

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ESCOAMENTOS INTERNOS TRIDIMENSIONAIS USANDO O MÉTODO DA FRONTEIRA IMERSA

Elie Luis M. Padilla

Universidade Federal de Uberlândia
epadilla@mecanica.ufu.br

André Leibsohn Martins

CENPES - PETROBRAS
aleibsohn@petrobras.com.br

Aristeu da Silveira Neto

Universidade Federal de Uberlândia
aristeus@mecanica.ufu.br

Resumo. *O presente trabalho apresenta os avanços relacionados ao desenvolvimento de uma ferramenta numérica para análise de problemas de interação fluido-estrutura, utilizando a metodologia de fronteira imersa com modelo físico virtual. Estes tipos de problemas estão comumente ligados a um grande número de aplicações de engenharia, como exemplo na exploração de gás e petróleo: tecnologia de perfuração em águas profundas e produção através de risers. As equações de Navier-Stokes são resolvidas considerando um fluido newtoniano, isotérmico e incompressível. Neste estágio do desenvolvimento, apresentam-se resultados de simulações tridimensionais dos escoamentos Hagen-Poiseuille e dos escoamentos no interior de cavidades-canais cilíndricos. Os detalhes das estruturas dos diversos escoamentos (estáveis) e a concordância com as soluções analíticas mostram a aplicabilidade desta nova metodologia a problemas de escoamentos internos.*

Palavras chave: método de fronteira imersa, escoamentos tridimensionais.

1. Introdução

Entre as grandes dificuldades presentes nas metodologias clássicas (elementos finitos, diferenças finitas e volumes finitos), estão as relacionadas à solução de escoamentos de fluidos em domínios geometricamente complexos e com a presença de estruturas móveis e deformáveis. Problemas desta natureza são normalmente tratados com métodos de transformação de coordenadas ou com malhas não estruturadas. Dificuldades aparecem, no entanto, devido à necessidade de se remalhar o domínio de cálculo a cada passo de tempo. O processo de remalhagem em domínios tridimensionais é caro e o processo de reprojeção dos campos insere erros numéricos que geram problemas, em especial, no que se refere à evidenciação de instabilidades dinâmicas que caracterizam os processos de transição. Uma alternativa para contornar este problema tem sido os métodos de identificação da interface, que possibilitam avaliar a interface através de propriedades geométricas e físicas.

Nesse contexto, Peskin (1977) apresentou o denominado método da fronteira imersa (MFI), método na qual a interface é representada por uma malha lagrangiana e interage com o domínio do fluido, representado por uma malha euleriana. A interação entre os domínios se dá através de uma força, força que o fluido exerce sobre a interface, a qual é adicionada à equação de balanço de quantidade de movimento. A força interfacial foi modelada baseada na lei de Hooke. A partir do trabalho de Peskin (1977), novas propostas foram apresentadas, onde a diferença se encontra basicamente na forma como é modelada a força interfacial. A seguir, algumas das propostas existentes: Fogelson e Peskin (1988) aplicaram o MFI a escoamentos com a presença de partículas em suspensão, onde modelam a força interfacial em função da resistência da partícula ao movimento do fluido; Unverdi e Tryggvason (1992) estudaram escoamentos com bolhas, usando um modelo da força em função dos parâmetros geométricos (curvatura e normal) e físicos (tensão interfacial) da interface; Golstein et al. (1993) simularam escoamentos sobre um cilindro, com modelo de força baseado na soma das forças interfaciais sobre um corpo de massa desprezível; Mohd-Yusof (1997) propõe modelar a força interfacial usando uma formulação baseada nas equações de movimento e avaliada na região próxima da interface; Lima e Silva et al. (2003) propuseram o modelo físico virtual (MFV), baseado também nas equações de movimento, porém avaliada sobre a interface. Evidentemente, os modelos baseados nas equações de balanço de quantidade de movimento são genéricos e livres de constantes ad-hoc.

A aplicação do MFI com MFV a diversos problemas demonstra que se trata de uma técnica promissora. Entre as aplicações têm-se: escoamentos sobre cilindros dispostos em tandem e paralelo e sobre aerofólios a baixos números de Reynolds, em Lima e Silva et al. (2003); escoamentos em canais (Poiseuille, Couette e Couette-Poiseuille) e cavidade aberta rasa com fundo móvel, em Arruda (2004); escoamentos sobre cilindros de diâmetro variável e sobre aerofólios a

altos números de Reynolds, em Oliveira (2005); escoamentos ao redor de uma esfera estacionária e em movimento, em Campregher (2005). Sendo que só o último trabalho usa configuração tridimensional.

No presente trabalho, apresenta-se a aplicação do MFI com MFV a escoamentos internos tridimensionais, trabalho motivado pelo interesse em desenvolver uma ferramenta numérica para análise problemas ligados à tecnologia de perfuração em águas profundas. Os problemas ligados à tecnologia de perfuração em águas profundas têm como característica um alto grau de complexidade, que está ligada à superposição de escoamentos nas direções axial e azimutal, à interação entre os escoamentos no interior do canal e da cavidade anular (como resultado de movimentação excêntrica da estrutura interna), à presença de partículas sólidas, e às características do fluido (não newtoniano).

