

FRONTEIRA IMERSA PARA CORPOS ESBELTOS

João Rodrigo Andrade, jandrade@mec.ufu.br
Aristeu Silveira Neto, aristeus@mecanica.ufu.br

Resumo. A metodologia de fronteira imersa (FI) se presta a aplicar as condições de contorno em escoamentos sobre corpos imersos cuja malha computacional não seja alinhada com a geometria do obstáculo. Esta metodologia tem sido aplicada em simulações de escoamentos envolvendo a presença de corpos de geometria complexas e/ou em movimento. Apesar das grandes vantagens dos métodos de fronteira imersa, é mostrado no presente trabalho que algumas dificuldades e desafios são encontrados quando este é empregado, especialmente em escoamentos sobre corpos de geometria esbelta e quinas agudas. No presente trabalho, dois objetivos foram propostos. Primeiramente, avaliar a acurácia e eficiência dos métodos de FI em simulações sobre corpos com geometria altamente esbelta e irregular e implementar um método numérico capaz de satisfazer as condições de contorno dessas geometrias. Foi testado e validado o caso de um escoamento sobre uma placa plana vertical.

Palavras chave: método da fronteira imersa, corpo de geometria esbelta, método da múltipla imposição da força, método de volumes fantasmas locais.

1. INTRODUÇÃO

Nas soluções tecnológicas e desafios da mecânica dos fluidos computacional, uma grande proporção dos problemas convencionalmente enfrentados, tanto no âmbito industrial quanto no acadêmico, são estabelecidos em escoamentos sobre corpos de geometrias complexas, o que implica em um grande desafio do ponto de vista numérico. Por exemplo, na Fig. (1) é observado um escoamento sobre uma turbina eólica, um caso de geometria complexa e móvel dentro do escoamento.

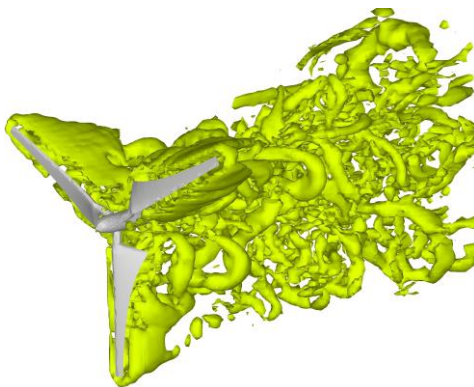


Figura 1. Escoamento sobre uma turbina eólica (Relatório de Projeto Petrobrás).

Visando contornar esta dificuldade, diferentes estratégias e métodos numéricos foram criados para tratar e resolver este grupo de escoamentos. A mais utilizada atualmente na indústria e meio acadêmico e com já comprovada utilidade, eficiência e confiabilidade é o uso de malhas não estruturadas que são conformadas de acordo com as geometrias presentes no escoamento. Apesar das conhecidas vantagens, esse método exige certa experiência do usuário para construir uma malha eficiente e pode exigir um maior esforço computacional caso exista movimentação do corpo. Outra possível solução, já bastante conhecida academicamente, mas pouco difundida na indústria, é a utilização de malhas cartesianas com aplicação do método de fronteira imersa, que de um ponto de vista prático são independentes da complexidade das geometrias envolvidas. A Fig. (2) ilustra a diferença básica entre um escoamento modelado por uma malha irregular conformada ao corpo imerso e por uma malha cartesiana aplicando o método de fronteira imersa.

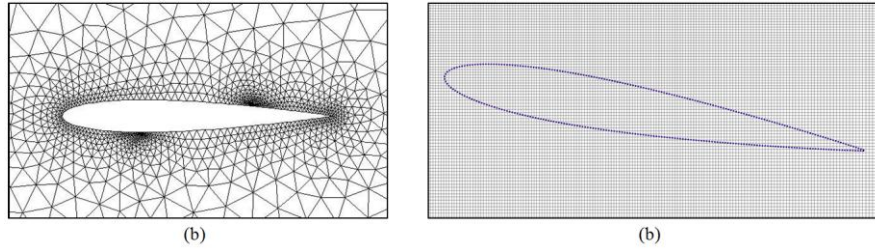


Figura 2. Modelo numérico representativo de um perfil aerodinâmico NACA0012: (a) Malha irregular adaptada ao perfil; (b) Malha cartesiana sobreposta por um conjunto de pontos representando o perfil.

Apesar de consideráveis vantagens, um problema geral dos métodos de fronteira imersa reside no fato de que em sua grande maioria eles não são adequados para tratar escoamentos que passam nas vizinhanças de interfaces esbeltas como, por exemplo, um perfil de aerofólio ou uma folha. Tendo em vista esse problema, um estudo bibliográfico foi realizado para o devido conhecimento dos métodos existentes na literatura e a implementação do método de fronteira imersa com volumes fantasmas locais.

