

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO AO REDOR DE UMA ESFERA EMPREGANDO O MODELO FÍSICO VIRTUAL

Rubens Campregher

campregher@mecanica.ufu.br

Aristeu da Silveira Neto

Faculdade de Engenharia Mecânica – FEMEC

Av. Joao Naves de Avila, 2160

38400-902 - Uberlândia, MG

aristeus@mecanica.ufu.br

Sérgio Said Mansur

Universidade Estadual Paulista – UNESP

Campus de Ilha Solteira

15385-000 - Ilha Solteira, SP

mansur@dem.feis.unesp.br

Resumo: A simulação numérica de escoamentos internos e externos empregando Métodos de Fronteira Imersa (Immersed Boundary Methods) permite a inserção de corpos no escoamento mediante o emprego de um campo de forças adicionado ao termo fonte das equações discretizadas de Navier-Stokes. Além disso, as geometrias são formadas por uma malha lagrangiana que se sobrepõe, sem interferência, à malha euleriana em que o escoamento está sendo resolvido. Este procedimento permite, por exemplo, uma total independência de movimentos da geometria lagrangiana, favorecendo a simulação de fenômenos extremamente complexos como a interação fluido-estrutura. Entretanto, a obtenção do campo de forças lagrangiano não é trivial, existindo algumas abordagens diferentes na literatura. O Modelo Físico Virtual – uma metodologia para a avaliação do campo de forças lagrangiano – foi desenvolvido no Laboratório de Transferência de Calor e Massa e Mecânica dos Fluidos Computacional (LTCM) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) para domínios bidimensionais, mostrando-se extremamente competitivo com as metodologias tradicionais. Após a sua elaboração inicial, diversos testes foram feitos visando seu emprego em escoamentos a altos números de Reynolds, em cilindros rotativos ou móveis, em agrupamentos de cilindros, em geometrias não convencionais e em escoamentos internos, todos bastante satisfatórios. No presente trabalho, uma proposta de extensão do Modelo Físico Virtual para geometrias tridimensionais é apresentado, sendo escolhido para caso-teste o clássico escoamento ao redor de uma esfera. O código numérico foi escrito em Fortran 90 para um cluster Beowulf de dez processadores com ajuda da biblioteca de paralelização MPI. As equações de Navier-Stokes foram discretizadas implicitamente por Volumes Finitos com aproximação de segunda ordem para os termos espaciais e temporais. Os resultados são comparados com resultados experimentais disponíveis na literatura.

Palavras-chave: Esfera, Simulação Numérica, Modelo Físico Virtual.

1. INTRODUÇÃO

Em geometrias complexas, a escolha apropriada da malha numérica depende da metodologia de discretização do domínio contínuo (Ferziger & Peric, 1999). Desta forma, um algoritmo desenvolvido, por exemplo, para lidar com malhas curvilíneas ortogonais, não é capaz de lidar com malhas não-ortogonais. Assim, diversas técnicas procuraram lidar com o problema empregando malhas que se ajustam à geometria do problema, quer seja acompanhando a superfície do corpo a ser estudado, ou de forma a se adaptar melhor ao escoamento (o caminho preferencial das linhas de corrente é uma das opções), melhorando a qualidade da solução. Entretanto, as inegáveis qualidades deste tipo de abordagem são acompanhadas de alguns problemas, sendo que, o mais complicado deles, é o aumento da complexidade das funções de interpolação geométricas que, além de dificultarem demasiadamente a implementação computacional, encarecem a solução.

Escoamentos ao redor de geometrias complexas sempre representou, e ainda representa, sérias dificuldades para os numericistas. Nas discretizações em que se procura ajustar a malha numérica ao objeto de estudo e ao domínio, o problema surge na geração da geometria, nem sempre trivial e propensa a inserir severos erros nos balanços de massa entre seus nós elementares. Nos casos de discretizações em blocos, o acoplamento entre os diversos domínios, se mal construído, pode implicar em sérias inconsistências físicas. Paralelamente às diversas técnicas, a representação de superfícies complexas, pelas técnicas de fronteira imersa, procura resolver o problema da representação geométrica ao implementar uma metodologia simples de construção do obstáculo e, por outro lado, permanecer com a discretização do domínio físico em uma malha euleriana estruturada. Esta liberdade permite mover a geometria, alterar sua forma ou então as duas operações ao mesmo tempo sem a necessidade de reconstruir as malhas do domínio, num processo conhecido como re-malhagem (*remeshing*).