2. Modelo Matemático

2.1 Modelo para o Fluido

O modelo para o fluido, aplicado no domínio euleriano (Fig. 1a), que representa a dinâmica dos escoamentos incompressíveis, newtonianos e isotérmicos são modelados pelas equações de Navier-Stokes, equações apresentadas a seguir:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{f_i}{\rho}, \tag{2}$$

onde u e p são os campos da velocidade e pressão, respectivamente. O fluido tem densidade ρ e viscosidade cinemática ν . O campo de força f é a força através da qual o fluido sente a presença da interface e é avaliada de acordo a expressão da Eq. (3), esta equação representa a forma como a força lagrangiana F_k é distribuída sobre o domínio euleriano (Fig. 1b).

$$f_i = \sum D_i F_k \Delta A_k \Delta S_k, \tag{3}$$

onde ΔA_k é a área do elemento da malha que delimita a interface e ΔS_k é a distância característica entre os centróides dos elementos da malha lagrangiana. A função distribuição D_i (Juric, 1996) é convenientemente definida na forma de uma gaussiana. Ressalta-se que as coordenadas cartesianas são consideradas no domínio euleriano.

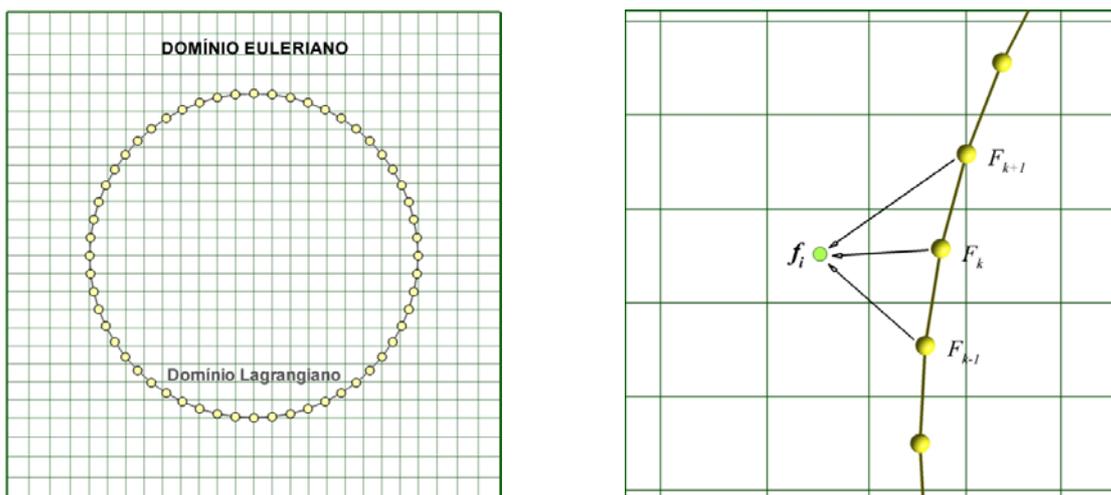


Figura 1. Método de fronteira imersa; (a) representação bidimensional dos domínios, (b) distribuição da força lagrangiana no domínio euleriano.

2.2 Modelo de Turbulência

A metodologia de simulação de grandes escalas SGE (Smagorinsky, 1963) é usada na modelagem da turbulência, esta metodologia baseia-se no conceito de separação de escalas usando um processo de filtragem das equações

governantes, como detalhado em Padilla (2005). O conhecimento do campo filtrado não permite calcular os termos de transporte advectivo $\partial(\overline{u_i u_j})/\partial x_j$, cuja decomposição dá origem a tensores adicionais, que sob certas considerações (Silveira-Neto et. al., 2002) toma a forma:

$$\overline{(u_i u_j)} = \overline{u_i} \overline{u_j} + \tau_{ij}, \quad (4)$$

sendo que τ_{ij} é o tensor de Reynolds sub-malha. Para modelar τ_{ij} usa-se a hipótese de Boussinesq:

$$\tau_{ij} = -\nu_t 2\overline{S}_{ij} + \frac{2}{3} k \delta_{ij}, \quad (5)$$

onde ν_t é a viscosidade turbulenta, $\overline{S}_{ij} = 0.5(\partial\overline{u}_i/\partial x_j + \partial\overline{u}_j/\partial x_i)$ é o tensor deformação do campo filtrado e k é a energia cinética turbulenta. Finalmente, as equações filtradas são expressas como:

$$\frac{\partial\overline{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial\overline{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{u}_i \overline{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial\overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial\overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\overline{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\overline{f}_i}{\rho}. \quad (7)$$

As pequenas escalas, representadas na Eq. (7) por ν_t , são modeladas usando os modelos sub-malha. No presente trabalho consideram-se os modelos de Smagorinsky (Smagorinsky, 1967) e dinâmico (Germano et al., 1991).

2.3 Modelo para a Interface

O modelo físico virtual consiste em calcular a força que o fluido exerce sobre a interface através de um balanço de quantidade de movimento sobre o domínio lagrangiano, que equivale a realizar o balanço sobre cada partícula de fluido que permanece coesa à interface. Assim, a força lagrangiana é definida como segue:

$$F_k = F_a + F_i + F_v + F_p, \quad (8)$$

onde os termos do lado direito são a força de aceleração, força inercial, força viscosa e força de pressão, respectivamente, na forma da Eq. (7).

