

SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTOS TURBULENTOS SOBRE GEOMETRIAS COMPLEXAS UTILIZANDO MALHA ADAPTATIVA E A METODOLOGIA DA FRONTEIRA IMERSA

Rafael Romão da Silva Melo, Universidade Federal de Uberlândia, faelromelo@gmail.com

João Marcelo Vedovoto, Universidade Federal de Uberlândia, jmvedovoto@mecanica.ufu.br

Millena Martins Villar, Universidade Federal de Uberlândia, millena.villar@gmail.com

Aristeu da Silveira Neto, Universidade Federal de Uberlândia, aristeus@mecanica.ufu.br

Resumo. *Uma das maiores limitações ao se resolver escoamentos turbulentos numericamente é a grande quantidade de volumes, ou pontos, utilizados em uma malha, principalmente quando se trabalha com geometrias complexas. Este trabalho propõe resolver este problema utilizando malha cartesiana bloco-estruturada para modelar o escoamento, a qual é refinada localmente com adaptação dinâmica. Este refinamento é aplicado em pontos próximos à geometria, assim como em regiões onde existe uma maior flutuação de velocidade. Para modelar a geometria foi utilizada a metodologia da fronteira imersa, a qual utiliza uma malha independente para o corpo, e a forma de comunicação entre esta geometria e o escoamento é através de um termo fonte, que é adicionado nas equações de Navier-Stokes. Já a turbulência é modelada através da Simulação das Grandes Escalas. Foram feitos testes em um corpo rombudo (um cubo fixado no chão) e os resultados qualitativos e quantitativos foram comparados com a literatura.*

Palavras chave: *Modelagem de turbulência, Malha multi bloco, Refinamento adaptativo, Metodologia da fronteira imersa*

1. INTRODUÇÃO

Na mecânica dos fluidos, turbulência é um termo usado para descrever o estado de um escoamento específico, o escoamento turbulento. Este tipo de escoamento possui flutuações no campo de velocidade, que são dependentes do tempo e da posição no espaço. Quanto mais intensa é a turbulência, maior é a flutuação da velocidade.

Para implementar novas modelagens e realizar as simulações é utilizado o código AMR3DP, o qual utiliza malha bloco-estruturada tridimensional. Além de permitir um refinamento local fixo, o código permite utilizar uma malha que se adapta dinamicamente ao escoamento, se tornando mais refinada em pontos de interesse no tempo e espaço. Esta funcionalidade é que muito interessante ao se trabalhar com escoamentos turbulentos, pois as estruturas turbilhonares, onde as tensões cisalhantes e flutuações de velocidade são expressivas, são transportadas pelo espaço ao longo do tempo, exigindo assim um refinamento que se locomove junto com as estruturas. E ainda o código suporta processamento paralelo, o que diminui o tempo de simulação expressivamente dependendo da quantidade de processadores utilizados. Assim, toda a implementação realizada deve ser feita para operar em paralelo.

O presente trabalho propõe resolver escoamentos a elevados número de Reynolds, utilizando malha cartesiana multi bloco com adaptatividade dinâmica para modelar o escoamento. E ainda este trabalho incorpora a modelagem da turbulência.

2. MODELO MATEMÁTICO

Nessa seção serão apresentadas as duas formulações matemáticas utilizadas para solução da fluidodinâmica: a formulação euleriana, a qual modela as equações para o domínio contínuo de fluido, e a formulação lagrangiana, a qual modela as equações referentes ao método da fronteira imersa, utilizada para representar os corpos em meio fluido.

2.1 Formulação euleriana

Na formulação euleriana modela-se todo o domínio de cálculo como se este fosse ocupado por um só fluido. A equação para o balanço da quantidade de movimento na forma tensorial é apresentada abaixo:

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

em que p é a pressão, ρ é a densidade do fluido, u_i é a componente i do vetor velocidade, e f_i é a componente i do termo fonte, onde no método da fronteira imersa é o vetor campo de força euleriano, através do qual uma geometria complexa pode ser representada.

E ainda o modelo deve obedecer ao balanço de massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0. \quad (2)$$

Neste trabalho é utilizada a simulação das grandes escalas. Considerando a hipótese de Boussinesq, é calculada então uma viscosidade efetiva, e o modelo utilizado e implementado no código AMR3DP foi o modelo de turbulência Dinâmico proposto por Germano et al. (1991) e modificado por Lilly (1992). Este modelo permite que a turbulência seja modelada de maneira eficiente de acordo com a característica do escoamento, como por exemplo em regiões de esteira, ou então em regiões parietais, situações de escoamento totalmente diferentes.