1.1 Modelo Físico Virtual

Nos métodos de fronteira imersa, a presença de uma interface sólida (ou mesmo uma interface gasosa) pode ser simulada pela adição de um termo de força (que alguns autores denominam *termo forçante*) às equações do movimento do fluido. O desenvolvimento desta metodologia deveu-se à Charles Peskin e colaboradores, em 1977, com o intuito de simular o escoamento de sangue ao redor de corações humanos. De acordo com o seu trabalho (Peskin, 1977), a natureza deste termo de força adicional era proveniente da taxa de deformação da fronteira, na qual seus pontos constitutivos eram unidos por forças elásticas. As simulações foram realizadas igualmente em duas e três dimensões.

Unverdi & Tryggvason (1992) aplicaram a metodologia da fronteira imersa em escoamentos bifásicos, onde a força inserida no termo-fonte era simulada com base na tensão superficial presente na interface entre os dois meios. Com essa metodologia, os autores realizaram simulações de bolhas em domínios bi e tridimensionais, onde a linha reta, unindo os pontos nos problemas 2D, é substituída por um elemento triangular, nos moldes das formulações em Elementos Finitos, para os casos 3D. Posteriormente, Goldstein *et al.* (1993) propuseram uma função capaz de relacionar a velocidade do fluido da interface e a velocidade da própria interface, através de constantes *ad hoc*, dependentes do método numérico e do tipo de escoamento o que constitui, sob muitos aspectos, uma séria deficiência da metodologia. Entretanto, em regimes mais complexos de escoamentos, aumenta-se a dependência de passos de tempo menores, encarecendo o método. Simulações tridimensionais empregando este procedimento podem ser encontradas em Goldstein *et al.* (1995).

Mohd-Yusof (1997) propôs que o cálculo da força lagrangeana fosse realizado com base na equação da quantidade de movimento do fluido na interface da fronteira, sem o emprego de constantes que necessitem serem ajustadas. Entretanto, necessita de algoritmos complexos de modo a localizar a geometria no interior do domínio.

Em um trabalho posterior, Fadlun *et al.* (2000) comparando os métodos propostos por Goldstein e Mohd-Yusof concluíram que este último levava grande vantagem sobre o primeiro, especialmente em domínios tridimensionais.

Recentemente, no Laboratório de Transferência de Calor e Massa (LTCM), Lima e Silva (2002) propôs um modelo que, embora também calculando a força a partir do balanço da quantidade de movimento sobre a partícula de fluido na superfície do corpo, aos modos do trabalho de Mohd-Yusof, emprega funções de interpolação mais simplificadas, tornando o método mais barato computacionalmente. Devido ao fato de empregar, como mencionado, a própria equação da quantidade de movimento à partícula de fluido e modelar de forma indireta a condição de não-deslizamento do fluido sobre a interface, a proposta foi batizada de Modelo Físico Virtual (MFV).

Atualmente, o modelo foi testado, em domínios bidimensionais, para diversos problemas práticos de engenharia além de problemas clássicos em mecânica dos fluidos. Escoamentos ao redor de obstáculos a altos números de Reynolds podem ser encontrados em Oliveira *et al.* (2004b), escoamentos ao redor de geometrias complexas em Lima e Silva *et al.* (2004), escoamentos ao redor de obstáculos móveis, objetos em queda livre (constituindo um excelente teste de interação fluido-estrutura) podem ser vistos em Vilaça *et al.* (2004) e, ainda, escoamentos sobre cilindros de diâmetro variável em Oliveira *et al.* (2004a).

O presente trabalho propõe uma extensão do atual modelo bidimensional para domínios tridimensionais, procurando manter as qualidades do MVF original. O domínio euleriano foi discretizado empregando o Método dos Volumes Finitos, com aproximações de segunda ordem espaciais e temporais, enquanto a geometria lagrangeana foi construída a partir de uma malha de elementos finitos. Esta abordagem permitiu uma maior flexibilidade na geração da geometria lagrangiana, principalmente devido à grande quantidade de softwares comerciais ou de domínio público capazes de gerar geometrias complexas. Neste trabalho, a esfera foi gerada empregando-se o software comercial ANSYS® e pode ser vista na Figura 4.

1.2 Processamento Paralelo

As técnicas de computação paralela vêm ganhando importância desde os anos 90 à medida que as modernas bibliotecas de paralelização evoluem e, até onde se pode vislumbrar, o uso de processamento paralelo continuará crescendo. Cabe salientar que a taxa de crescimento do poder de processamento de *mainframes* e supercomputadores é bem inferior às que vêm sendo obtidas nos computadores pessoais (PCs) comuns. Além disso, os recursos de *hardware* e *software* de redes têm auxiliado o emprego de arquiteturas de paralelização que empregam PCs. Entre as várias técnicas que empregam clusters de PCs, provavelmente a mais conhecida é o cluster da classe *Beowulf*, desenvolvido na NASA em 1994 (Pitanga, 2002) e empregado no presente trabalho.