Cada termo da Eq. (8) é calculado utilizando-se esquemas de interpolação sobre os campos de velocidade eulerianos, segundo Lima e Silva et al., 2003, e de pressão, segundo Oliveira (2006). Uma vez calculada a força sobre o domínio lagrangiano, esta é distribuída sobre o domínio euleriano segundo a Eq. (3). Distribuída a força e gerado o campo de força euleriano equivalente, as equações do movimento são resolvidas sob sua influência. Desta forma, a solução destas equações leva em conta a presença da interface, através de um termo fonte e não por meio de condições de contorno como é feito convencionalmente.

3. Método Numérico e Validação do Código Base

As Equações governantes tridimensionais e em coordenadas cartesianas, são discretizadas usando o método dos volumes finitos, segundo Patankar (1980), considerando esquemas de interpolação espacial e temporal de diferenças centradas e Adams-Bashforth, respectivamente. A equação de Poisson para o campo de pressão é resolvida usando o procedimento fortemente implícito, conhecido como SIP (Stone, 1968). O acoplamento pressão-velocidade é realizado através do método dos passos fracionados (Kim e Moin, 1985).

Foi realizado um rigoroso processo de validação do código computacional base (sem considerar o MFI) entorno de um problema de geometria simples, porém, onde complexas estruturas estão presentes; trata-se de escoamentos no interior de cavidades retangulares com tampa deslizante. A cavidade de seção quadrada (lado L) tem comprimento C e a tampa se movimenta na direção paralela ao eixo x , com velocidade U . As simulações compreendem valores de número de Reynolds na faixa $100 \leq Re \leq 10000$ e de razão de aspecto $C/L=1$ e 2 . A seguir apresentam-se alguns dos resultados.

Na Fig. 2 tem-se resultados para escoamento estável, $Re=400$ e $C/L=1$. Na primeira figura (Fig. 2a) mostram-se linhas de corrente sobre o plano de simetria ($z/L=0,5$) e no domínio tridimensional, evidenciando estruturas como os vórtices primário e secundário, no plano, e correntes internas ao longo da envergadura dentro do vórtice principal. Na

Fig. 2(b) compara-se o perfil da componente horizontal da velocidade no plano de simetria em $x/L=0,5$, com dados numéricos de Kato et al. (1990), Babu e Korpela (1994) e Sheu e Tsai (2002). A distribuição de velocidade obtida com ambas as malhas (uniformes) se aproxima muito melhor aos dados de Sheu e Tsai (2002). À medida que o Re se incrementa o escoamento torna-se instável, assim, para $Re=3200$ o escoamento é notoriamente instável (Padilla et al., 2005). Em regime de turbulência, $Re=10000$, o escoamento apresenta oscilações com uma ampla gama de frequências e múltiplas estruturas vorticiais, entre as quais encontram-se os vórtices do tipo Taylor-Gortler. Distribuições de velocidade média horizontal (u_m/U) e intensidade de turbulência associada a esta componente ($u_{rms} = \sqrt{(u'^2)_m}/U$) para $Re=3200$ e $Re=10000$, respectivamente, são apresentadas na Fig. 3. As distribuições de velocidade média (Fig. 3a) obtidas com modelos sub-malha de Smagorinsky e dinâmico são comparadas com o resultados experimental de Prasad e Koseff (1989) e numérico de Deshpande e Milton (1998). Por outro lado, as distribuições de u_{rms} são comparadas com os dados experimentais mencionados anteriormente. Em relação ao comportamento médio, observa-se uma boa concordância, porém quando se trata de momentos de segunda ordem, o modelo dinâmico é superior ao modelo de Smagorinsky. Maiores detalhes sobre os resultados para escoamentos estáveis, bem como instáveis, podem ser encontrados em Padilla e Silveira Neto (2005) e Padilla et al. (2005).