2. FORMULAÇÃO DIFERENCIAL

Visando a modelagem do escoamento de interesse, consideram-se a equação da continuidade e a equação de Navier-Stokes com o termo de força de interface f_i , que confere ao escoamento a presença do sólido imerso. O balanço de massa (equação da continuidade), para um escoamento incompressível, é descrito em notação indicial pela Eq. (1):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

O balanço de quantidade de movimento linear para um fluido Newtoniano, em notação indicial, é dado por:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + f_i \quad (3)$$

3. MODELAGEM NUMÉRICA

No presente trabalho foi utilizado o código IMERSGHOST que possui as seguintes características:

- Algoritmo implementado em MATLAB de resolução das equações de Navier-Stokes desenvolvido pelo próprio autor. Emprega o método dos volumes finitos com malha cartesiana. Apresenta variáveis escalares centradas e variáveis vetoriais deslocadas, este código resolve o escoamento na sua forma bidimensional, utilizando as equações de transporte nas formas não conservativas. As discretizações dos termos difusivo e advectivo são feitas com Esquema de Diferenças Centradas (CDS). Uma aproximação totalmente explícita é adotada, utilizando o método de Euler de primeira ordem como integrador temporal. A equação de correção de pressão é resolvida pelo método da projeção baseado na técnica do passo fracionado, resultando em uma equação de Poisson. Apresenta o método de fronteira imersa com volumes fantasmas locais para o cálculo de escoamentos sobre corpos sólidos

4. MÉTODO DA FRONTEIRA IMERSA

O método de fronteira imersa (*Immersed Boundary Method – IB*) surgiu como uma alternativa eficiente aos métodos cujas malhas se ajustam às fronteiras (*body-fitted*) para tratamento de problemas envolvendo geometrias complexas, móveis e deformáveis. As Figs. (3)-a, b e c, respectivamente, ilustram quatro diferentes tipos de malhas que se ajustam às fronteiras do problema: malha regular estruturada, malha regular não estruturada, malha não estruturada e por fim a malha representando a fronteira imersa, todas representam a mesma geometria.

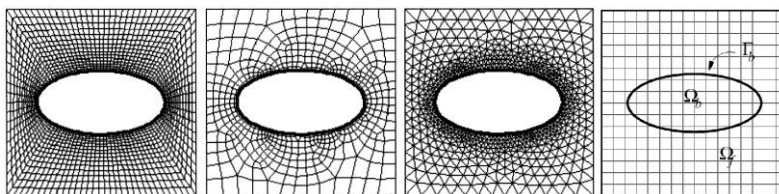


Figura 3. Malhas estruturadas e não estruturadas adaptadas ao corpo (MITTAL; IACCARINO, 2005).

4.1. Relevância do método de fronteira imersa

De acordo com Meül (2006), podem-se citar várias vantagens do método de fronteira imersa quando comparado aos métodos tradicionais de malha adaptada ao corpo, são elas: facilidade para tratamento de geometrias complexas, facilidade para tratamento de corpos em movimento, menor número de operações por volume discretizado, facilidade na paralelização do domínio, dentre outros.

4.2. Restrições do método

Apesar das grandes vantagens, há, porém, desvantagens que devem ser levadas em consideração. O tratamento das condições de contorno não são evidentes e requerem métodos complexos de interpolação, outro problema se baseia que o tamanho da malha (número de pontos ou células no domínio) aumenta consideravelmente mais com o aumento do número de Reynolds em uma malha cartesiana uniforme do que em uma malha conformada ao corpo.

Outro problema, já citado anteriormente, é a fragilidade de grande parte dos métodos de fronteira imersa a corpos que possuem quinas esbeltas ou planos bastante finos, pois alguns métodos de interpolação não são adequados para estes tipos de geometrias, e. g., métodos que espalham a função de forçagem em regiões não pontuais. Na Fig. (4) pode-se ver a região de interpolação e distribuição da velocidade e força, respectivamente, em corpo com geometria esbelta e aguda, nela nota-se que a região de distribuição de um ponto lagrangiano da superfície superior do corpo atinge regiões que estão abaixo da superfície inferior do corpo.

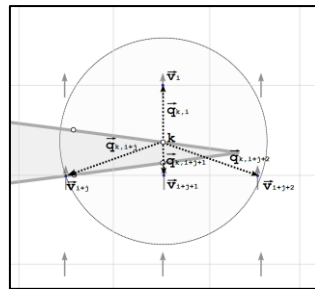


Figura 4. Representação da região de distribuição da força de interface em uma fronteira imersa com geometria esbelta.