Um cluster que foi montado segundo a “filosofia” *Beowulf*, deve conter algumas características principais, quais sejam: independência de fornecedores de *software* e *hardware*, periféricos escalonáveis, programas gratuitos e de código aberto e, ainda, retorno à comunidade quanto uma melhoria for implementada nos softwares. Todas estas características atendem à demanda da maioria das universidades e centros de pesquisa, mais notadamente nas localizadas em países em desenvolvimento, que frequentemente sofrem de escassez de fundos. O cluster empregado no presente trabalho é composto por dez máquinas Pentium IV de 2.8GHz e 1.5 MBytes de memória DDR RAM, conectadas por uma rede Gigabit e controladas por um KVM, que é um dispositivo que permite usar apenas um monitor, um mouse e um teclado para todas as CPUs. A biblioteca de paralelização empregada foi a MPICH 1.2.5, que é uma das variantes da linguagem popular MPI (*Message Passing Interface*) desenvolvida no Argonne National Laboratory (Baker & Smith, 1996), o código foi escrito em Fortran 90 (compilado com o *Intel Fortran Compiler* – IFC) e roda sob um sistema operacional Linux Fedora Core 2.

Em processamento paralelo, a divisão das tarefas a serem executadas pode ser realizada pelo desmembramento dos processos computacionais ou pelo particionamento do domínio de cálculo. A segunda metodologia, a empregada no presente trabalho, foi escolhida não só por permitir um maior controle do processo, mas pelas características de memória distribuída, inerente à um cluster de PCs, onde não se dispõe de uma única memória RAM global, a exemplo dos supercomputadores vetoriais. Na Figura 1 abaixo, é possível observar um esquema da forma como o domínio foi particionado em subdomínios e da sobreposição (*overlapping*) entre eles. Como a aproximação das derivadas espaciais é de segunda ordem, foi necessário a sobreposição de apenas um volume. Além disso, foi considerado o arranjo co-localizado como o de mais fácil implementação na paralelização do domínio, apesar de ser perfeitamente possível empregar o arranjo deslocado para o mesmo propósito.

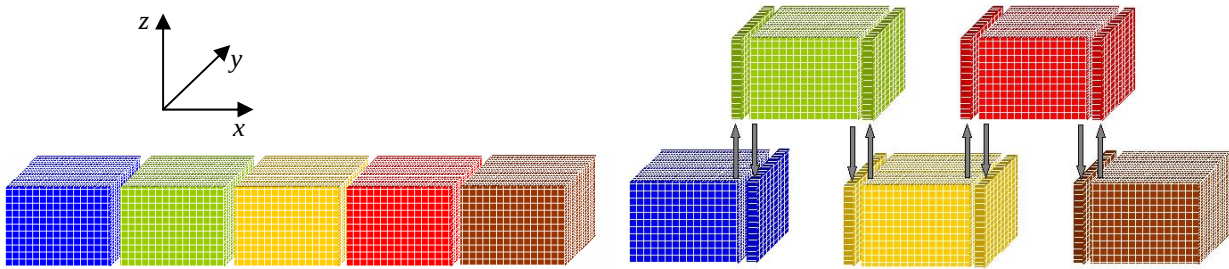


Figura 1: Divisão do domínio e *overlapping*.

Na literatura existem defesas apaixonadas a favor de uma ou de outra configuração. Porém, por questões históricas, o arranjo deslocado foi, por anos, a opção natural dos pesquisadores, apesar de uma simulação bem sucedida empregando arranjos co-localizados ter sido realizada ainda em 1981 (Perić *et al*, 1988). Dentre as qualidades do arranjo deslocado, podem ser citados (i) o forte acoplamento entre pressão e velocidade, pois as derivadas das velocidades necessárias já estão armazenadas nas faces do volume de controle (VC), (ii) a não necessidade de interpolação para se calcular os fluxos de massa nas faces do VC e, ainda, (iii) as aproximações numéricas para energia cinética são conservativas. Por outro lado, o arranjo co-localizado caracteriza-se por (i) permitir usar uma quantidade menor de variáveis a serem armazenadas, (ii) facilitar a implementação do algoritmo de discretização, (iii) no emprego de metodologias *multigrid*, uma mesma operação de transferência entre os níveis pode ser utilizada para todas as variáveis, (iv) ser de bem mais fácil manuseio em domínios computacionais complexos e, ainda, deve-se acrescentar a (v) praticidade de se escrever programas paralelos em que o particionamento do domínio seja necessário. Nos dias atuais, é praticamente consenso entre numericistas que não existem restrições ao uso do arranjo co-localizado, ficando a critério do programador a escolha entre um ou outro método (Maliska, 1996).