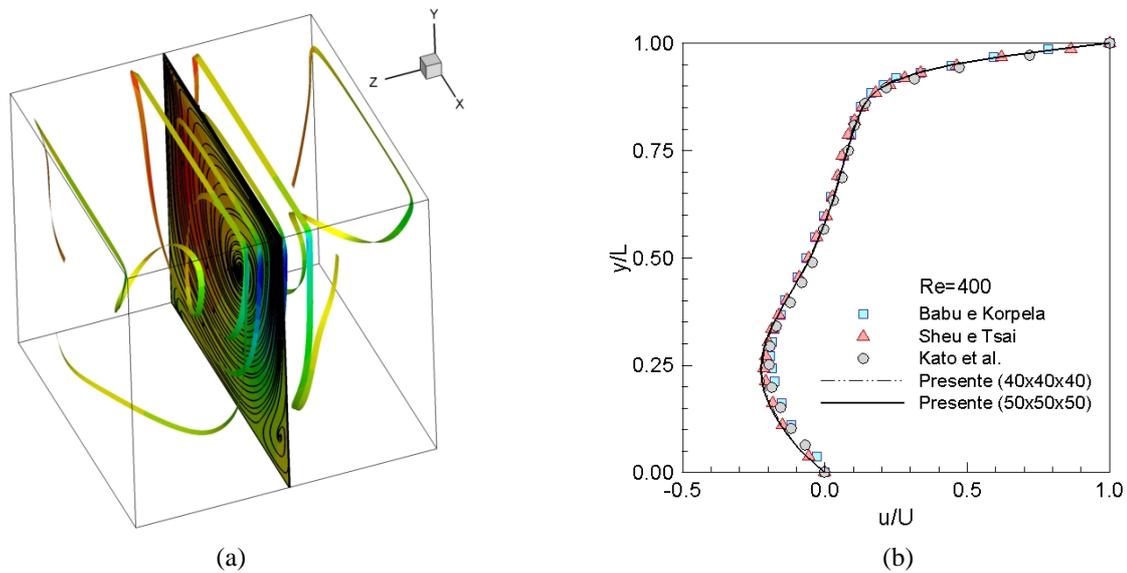


Figura 2. Escoamento estável, $Re=400$ e $C/L=1$; (a) linhas de corrente, (b) comparação da componente horizontal da velocidade.

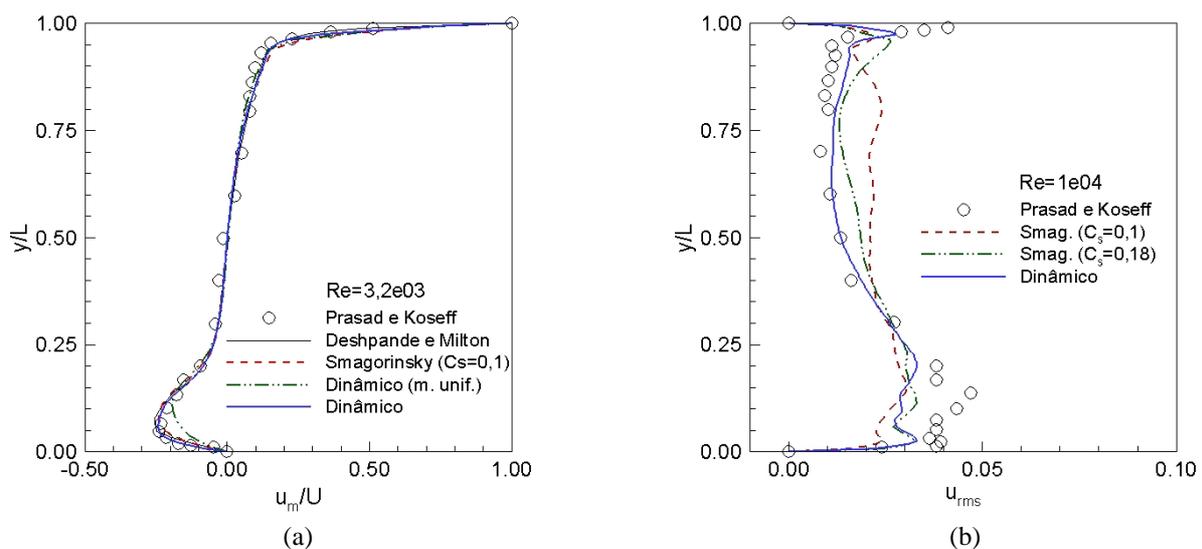


Figura 3. Comparação dos perfis de intensidade de turbulência para $Re=10000$, $C/L=1$; (a) componente horizontal, (b) componente vertical.

4. Resultados

O escoamento Hagen-Poiseuille foi considerado para verificar quantitativamente a validade da metodologia de fronteira imersa, trata-se do escoamento no interior de um canal cilíndrico a $Re=103$, gerado por uma diferença de pressão imposta na entrada e saída do canal. Como se pode observar na Fig. 4(a), o domínio euleriano está definido por uma razão de aspecto $C/L=0,52$ (usando a mesma definição para cavidade) e o domínio lagrangiano por uma razão de aspecto $C_c/D=0,5$, onde D é o diâmetro do canal e C_c é o comprimento. As condições de contorno usadas para o domínio euleriano são do tipo Dirichlet nas direções x e y , e do tipo Neumann na direção do escoamento (z). A malha euleriana tem $44 \times 44 \times 24$ volumes nas direções x , y e z , respectivamente.

