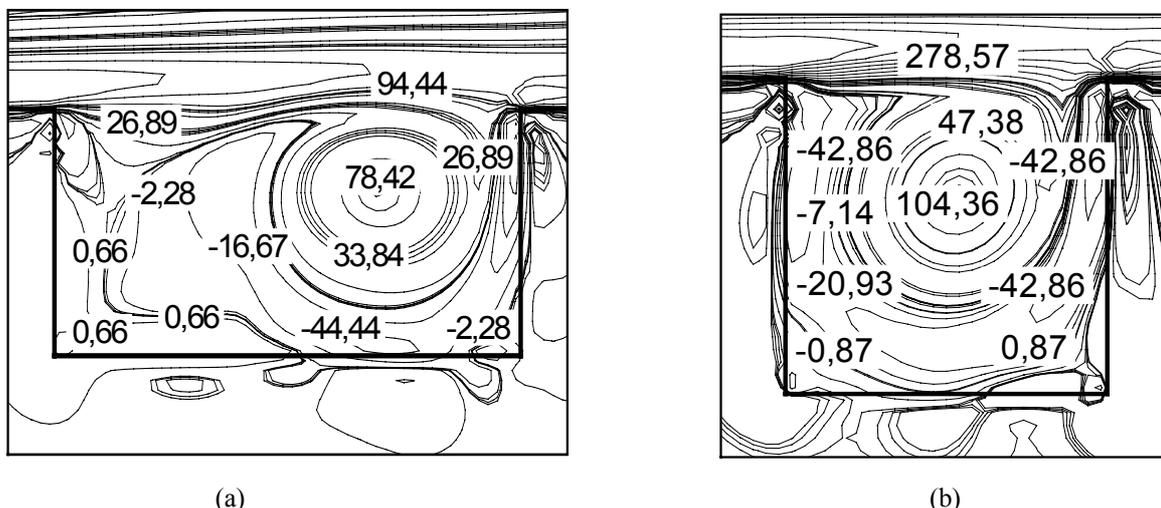


Figura 11. Escoamento sobre uma cavidade aberta rasa. Isolinhas de vorticidade: (a) $Re = 1.324$, $b/h = 2,0$; (b) $Re = 2.648$, $b/h = 1,0$.

5. Conclusões

A utilização do Método da fronteira Imersa, em conjunto com o Modelo Físico Virtual, mostrou-se eficiente na simulação de escoamentos internos forçados. O modelo utilizado foi capaz de capturar as recirculações presentes no escoamento mostrando uma relevante concordância, tanto qualitativa quanto quantitativa, com os resultados experimentais. Os perfis de velocidade obtidos nos dois casos também apresentaram boa concordância com os resultados experimentais, mostrando que a modelagem virtual da parede, por meio do *MFV*, faz com as velocidades nesta região sejam bem próximas a zero, o que esta coerente com a física do problema.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro e à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia pela infra-estrutura.

7. Referências

- Armfield, S., e Street, R., 1999, "The Fractional-Step Method for the Navier-Stokes on Staggered Grids: The Accuracy of three Variations". NOTE. Journal of computational Physics, 153, pp. 660-665.
- Arruda, J. M., Lima e Silva, A. L. F., Silveira Neto, A. e Roma, A. M., 2003, "Numerical Simulation of Flows in a Presence of Moving Boundaries Using the Immersed Boundary Method", Proceedings of the 17th International Congress of Mechanical Engineering, São Paulo, SP, Brasil.
- 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, Uberlândia, MG, Brasil.
- Dillon, R. et al., 1996, "Modeling Biofilm Processes Using the Immersed Boundary Method", Journal of Computational Physics, 129, pp. 57-73.
- Fauci, L. J. e Peskin, C. S., 1988, "A Computational Model of Aquatic Animal Locomotion", Journal of Computational Physics, 77, pp. 85-108.
- Goldstein, D., Hadler, R. e Sirovich, L., 1993, "Modeling a no-slip Flow Boundary with an External Force Field", Journal of Computational Physics, 105, 354.

- Hou, S., Zou, Q., Chen, S., Doolen, G. and Cogley, A. C. E., 1995, "Simulation of Cavity Flow by the Lattice Boltzmann Method", Journal of Computational Physics, No. 118, pp. 329-347.
- Juric, D., 1996, "Computation of Phase Change", Ph.D. Thesis, Mechanical Engineering, University of Michigan.
- Lima e Silva, A. L. F., Silveira Neto, A. e Damasceno, J. J. R., 2003, "Numerical Simulation of Two Dimensional Flow over a Circular Cylinder using the Immersed Boundary method", Journal of Computational Physics, 189, pp. 351-370.
- Peskin, C.S., 1972, "Flow Patterns Around Heart Valves: A Numerical Method", Journal of Computational Physics, 10, pp. 252-271.
- Peskin, C.S., 1977, "Numerical Analysis of Blood Flow in the Heart", Journal of Computational Physics, 25, pp. 220-252.
- Saiki, E. M. e Biringen, S., 1996, "Numerical Simulation of a Cylinder in Uniform Flow: Application of Virtual Boundary Method", Journal of Computational Physics, 123, pp. 450-465.
- Schneider, G. E., e Zedan, M., 1981, "A Modified Strongly Implicit Procedure For The Numerical Solution of Field Problems". Numerical Heat transfer, 4, pp. 1-19.
- Silveira Neto, A., 1991, "Simulation Numerique des Grandes Échelles d'un Écoulement Turbulent Décollé en Aval d'une Marche", Thèse de Doctorat, INPG, Grenoble, France.
- Sinha, S. N., Gupta, A. K. e Oberai, M. M., 1982, "Laminar Separating Flow over Backsteps and Cavities. Part II: Cavities", AIAA Journal, 120, 3, pp. 370-375.
- Unverdi, S. O. e Tryggvason, G., 1992, "A Front-Tracking Method for Viscous Incompressible Multi-Fluid Flows", Journal of Computational Physics, 100, pp. 25-60.

NUMERICAL SIMULATION OF FLOWS OVER SHALLOW OPEN CAVITIES USING THE IMMERSED BOUNDARY METHOD.

Juliano Marcelo de Arruda
Federal University of Uberlândia
Mechanical Engineering School
Campus Santa Mônica, 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil
jmarruda@mecanica.ufu.br

Ana Lúcia Fernandes de Lima e Silva
Federal University of Uberlândia
Mechanical Engineering School
Campus Santa Mônica, 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil
alfsilva@mecanica.ufu.br

Aristeu da Silveira Neto
Federal University of Uberlândia
Mechanical Engineering School
Campus Santa Mônica, 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil
aristeus@mecanica.ufu.br

Alexandre Megiorin Roma
Institute of Mathematics and Statistics
University of São Paulo
Cidade Universitária, São Paulo, Brasil
roma@ime.usp.br

Abstract

The numerical simulation of flows over a shallow open cavity is performed using the Immersed Boundary Method (IBM). The IBM with the Physical Virtual Model (PVM) has been largely used to simulate flows in the presence of immersed boundaries, such as cylinders. In the present work this methodology was used to simulate flows over square and rectangular open shallow cavities. The walls of the cavity were modeled with a force field, calculated by the PVM, that is based on the solution of the Navier-Stokes equations at the points of the immersed boundary (Lagrangean grid). The results are compared favorably with other authors.

Keywords: immersed boundary, physical virtual model, shallow open cavity.