2. MODELO MATEMÁTICO

De modo a comparar os resultados obtidos com os resultados da literatura, numéricos e experimentais, é interessante definir alguns parâmetros referentes ao escoamento. O número de Reynolds (Re) é definido como sendo:

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} D}{\mu} \quad (1)$$

onde ρ é a densidade do fluido, μ a sua viscosidade, U_{∞} é a velocidade na corrente livre e D o diâmetro da esfera. O coeficiente de arrasto, a partir de uma resultante de forças F_x , é avaliado por:

$$C_D = \frac{F_x}{\left(\frac{1}{2}\right)\rho U_\infty^2 \left(\frac{\pi D^2}{4}\right)} \quad (2)$$

2.1 Domínio Euleriano

O domínio euleriano foi discretizado empregando a Metodologia dos Volumes Finitos sobre uma malha não-uniforme, mostrada na Figura 2 abaixo. Os detalhes da construção da malha euleriana são detalhados na Figura 3. O centro da esfera, de raio $r = 0.02$ m, foi posicionado em $(x,y,z) = (0.38, 0.34, 0.34)$ m.

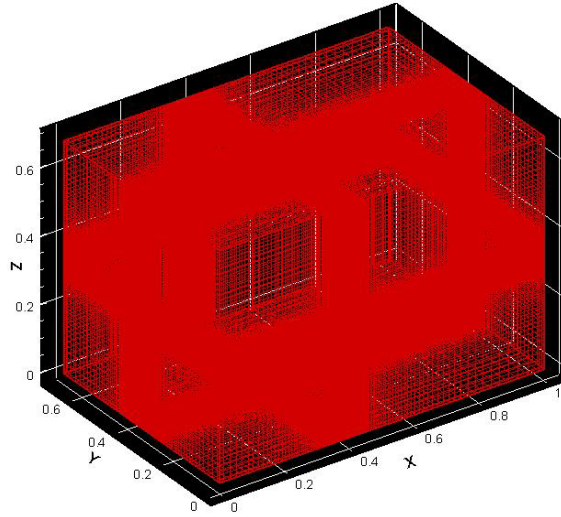


Figura 2: Malha cartesiana regular não-uniforme.

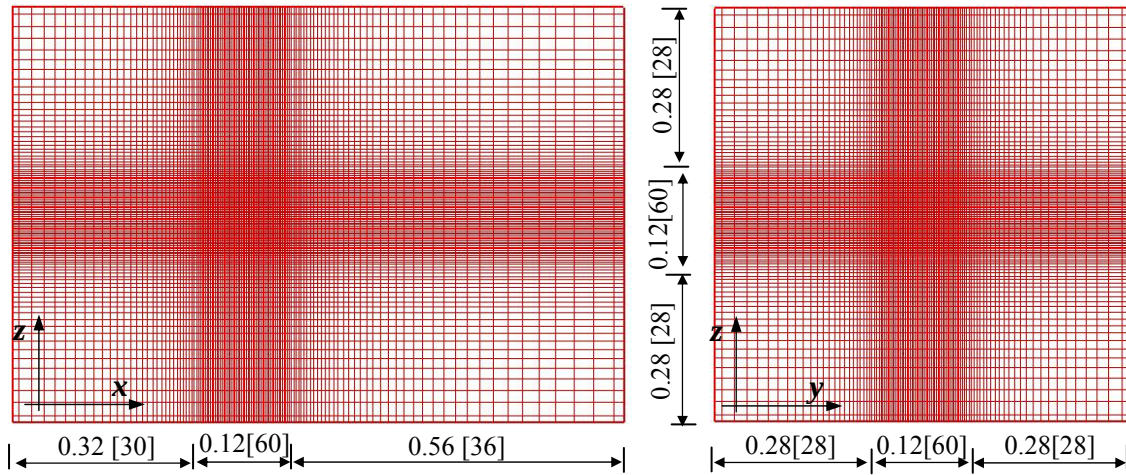


Figura 3: Dimensões da malha (em metros) e quantidade de volumes.

As equações da continuidade e de Navier-Stokes que se propõem a representar matematicamente o escoamento podem ser descritas, respectivamente, como:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + f_i \quad (4)$$

Na discretização por Volumes Finitos, a Equação 4 é integrada no tempo e no espaço no interior de um volume elementar. Os termos advectivos e difusivos foram aproximados pelo esquema de diferenças centradas (Central Difference Scheme – CDS), o termo transiente foi discretizado por three-time level (Ferziger & Perić, 1999) e o acoplamento pressão-velocidade empregado foi o SIMPLEC (Maliska, 1996). O sistema linear resultante da discretização das equações do momento foi resolvido pelo SOR (Successive Over-Relaxation) e o SIP (Strongly Implicit Procedure) foi usado para resolver o sistema linear da correção da pressão.