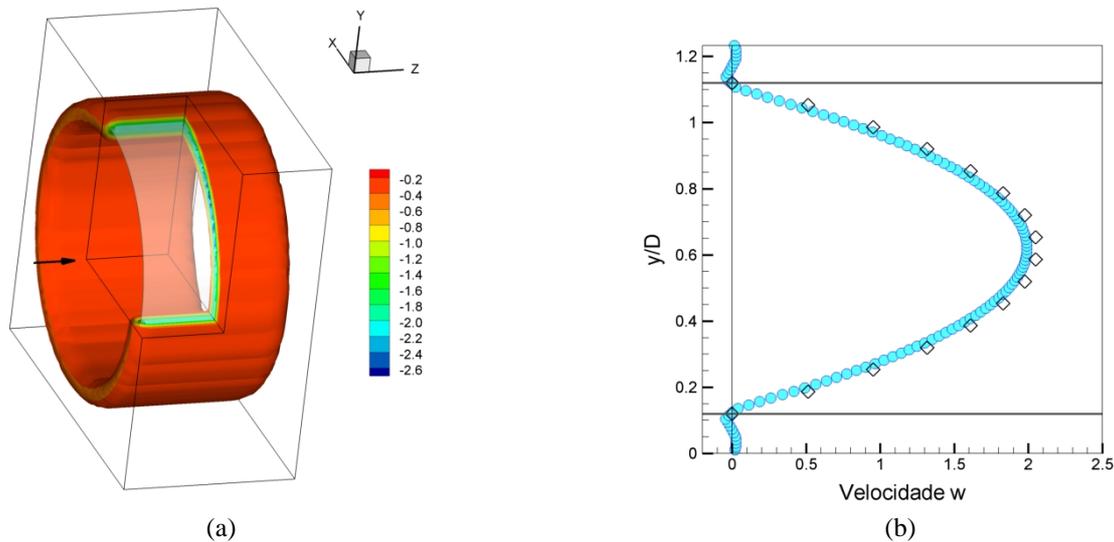


Figura 4. Escoamento Hagen-Poiseuille, $Re=103$; (a) campo de força euleriano na direção axial, (b) comparação do perfil de velocidade com a solução analítica (\diamond).

Na Fig. 4(a) tem-se iso-superfícies da força euleriana na direção do escoamento (f_z), as quais se concentram entorno da interface que descreve o canal. O campo de força euleriano só existe nas proximidades da interface, sendo que o escoamento reconhece a presença do canal por meio deste campo. O perfil de velocidade na direção z do escoamento desenvolvido é observado na Fig. 4(b), junto a solução analítica, avaliada segundo White (1991). Os resultados estão bastante próximos, sendo que a leve diferença observada na parte central do canal atinge um valor máximo de aproximadamente 3%. Certamente, a velocidade na superfície do cilindro não é nula, porém é muito baixa. Para medir o desvio existente no cálculo da velocidade na superfície do canal, usa-se a norma L_2 (Eq. 9), que para o caso é da ordem de 10^{-4} .

$$L_2 = \sqrt{\sum (u_k - u_{fk})^2} / n, \quad (9)$$

onde u_k é a velocidade da interface, u_{fk} é a velocidade do fluido na interface e n é o número de volumes lagrangianos.

A seguir apresentam-se os resultados de escoamentos tridimensionais a baixos números de Reynolds, que correspondem ao problema de cavidade com tampa deslizante (usado para validação) com presença de corpos virtuais no seu interior. São considerados os seguintes casos:

- Caso A: cavidade com canal cilíndrico, definido por uma cavidade com $C/L=1,5$ e um canal cilíndrico com $C_c/D=2$.
- Caso B: cavidade com dois canais cilíndricos concêntricos, definido por uma cavidade com $C/L=1$ e canal externo com $C_c/D=1$.
- Caso C: cavidade com dois canais cilíndricos concêntricos com canal interno rotativo, definido por uma cavidade com $C/L=1$ e canal externo com $C_c/D=1$.

Nas Figs. 5 e 6 mostram-se os resultados para o caso A, simulado usando $Re=100$ com malha euleriana de $36 \times 36 \times 54$ volumes e malha lagrangiana de 61×39 (tangencial, axial). A Fig. 5 mostra o padrão do escoamento através da projeção das linhas de corrente sobre dois planos perpendiculares à direção z (plano z). O escoamento percebe a

presença do cilindro através do campo de força euleriana, formando vórtices no interior do canal, bem como na parte exterior (Fig. 5a), como observado no plano $z/L=0,5$. No outro plano $z/L=1,3$ (Fig. 5b), que não intercepta a superfície do canal, observa-se um vórtice primário (típico de escoamentos no interior de cavidades) com leves modificações à altura do canal. Esta influência é mais bem observada na Fig. 6(a), onde também se observa que o fluido contorna a superfície do canal, gerando vórtices em torno das extremidades do canal devido aos efeitos de borda, sendo tais vórtices maiores na parte superior do plano. Perfis que descrevem a distribuição das componentes horizontal e vertical da velocidade ao longo das coordenadas x e y , respectivamente, no plano $z/L=0,5$, são mostrados na Fig. 6(b). Claro está que as velocidades na interface são muito próximas de zero e que os vórtices formados no interior do canal têm baixas velocidades.