Para resolver os sistemas lineares provenientes da discretização, o método utilizado no código AMR3DP é o Multigrid. Porém, como é utilizada malha com refinamento local, este método então é denominado Método Multigrid-Multinível, onde existem dois grupos de malhas que podem ser denominados níveis virtuais e níveis físicos. Os níveis virtuais formam a malha base, e são dividido em uma quantidade N_{virt} para aplicar o ciclo do método multigrid. E os níveis físicos formam os blocos de refinamento local, e também pode ser divididos em N_{fis} níveis, sendo que o método multigrid percorre os níveis físicos também.

Conhecidos os níveis físicos e virtuais de uma determinada malha em um dado tempo físico, aplica-se então o método multigrid, como é utilizado em uma malha uniforme.

2.2 Formulação lagrangiana

Na metodologia da fronteira imersa utiliza-se uma malha independente para definir o corpo em meio fluido. Uma das principais vantagens é poder simular escoamentos sobre geometrias complexas utilizando malha cartesiana simples para o domínio euleriano. Neste trabalho será utilizada a multi forçagem direta, proposta por Wang et al. (2008).

O termo força f_i da equação da quantidade de movimento é o responsável por definir a interface imersa. Para calcular esta força utilizamos uma função distribuição:

$$f_i(\vec{x}) = \sum_K \vec{F}(\vec{x}_K) D_{ij}(\vec{x} - \vec{x}_K) \Delta V(\vec{x}_K), \quad (3)$$

sendo $\Delta V(\vec{x}_K)$ é o volume do elemento lagrangiano e D_{ij} representa uma função de interpolação / distribuição. Neste trabalho foi adotada a função chapéu. Esta função mostra que quanto mais distantes estão os volumes eulerianos do ponto lagrangiano menor será o valor da força distribuída naqueles pontos.

Por fim $\vec{F}(\vec{x}_K)$ representa a força no ponto lagrangiano, a qual será distribuída no campo euleriano, delimitando assim a fronteira. Para o calculo desta força utilizamos a Eq. (4):

$$F_i(\vec{X}, t) = \frac{\alpha_2 U_i^{t+\Delta t} - U_i^*}{\Delta t}, \quad (4)$$

onde $U_i^{t+\Delta t}$ representa a velocidade desejada para a fronteira. Se for uma fronteira estacionaria o seu valor é nulo. Se for uma fronteira em movimento o seu valor é igual a velocidade da fronteira. Para o cálculo de U_i^* utilizamos a Eq. (5):

$$U_i^* = \sum_{\Omega} u_i^* D_h(x_i - x_K) h^3, \quad (5)$$

onde D_h é representada por uma função interpolação / distribuição, u^* é a velocidade no ponto euleriano e h é o volume lagrangiano.

Resumindo, na multi forçagem direta calcula-se a velocidade no ponto lagrangiano, posteriormente calcula-se a força no ponto lagrangiano, e por fim esta força é distribuída no domínio euleriano. Este procedimento é realizado de maneira iterativa, até a força convergir para um valor com resíduo mínimo desejado para todos os passos de tempo.

3. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos utilizando o modelo de turbulência dinâmico. O problema físico abordado foi o escoamento sobre um cubo ancorado no chão, problema este que permitirá utilizar a metodologia da fronteira imersa para modelar o cubo.

O tamanho do domínio escolhido tem as dimensões de $2m$ em x , $1m$ em y e $1m$ em z . As condições de contorno são velocidade constante na entrada do domínio, no plano $x = 0$, condição de não deslizamento na parte inferior do domínio,

no plano $z = 0$, simulando a base onde é ancorado o cubo, e condição de domínio aberto para as demais paredes do domínio.

É utilizada uma malha base de $32 \times 16 \times 16$, e 5 níveis físicos de refinamento, sendo que o refinamento inicial é aplicado em torno do cubo e próximo ao chão, regiões onde ocorrem as maiores tensões de cisalhamento e flutuações de velocidade. Ao longo da simulação esta malha se adapta automaticamente ao escoamento, refinando em regiões próximas a fronteira imersa e em regiões de maior vorticidade.

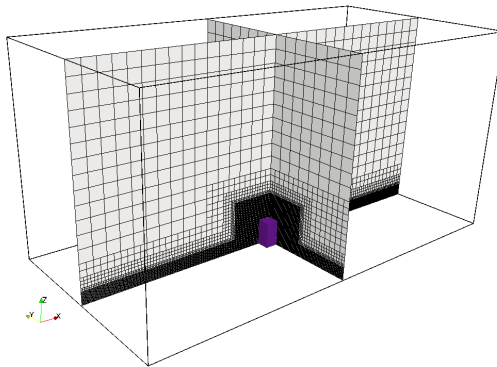


Figura 1. Malha euleriana inicial.