2.2. Domínio lagrangiano

A superfície da esfera é formada por uma malha de elementos finitos triangulares, onde cada um de seus centróides constitui um ponto lagrangiano ao qual o modelo físico virtual será aplicado. Na Figura 4 abaixo pode-se observar a superfície esférica e, na Figura 5a, os seus elementos constituintes.

A área ΔA do elemento é calculada da forma:

$$\Delta A = \sqrt{S \cdot (S - S_1) \cdot (S - S_2) \cdot (S - S_3)} \quad (5)$$

onde $S = (1/2)(S_1 + S_2 + S_3)$

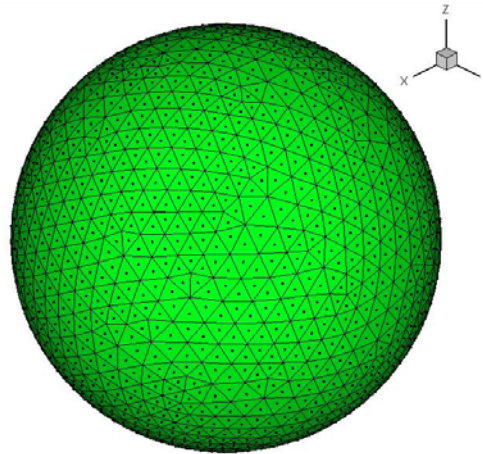


Figura 4: Esfera construída por elementos finitos.

A forma como o termo de força f_i é avaliado discrimina as diferentes variações dentro da Metodologia de Fronteira Imersa. Como mencionado, o Modelo Físico Virtual emprega o balanço da quantidade de movimento em torno de um ponto lagrangeano k , posicionado junto à superfície da geometria, para se obter o valor do campo de força necessário para que a condição de não-deslizamento seja satisfeita entre a partícula de fluido adjacente e a superfície do corpo. A Figura 5a mostra um elemento triangular de superfície e seus respectivos centróide e vetor normal. Com efeito, o termo de força pode ser avaliado quer a geometria esteja parada ou se movendo. Considerando-se, então, a equação da conservação da quantidade de movimento para o ponto k , tem-se:

$$\vec{F}_k = \rho \frac{\partial \vec{V}_k}{\partial t} + \rho \vec{\nabla} \cdot (\vec{V}_k \vec{V}_k) - \mu \nabla^2 \vec{V}_k + \vec{\nabla} p_k \quad (6)$$

onde o termo F representa a força necessária, em cada elemento, para que a condição de não-deslizamento seja satisfeita. De forma a montar o estêncil para se avaliar as derivadas espaciais de primeira e segunda ordem, requeridas nos termos da Equação 6, foram empregados seis pontos auxiliares (k_1 à k_6) para cada ponto lagrangiano k , conforme pode ser observado na Figura 5b.

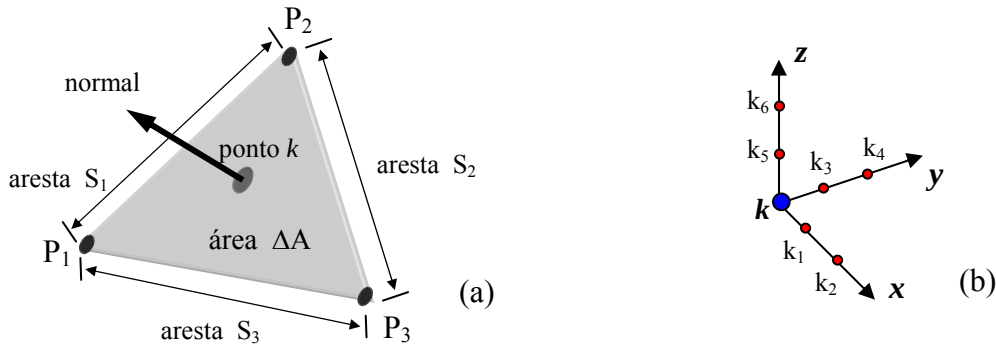


Figura 5: Elemento de área triangular e suas propriedades (esq.) e pontos auxiliares.