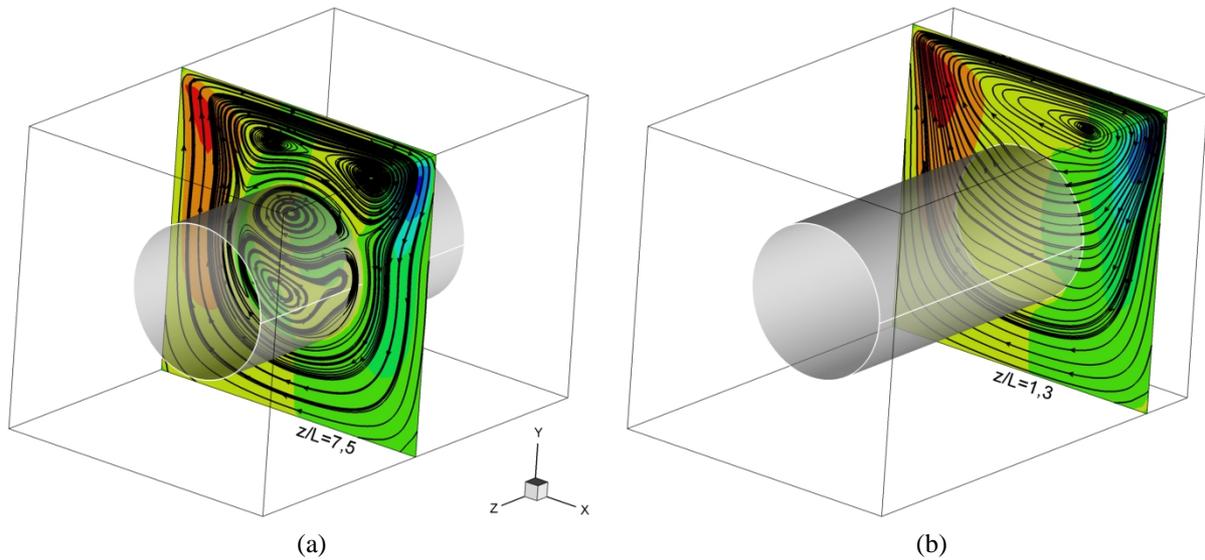


Figura 5. Cavidade com canal cilíndrico para $Re=100$; (a) plano médio z , (b) plano z fora do domínio lagrangiano.

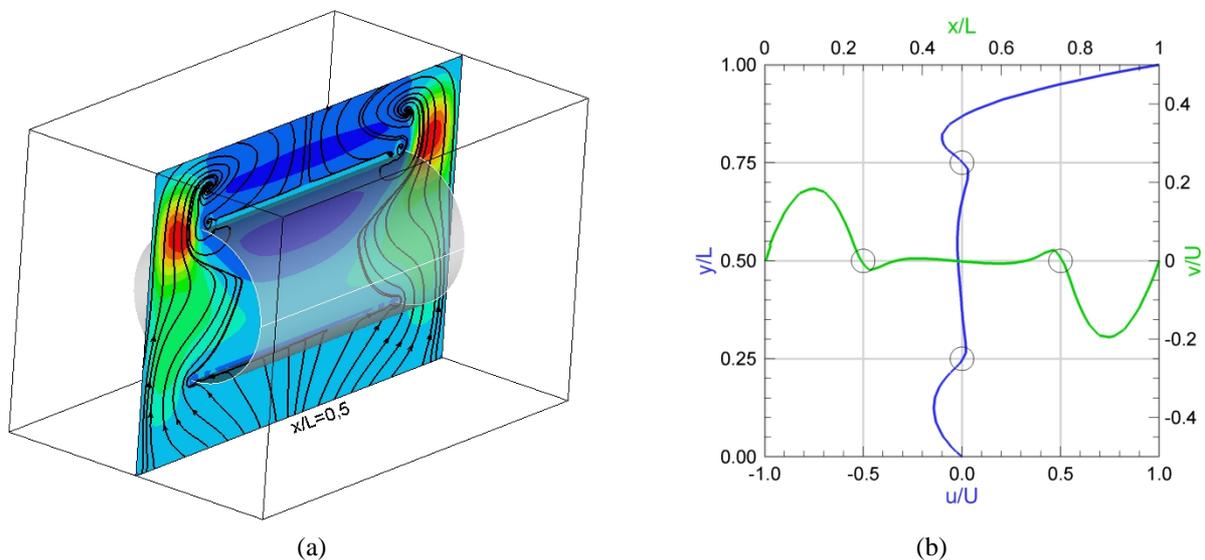


Figura 6. Cavidade com canal cilíndrico para $Re=100$; (a) plano médio x , (b) distribuição de velocidade no plano médio z .

Resultados qualitativos para o caso B são apresentados na Fig. 7. O número de Reynolds corresponde a 100, a malha euleriana tem $36 \times 36 \times 38$ volumes e as malhas lagrangianas têm 32×21 (canal interno) e 62×211 (canal externo) volumes. O escoamento formado fora dos canais é idêntico ao do problema anterior (Fig. 7a), porém no interior do canal interno observa-se leve diferença. No espaço anular os vórtices são alongados. As linhas de corrente sobre o plano $x/L=0,5$, Fig. 7b, mostram também alguns detalhes da complexidade do escoamento gerado ante a presença virtual dos canais.

Para o caso C, em que o canal interno rota em sentido anti-horário com velocidade de 436,5 revoluções por minuto, mostram-se linhas de corrente no domínio tridimensional (Fig. 8a) e sobre o plano $z/L=0,8$ (Fig. 8b). A influência da velocidade de rotação do canal interno atinge praticamente o domínio completo, de maneira que nas regiões localizadas entre os extremos dos canais e as paredes laterais da cavidade, a interação das forças devido à rotação e a velocidade de tampa são mais intensas.