A Figura 2 apresenta iso-superfície do critério Q para número de Reynolds $Re = 1000$, comparados com resultados apresentados por Hwang e Yang (2004). Observa-se que os dados se assemelham com dados da literatura, onde ocorre a formação de duas estruturas rotativas na base do domínio junto ao cubo imerso, denominadas estruturas do tipo ferradura de cavalo. Nas paredes também são criadas estruturas rotativas instáveis, do tipo ondas de Tolmien-Schlichting. Estas estruturas interagem entre si e com o escoamento a jusante do corpo, dando origem a outras instabilidades denominadas grampos de cabelo. Estas estruturas surgem devida a rotação e translação das estruturas criadas na lateral do cubo, o qual gera uma força de sustentação deformando estas estruturas, dando ao turbilhão a aparência de um grampo de cabelo.

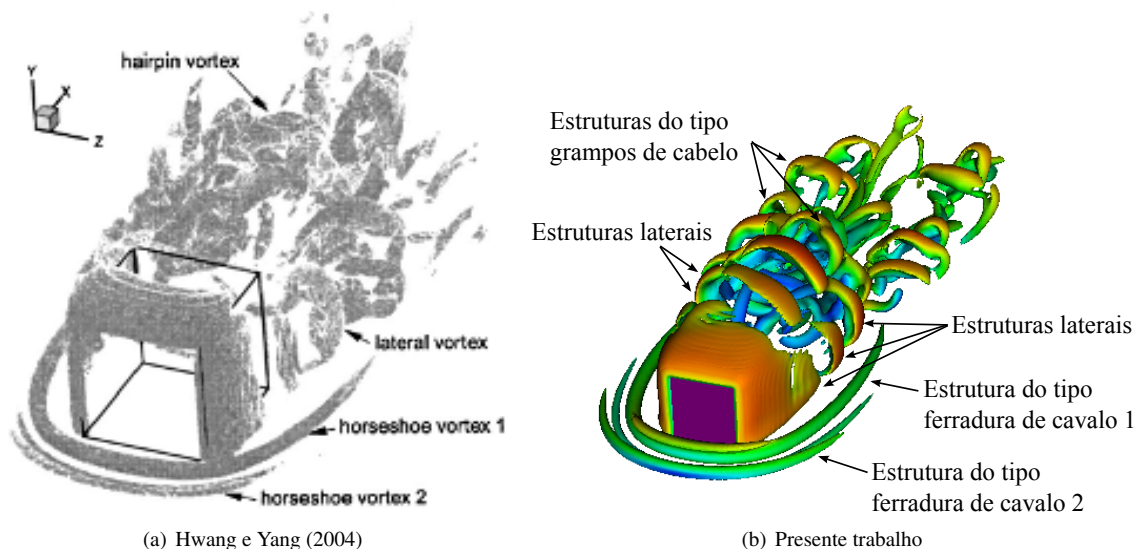


Figura 2. Comparação das iso-superfícies do critério Q com dados da literatura (Hwang e Yang, 2004), para $Re = 1000$

A Figura 3 ilustra as iso-superfícies do critério Q para número de Reynolds $Re = 100000$. Já a montante do cubo observa-se diversas estruturas do tipo ferradura de cavalo, e como o número de Reynolds é muito elevado estas estruturas são instáveis, logo são transformadas em estruturas do tipo grampo de cabelo, o que também acontece com as ondas do tipo Tolmien-Schlichting geradas nas paredes do cubo imerso. Observa-se ainda que na região após o corpo existem inúmeras estruturas do tipo grampo de cabelo, e em uma região mais distante, próxima a saída do domínio estes grampos de cabelo interagem entre si, formando spots turbulentos, estruturas com grande energia cinética turbulenta armazenada. Nota-se ainda a dissipação de algumas estruturas próximas ao chão do domínio. Realizando esta simulação com um domínio mais extenso, estes spots turbulentos dariam origem à turbulência tridimensional plenamente desenvolvida.

A Figura 4 apresenta a mesma imagem anterior, iso-superfícies do critério Q para número de Reynolds $Re = 100000$, juntamente com a malha no plano central, em $y = 0,5$. Nota-se que o maior refinamento ocorre em regiões de forte cisalhamento, sendo elas: a camada limite no chão, próximo ao cubo, e as estruturas turbilhonares geradas.