A transferência do termo de força avaliado na Equação 6, em todo o domínio lagrangiano, para o domínio euleriano é feita por meio da função distribuição D_i .

$$f_i = \sum_k F_k \cdot D_i \cdot \Delta A_k \cdot \Delta S_k \quad (7)$$

onde $\Delta S_k = (S_1 + S_2 + S_3) / 3$ e a função distribuição D_i , uma aproximação numérica da função delta de Dirac, é calculada da seguinte forma:

$$D_i(x_k) = \frac{\prod_i \varphi[(x_k - x_i) / \Delta x_i]}{\prod_i \Delta x_i}, \quad (8)$$

$$\varphi(r) = \begin{cases} \tilde{\varphi}(r) & \text{se } \|r\| < 1 \\ \frac{1}{2} - \tilde{\varphi}(2 - \|r\|) & \text{se } 1 \leq \|r\| \leq 2 \\ 0 & \text{se } \|r\| > 2 \end{cases} \quad (9)$$

$$\tilde{\varphi}(r) = \frac{3 - 2\|r\| + \sqrt{1 + 4\|r\| - 4\|r\|^2}}{8} \quad (10)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizadas várias simulações, sempre a Reynolds igual a 100, de forma a se determinar o número ideal de elementos que proporcionasse um bom resultado qualitativo, ou seja, que apresentasse um campo das propriedades do escoamento condizente com observados nos experimentos e um desvio das linhas de corrente. Na Figura 6 é possível observar as linhas de corrente se desviando da esfera, caracterizando o efeito satisfatório do campo de força na região de estagnação à frente do obstáculo. Além disso, a região de recirculação à jusante da esfera pode ser analisada com base nas linhas de corrente lançadas podendo, inclusive, perceber o efeito tridimensional presente no quadro à direita (b) da Figura 6. Na Figura 7 as três componentes do campo de força, F_x , F_y e F_z são apresentadas nos quadros a, b e c, respectivamente, mostrando a consistência do modelo. É interessante notar no campo da componente x da força (F_x), a presença de uma resultante no sentido positivo (em vermelho) do domínio, na região de recirculação, e que é responsável por manter as partículas de fluido atraídas na direção da esfera. Nos demais quadros da Figura 7 (ou seja, para as componentes de força y e z), a cor azul representa valor positivo.

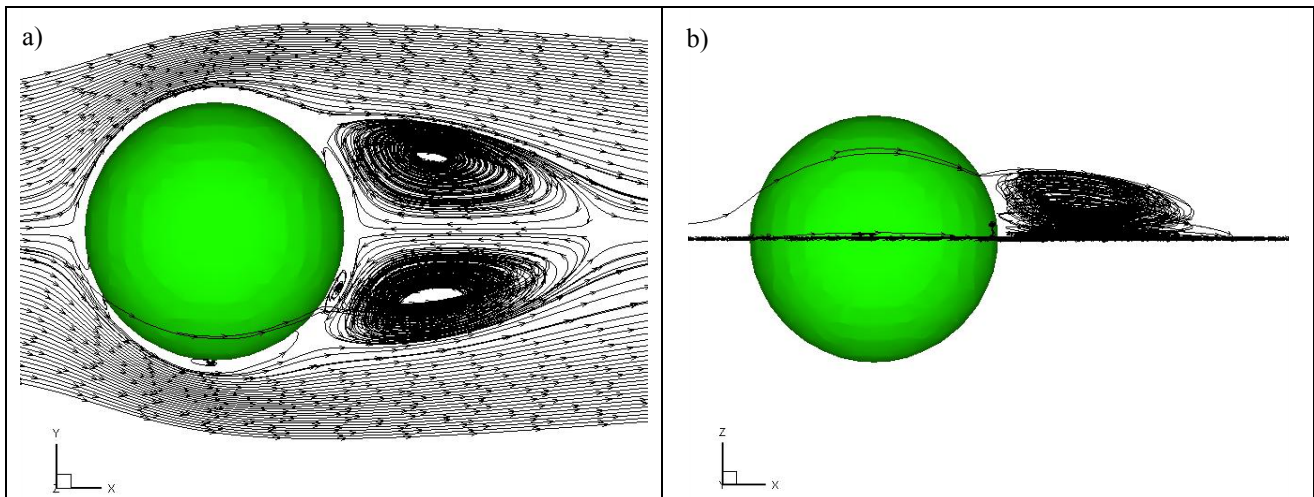


Figura 6: Linhas de corrente vistas no plano xy (esq.) e do plano xz.

Na Figura 8 as componentes da vorticidade, nos três eixos coordenados são apresentadas, indicando a simetria do escoamento laminar ao longo do plano transversal ao escoamento. A componente x da vorticidade pode ser vista no quadro *a*, apresentando uma característica de simetria entre os campos de sentido positivo (amarelo) e negativo. É possível, ainda, observar um campo de vorticidade no interior da esfera (um fenômeno que é característico do MVF, extremamente útil em escoamentos bifásicos e que não afeta o resultado para corpos sólidos). Cabe salientar que o escoamento se encontra no regime laminar já que, na literatura, o número de Reynolds crítico foi obtido como dentro do intervalo $275 < Re < 295$ (Gushchin *et al.*, 2002).