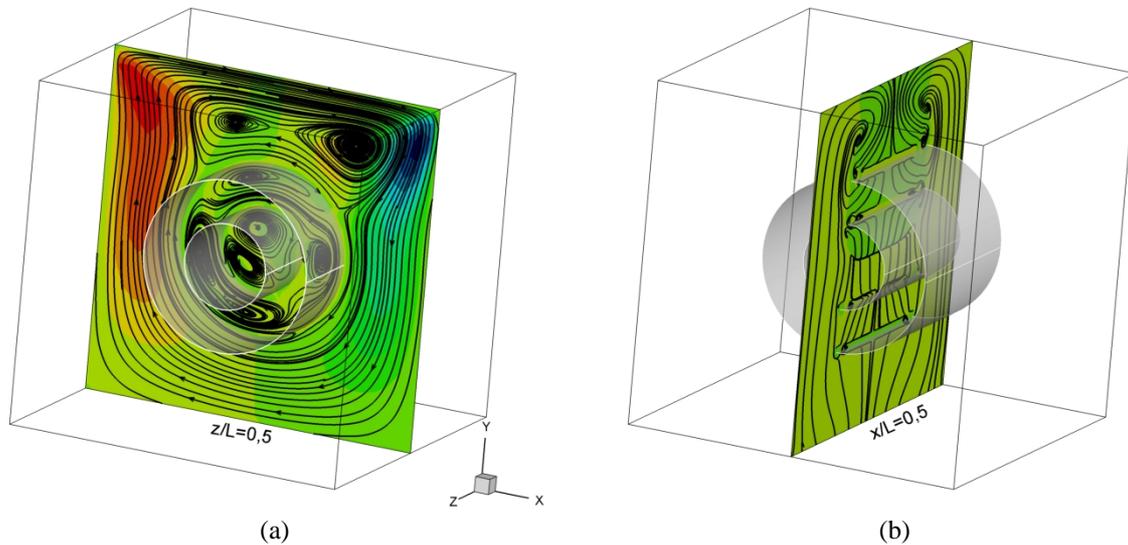


Figura 7. Cavidade com dois canais cilíndricos concêntricos, $Re=100$; (a) planos médio z , (b) plano médio x .

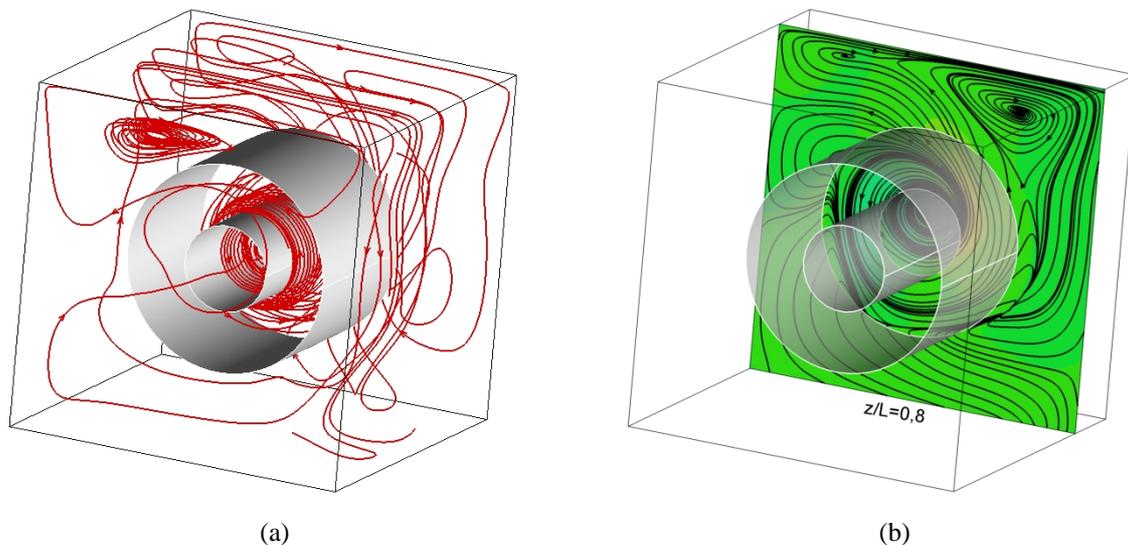


Figura 8. Cavidade com dois canais cilíndricos concêntricos (canal interno rotativo), $Re=100$; (a) linhas de corrente no volume, (b) plano z fora do domínio lagrangiano.

5. Conclusões

Escoamentos internos tridimensionais foram simulados, usando o método de fronteira imersa com modelo físico virtual. O processo de validação do código computacional base em coordenadas cartesianas, apresentou uma boa concordância em relação a dados numéricos e experimentais de outros autores, tanto para regime estável quanto para regime instável. Os resultados apresentados demonstram a capacidade da metodologia para resolver escoamentos complexos com presença de corpos sólidos e em movimento. Os resultados qualitativos apresentam coerência com a física dos diversos problemas considerados e os resultados quantitativos mostram que a interface está adequadamente representada pelo modelo físico virtual. A boa aproximação da solução do escoamento Hagen-Poiseulle com a solução analítica deve melhorar para malhas mais densas. É pertinente ressaltar que se tratam de resultados preliminares, os

quais permitem dar continuidade ao presente trabalho considerando dois aspectos importantes: primeiro, de aplicação a escoamentos com maiores números de Reynolds; segundo, de desenvolvimentos que aprimorem a metodologia.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG e ao CENPES-PETROBRAS pelo apoio financeiro.