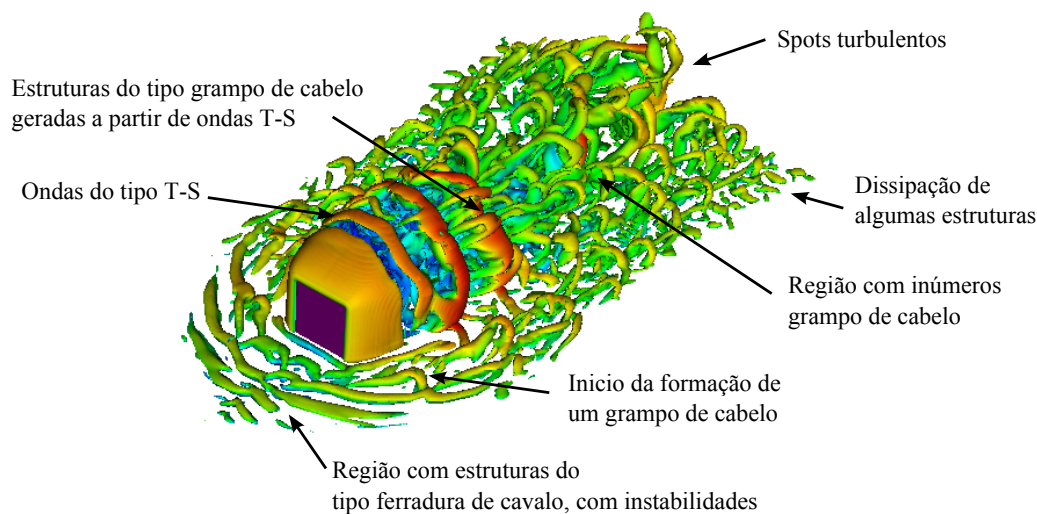


Figura 3. Iso-superfícies do critério Q para $Re = 100000$.

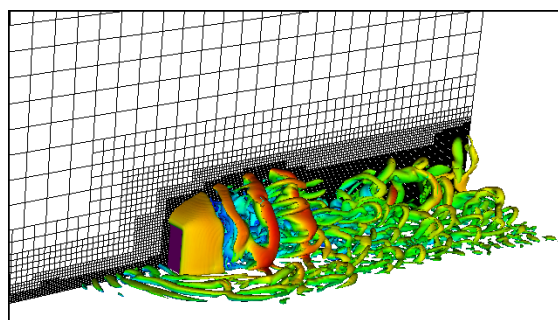


Figura 4. Iso-superfícies do critério Q para $Re = 100000$ e malha no plano $y = 0.5m$

4. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou a simulação do escoamento sobre um cubo utilizando malha cartesiana bloco-estruturada, e a metodologia da fronteira imersa para modelar a geometria. Os resultados foram satisfatórios quando comparados com a literatura, e para os casos turbulentos observa-se a formação das estruturas coerentes esperadas.

Como continuidade deste trabalho, será aprofundado os estudos relativos à fenomenologia da interação entre turbulência, camada limite e parede, englobando a metodologia da fronteira imersa e malha bloco-estruturada. Aplicações devem ser feitas através da simulação numérica de escoamentos turbulentos, objetivando a simulação de um escoamento turbulento inerte em uma câmara de combustão, e também a simulação de um escoamento turbulento inerte em uma câmara de combustão, juntamente com um obstáculo modelado com fronteira imersa.

5. AGRADECIMENTOS

À PROEX, CAPES, CNPq, FAPEMIG e PETROBRAS pelo suporte financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- Germano, M., Piomelli, U., Moin, P.; Cabot, W. H, 1991, "A Dynamic Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model", Physics of Fluids A: Fluid Dynamics, v. 3, n. 7, pp. 1760-1765.
- Hwang, J. Y., Yabg, K. S., 2004, "Numerical study of vortical structures around a wall-mounted cubic obstacle in channel flow", Physics of Fluids, v. 16, n. 7, pp. 2382-2394.
- Lilly, D. A, 1992, Proposed Modification of the Germano Subgrid-Scale Closure Method, Physics of Fluids A: Fluid Dynamics, v. 4, pp. 633-672.
- Wang, Z., Fan, J., Luo, K., 2008, Combined multi direct forcing immersed boundary method for simulating flows with moving particles, International Journal of Multiphase Flow, v. 34, pp. 283-302, 2008.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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