Onde os termos $\vec{v}$, $\vec{q}$ e k representam, respectivamente, a velocidade vertical na face do volumes euleriano, o vetor partindo do ponto lagrangiano até o ponto de face da célula euleriana e o ponto lagrangiano.

4.3. Método Implementado

A fim de estabelecer comparações relativas ao tratamento de corpos com geometrias esbeltas, foi implementado e testado o método de imposição direta da condição de contorno chamado de método de volumes fantasmas locais, este método prometer ser capaz de resolver o problema de escoamento sobre corpos de geometrias esbeltas graças a seu tratamento especial de regiões descontínuas.

4.3.1 Fronteira imersa com volume fantasma local

O presente método se diferencia dos métodos de volumes fantasmas tradicionais apresentados anteriormente principalmente na forma em que as células fantasmas são extrapoladas e atualizadas, pois as células internas ao corpo imerso não são diretamente utilizadas, apenas suas coordenadas são tidas como referencias para operações de extrapolação. Os volumes fantasmas são atualizados de tal maneira que o campo de velocidade satisfaz tanto a fronteira imersa quanto a restrição de incompressibilidade no final de cada passo de tempo.

De maneira geral o método diferencia e classifica os volumes eulerianos nas seguintes classificações:

- Células inativas ou sólidas;
- Células ativas ou de fluido.
 - Células regulares;
 - Células irregulares.

A classificação é feita da seguinte forma: volumes nos quais o centro está no interior da fronteira imersa são considerados inativos, enquanto aqueles que estão no exterior da fronteira imersa são considerados ativos. Dentre as células ativas, estas podem ser classificadas como regulares e irregulares. São irregulares as células cortadas pela

superfície da fronteira imersa ou então se, ao menos, um de seus volumes vizinhos é cortado, caso contrário esta célula é regular.

Após obtida a classificação acima, efetuam-se interpolações e extrapolações nos volumes irregulares, de tal maneira que nesses volumes a velocidade é imposta. Já nos pontos regulares vizinhos à fronteira imersa, deve-se alterar suas equações discretizadas para velocidade e pressão de tal forma que valores do fluido no interior do corpo imerso não são empregados.

5. RESULTADOS

Testou-se o caso do escoamento sobre uma placa plana vertical. Comparações foram feitas com resultados provenientes da literatura. Este caso é comparado com os trabalhos de Berthelsen e Faltinsen (2007), Koumoutsakos e Shiels (1996) e Tanji e Honji (1971).

O esquema de configuração do escoamento é ilustrado na Fig. (5), onde é ilustrada a placa vertical posicionada no domínio numérico.

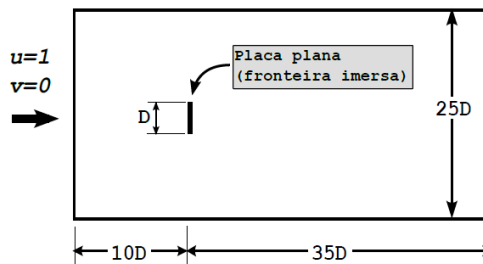


Figura 5. Representação esquemática do escoamento laminar sobre uma placa plana de comprimento D e espessura infinitamente pequena.

A performance do método é apresentada para um número de Reynolds $Re = 126$ baseado no comprimento vertical da placa e na velocidade imposta no perfil de entrada $u = 1 \text{ m/s}$. Nesse escoamento, após determinado intervalo de tempo, instabilidades laminares são geradas. Devido a este fator, as comparações realizadas são relativas a uma evolução temporal, o presente escoamento possui carácter transitório. A Fig. (6) ilustra a avanço temporal do problema. É representado o campo instantâneo de vorticidade para os instantes adimensionais $tU_\infty/D = 0.1, 3.1, 9.2$ e 20.6 .

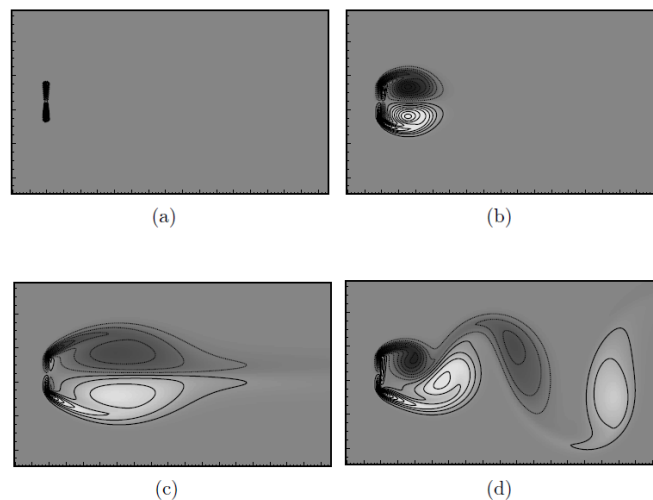


Figura 6. Visualização ampliada, nas proximidades da fronteira imersa, do campo instantâneo de vorticidade do escoamento com iso-contornos sobre uma placa plana para $Re = 126$: (a) $tU_\infty/D = 0.1$; (b) $tU_\infty/D = 3.1$; (c) $tU_\infty/D = 9.2$; (d) $tU_\infty/D = 20.6$.