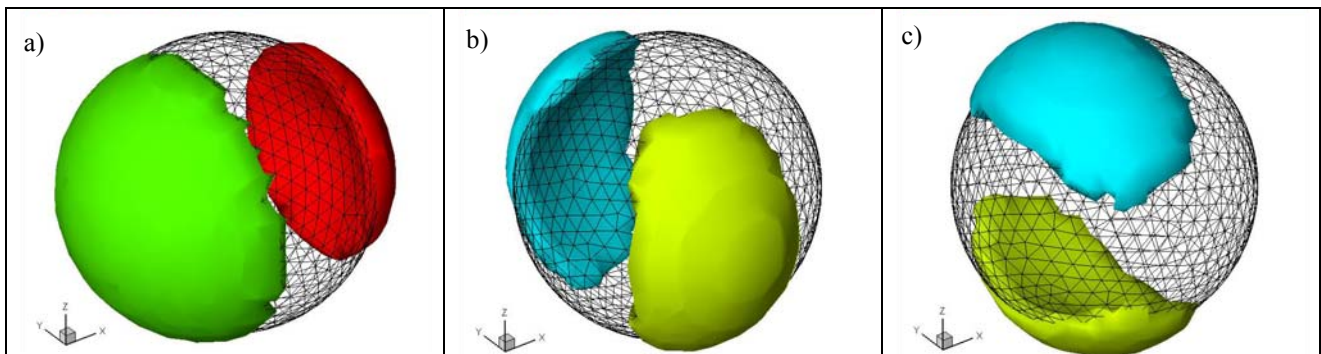


Figura 7: Campo de forças na direção x (a), na direção y (b) e na direção z ..

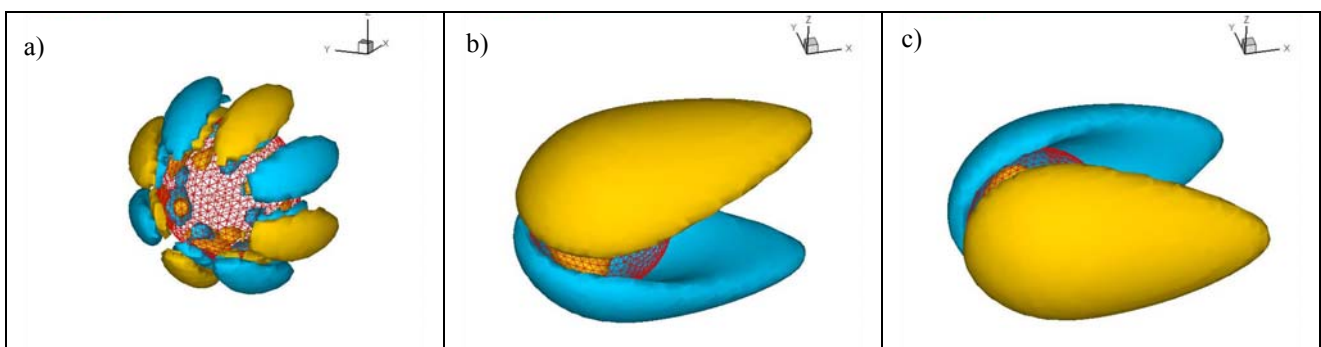


Figura 8: Campo de vorticidade na direção x (a), na direção y (b) e na direção z ..

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi apresentada uma proposta de extensão do Modelo Físico Virtual para domínios tridimensionais. Apesar dos resultados serem preliminares, são promissores no sentido de que não só são coerentes qualitativamente mas, também, quantitativamente pois os valores obtidos para o coeficiente de arrasto estão da ordem de $c_D = 1.178$ e para o comprimento da bolha de recirculação (Figura 6), em relação ao diâmetro da esfera, em torno de 0.94. Estes números representam um erro de, aproximadamente, 8% para o c_D e 6.5% para o comprimento da bolha.