5. Referências

- Arruda, J.M., 2004, "Modelagem Matemática de Escoamentos Internos Forçados Utilizando o Método de Fronteira Imersa e o Modelo Físico Virtual", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia.
- Campregher, R., 2005, "Modelagem Matemática Tridimensional para Problemas de Interação Fluido-Estrutura", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia.
- Deshpande, M. D. and Milton, S. G., 1998, "Kolmogorov Scales in a Driven Cavity Flow", *Fluid Dyn. Res.*, 22, pp. 359-381.
- Fogelson, A. L. and Peskin, C. S., 1988, "A Fast Numerical Method for Solving the Three-dimensional Stokes Equations in the Presence of Suspended Particles", *J. of Comp. Physics* v. 79(1), pp. 50-69.
- Germano, M. Piomelli, U. Moin, P. Cabot, W. H., 1991, "A Dynamic Sub-Grid-Scale Eddy Viscosity Model", *Phys. Fluids A* 3 (7), pp. 1760-1765.
- Goldstein, D., Hadler, R. and Sirovich, L., 1993, "Modeling a No-Slip Flow Boundary with an External Force Field", *J. Comput. Physics*, 105, pp. 354.
- Juric, D., 1996, *Computation of Phase Change*, Ph.D. Thesis, University of Michigan,.
- Kato, Y., Kawai, H., and Tanahashi, T., "Numerical Flow Analysis in a Cubic Cavity by the GSMAC finite-element method", *JSME Int. J. Series II* 33, pp.649-658.
- Kim, J. and Moin, P., 1985, "Application of a Fractional Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations", *J. Comp. Phys.*, 59, pp. 308-323.
- Lima e Silva A., Silveira-Neto A. and Damasceno, J. J. R., 2003, "Numerical Simulation of Two-Dimensional Flows Over a Circular Cylinder Using the Immersed Boundary Method", *Journal of Computational Physics*, 189, pp. 351-370.
- Mohd-Yusof, J., 1997, "Combined Immersed Boundaries/B-Splines Methods for Simulations of Flows in Complex Geometries", *CTR Annual Research Briefs*, NASA Ames/Stanford University.
- Oliveira, J. E. S., 2006, "Método da Fronteira Imersa aplicado a Modelagem Matemática e Simulação Numérica de Escoamentos Turbulentos sobre Geometrias Móveis Deformáveis", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia.
- Padilla, E. L. M. e Silveira Neto, A., 2005, "Desenvolvimento de um Código Computacional Tridimensional para Solução de Escoamentos em Transição e Turbulência", *XXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, Guarapari, Proceeding of the CILAMCE, v. 1, p. 1-12.
- Padilla, E. L. M., Martins, A. L. E. and Silveira Neto, A., 2005, "Large-Eddy Simulation of the Three-Dimensional Unstable Flow in a Lid-Driven Cavity", *18TH International Congress of Mechanical Engineering*, Ouro Preto, Proceedings of COBEM, v. 1, p. 1-8.
- Patankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Publishing Corporation, New York.
- Peskin, C. S., 1977, "Numerical analysis of blood flow in the heart", *Journal of Computational Physics*, vol. 25, pp. 220-252.
- Prasad, A. K. and Koseff, J. R., "Reynolds Number and End-Wall Effects on a Lid-Driven Cavity Flow", *Phys. Fluids A*, 1, pp. 208-218, 1989.
- Silveira-Neto, A., Mansur, S. S. e Silvestrini, J. H., 2002, "Equações da Turbulência: Média Versus Filtragem", *III Escola de Primavera de Transição e Turbulência*, Anais, Florianópolis, pp. 1-7.
- Sheu, T. W. H. and Tsai, S. F., 2002, "Flow Topology in a Steady Three-Dimensional Lid-Driven Cavity", *Comput Fluids*, 31, pp. 911-934.
- Smagorinsky, J., 1963, "General Circulation Experiments with Primitive Equations", *Monthly Weather Rev.*, 91, pp. 216-241.
- Stone, H. L., 1968, "Iterative Solution of Implicit Approximations of Multidimensional Partial Differential Equations", *SIAMJ Numer. Anal.*, vol. 5, pp. 530-558.
- Unverdi, S. O. and Tryggvason, G., 1992, "A Front-Tracking Method for Viscous Incompressible Multi-Fluid Flows", *J. Comput. Physics*, 100, pp. 25-60.
- White, F. M., 1991, "Viscous Fluid Flow", McGraw-Hill.

NUMERICAL SIMULATION OF THREE-DIMENSIONAL INTERNAL FLOW USING IMMERSED BOUNDARY METHOD

Elie L. M. Padilla
Federal University of Uberlândia
epadilla@mecanica.ufu.br

André Leibsohn Martins
CENPES-PETROBRAS
aleibsohn@petrobras.com.br

Aristeu da Silveira Neto
Federal University of Uberlândia
aristeus@mecanica.ufu.br

Abstract

This work presents the advances related to the development of a numerical tool for analysis of fluid-structure interaction problems by using of the immersed boundary method with virtual physical model. These kinds of problems are commonly encountered in many engineering applications, for instance in gas and oil exploration: technology of perforation in deepwater and offshore production using risers. The Navier-stokes equations were used, considering a Newtonian, isothermal and incompressible fluid. In this phase of the development, are presented results of three-dimensional simulations of Hagen-Poiseuille flow and flows inside lid-driven cavity-cylindrical channels. The details of the structures of several flows (steady) and the good agreement with the analytical solutions show the applicability of this new methodology to internal flow problems.

Keywords: immersed boundary method, three-dimensional flow.