As Figs. 7-(a) e (b) mostram, respectivamente, a pressão normalizada ou coeficiente de pressão e a distribuição da vorticidade na superfície da placa a jusante e a montante no escoamento no tempo adimensional $tU_\infty/D = 1.0$, nota-se que nas bordas inferior e superior da placa há uma menor concordância entre os resultados do presente trabalho e de Berthelsen e Faltinsen (2007), este fato pode ser atribuído à malha empregada no escoamento, no trabalho de Berthelsen e Faltinsen (2007) foi utilizada malha adaptativa com alto nível de refinamento localizado nas proximidades da placa.

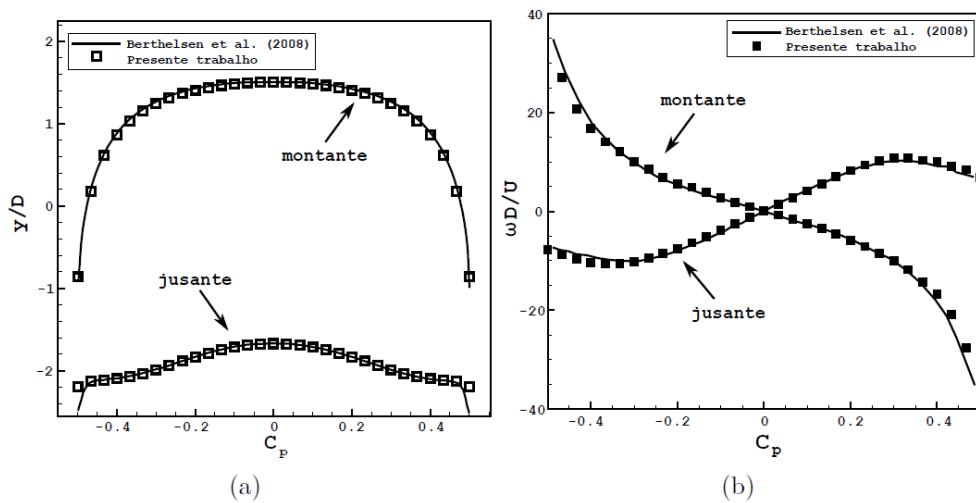


Figura 7. Comparação da distribuição de variáveis na superfície da placa plana no tempo adimensional $tU_\infty/D = 1.0$. (a) Distribuição da pressão normalizada; (b) Distribuição da vorticidade normalizada.

6. REFERÊNCIAS

- BERTHELSEN, P. A.; FALTINSEN, O. M. A local directional ghost cell approach for incompressible viscous flow problem with irregular boundaries.
- KOUMOUTSAKOS, P.; SHIELDS, D. Simulations of the viscous flow normal to an impulsively started and uniformly accelerated flat plate. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 328 177–227, 1996.
- TANJI, S.; HONJI, H. Unsteady flow past a flat plate normal to the direction of motion. *J. Phys. Soc., Jpn.* 30 (1) 262–272, 1971.
- MEUL, Immersed boundary methods. *J. Phys. Soc., Jpn.* 30 (1) 262–272, 1971.
- MITTAL, R.; IACCARINO, G. Immersed boundary methods. *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, v. 37, 239–261, 2005.

7. AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de agradecer ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia e ao Laboratório de Mecânica dos Fluidos por todos os recursos disponibilizados para o trabalho realizado.

Gostaria também de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), PROEX, CAPES, PROPP, FAPEMIG e PETROBRAS pelos recursos financeiros disponibilizados.

8. ABSTRACT

The immersed boundary (IB) methods are used to enforce boundary conditions on surfaces not aligned with the computational mesh in a numerical simulation. Despite the great advantages of the immersed boundary methodology, it is shown in this work that some difficulties and challenges are posed when it is used to simulate the flow past sharp geometries. In present work, two main objectives are proposed: first, to assess the accuracy and efficiency of IB methods in simulations of flows past immersed bodies with highly sharp corners or thin plates. Secondly, we implement a numerical method which is able to satisfy these flow conditions. First, an extensive bibliographic review was conducted in order to know and understand the different immersed boundary methods; in the second stage it was presented and implemented a local directional ghost cell approach.

9. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.