5. REFERÊNCIAS

- Baker, L. & Smith, B.J., 1996, “Parallel Programming”, McGraw-Hill.
- Fadlun. E.A., Verzicco, R., Orlandi, P. e Mohdi-Yusof, J., 2000, “Combined Immersed-Boundary Finite-Difference Methods for Three-Dimensional Complex Flows Simulations”, *Journal of Computational Physics*, vol. 161, pp. 35-60.
- Ferziger, J.H., Perić, M., 1999, “Computational Methods for Fluid Dynamics”, 2nd Ed., Springer.
- Goldstein, D., Handler, R. e Sirovich, L. , 1995, “Direct Numerical Simulation of the Turbulent Flow over a Modelled Ribbed Covered Surface”, *Journal of Fluid Mechanics*, 302, 333.
- Gushchin, V.A., Kostomarov, A.V., Matyushin, P.V. e Pavlyukova, E.R, 2002, “Direct Numerical Simulations of Separated Flows around a Sphere and a Circular Cylinder”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 90, pp. 341-358.
- Lima e Silva, A.L.F., 2002, “Desenvolvimento e Implementação de uma Nova Metodologia para a Modelagem de Escoamentos sobre Geometrias Complexas: Método da Fronteira Imersa com Modelo Físico Virtual”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.
- Lima e Silva, A.L.F., Silva, A.R. e Silveira-Neto, A., 2004, “Numerical Simulations of Two-Dimensional Complex Flows over Bluff Bodies Using the Imersed Boundary Method”, Artigo submetido ao *Journal of Computational Physics*.
- Maliska, C.R., 1995, “Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional”, Rio de Janeiro, LTC Editora.
- 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., Lima e Silva, A..L.F., Guimarães, G., e Silveira-Neto, A., 2004, “Simulação Numérica do Escoamento a Baixo Reynolds Sobre um Cilindro de Diâmetro Variável usando {MFI} / {MFV}”, *Proceedings of the 10º ENCIT - Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, Rio de Janeiro, RJ.
- Oliveira, J.E.S. and Lima e Silva, A.F.L. and Souza, F.J. and Guimarães, G. and Silveira-Neto, A., 2004, “Comparative Analysis between Different Methodologies of Turbulence Modeling: URANS, DES and LES”, 4º Escola de Primavera de Transição e Turbulência, Porto Alegre, RS.
- Patankar, S., 1980, “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”, Hemisphere.
- Perić, M., Kessler, R. e Scheuerer, G., 1988, “Comparison of Finite-Volume Numerical Methods with Staggered and Colocated Grids”, *Computers Fluids*, vol. 16, pp. 389-403.
- Peskin, C.S., 1977, “Numerical Analysis of Blood Flow in the Heart”, *Journal of Computational Physics*, vol. 25, pp. 220.
- Pitanga, M., 2002, “Construindo Supercomputadores com Linux”, Brasport.
- Unverdi, S.O. e Tryggvason, G., 1992, “A Front-Tracking Method for Viscous, Incompressible, Multi-Fluid Flows”, *Journal of Computational Physics*, vol. 100, pp. 25.
- Vilaça, A.C., Oliveira J.E.S., Lima e Silva, A.L.F., Silveira-Neto, A., 2004, “Modelagem Matemática e Simulação Numérica do Escoamento sobre uma Partícula em Queda Livre”, Artigo submetido ao XXXI ENEMP - Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores serão os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

NUMERICAL SIMULATION OF THE FLOW AROUND A SPHERE USING THE PHYSICAL VIRTUAL MODEL

Rubens Campregher

campregher@mecanica.ufu.br

Aristeu da Silveira Neto

Faculdade de Engenharia Mecânica – FEMEC

Av. Joao Naves de Avila, 2160

38400-902 - Uberlândia, MG

aristeus@mecanica.ufu.br

Sérgio Said Mansur

Universidade Estadual Paulista – UNESP

Campus de Ilha Solteira

15385-000 - Ilha Solteira, SP

mansur@dem.feis.unesp.br

Abstract: *The numerical simulation of internal and external flows using the Immersed Boundary Methods allows the insertion of bodies by the force field added to the Navier-Stokes equations source term. Furthermore, the geometries are constituted by a lagrangean mesh that overlaps, without interference, the eulerian mesh which the flow are been solved. This technique permit, for instance, the complete independence of the lagrangean geometry, suitable for very complex flow simulation such as fluid-structure interaction. However, the evaluation of the lagrangean force field is not trivial, and several approaches are found in the literature. The Physical Virtual Model PVM – a methodology to obtain the lagrangean force field – has been developed at the Heat and Mass Transfer and CFD Laboratoy (LTCM) of the Mechanical Engineering College (FEMEC) for two-dimensional domains, and has shown very competitive when compared against the traditional methods. After its original formulation, several successful tests have been performed in order to used it at high Reynolds number flows, in flows over rotating or moving cylinders, over cylinders arrangements, over non-conventional geometries, and internal flows. In this work, an extension to the PVM to 3D domains is proposed and the classical flow around a sphere was chosen as a test case. The numerical code was written in Fortran 90 for a Beowulf-class cluster with a MPI parallel library. The Navier-Stokes equations were implicit discretized by the Finite Volume Method in a spatial and temporal second order approximation. The results were compared against the results in the literature.*

Keywords: *Sphere, Numerical Simulation, Physical Virtual Model.*