



ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE DIFERENTES METODOLOGIAS DE MODELAGEM DA TURBULÊNCIA: URANS, DES e LES

José Eduardo Santos Oliveira

Laboratório de Transferência de Calor e Massa e Dinâmica dos Fluidos – Faculdade de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Uberlândia – Campus Santa Mônica – Av. João Naves de Ávila, 2.121. CEP 38400 – 902
e-mail: jeolivei@mecanica.ufu.br

Ana Lúcia Fernandes de Lima e Silva

Laboratório de Transferência de Calor e Massa e Dinâmica dos Fluidos – Faculdade de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Uberlândia – Campus Santa Mônica – Av. João Naves de Ávila, 2.121. CEP 38400 – 902
e-mail: alfsilva@mecanica.ufu.br

Francisco José de Souza

Laboratório de Transferência de Calor e Massa e Dinâmica dos Fluidos – Faculdade de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Uberlândia – Campus Santa Mônica – Av. João Naves de Ávila, 2.121. CEP 38400 – 902
e-mail: fjsouza@mecanica.ufu.br

Gilmar Guimarães

Laboratório de Transferência de Calor e Massa e Dinâmica dos Fluidos – Faculdade de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Uberlândia – Campus Santa Mônica – Av. João Naves de Ávila, 2.121. CEP 38400 – 902
e-mail: gguima@mecanica.ufu.br

Aristeu da Silveira-Neto

Laboratório de Transferência de Calor e Massa e Dinâmica dos Fluidos – Faculdade de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Uberlândia – Campus Santa Mônica – Av. João Naves de Ávila, 2.121. CEP 38400 – 902
e-mail: aristeus@mecanica.ufu.br

Resumo: Neste trabalho é apresentada uma extensão do método da fronteira imersa com o modelo físico virtual para simulações a altos Reynolds sobre cilindros estacionários. O escoamento é simulado através da solução numérica das Equações Médias de Reynolds e equações de Navier-Stokes filtradas, usando o método da fronteira imersa para modelar o cilindro. Esta metodologia permite modelar geometrias complexas imersas no escoamento, para isto são utilizadas duas malhas independentes: uma Euleriana para representar o fluido e uma Lagrangiana para modelar a interface sólido-fluido. Foram usados dois modelos de turbulência: o modelo sub-malha de Smagorinsky e o modelo Spalart-Allmaras a uma equação para a viscosidade turbulenta. O modelo de Smagorinsky foi implementado e usado dentro do conceito de LES, enquanto o modelo de Spalart-Allmaras foi usado dentro dos conceitos de URANS e DES. As metodologias LES e DES são, por definição, aplicadas a escoamentos tridimensionais. No presente trabalho elas são aplicadas como aproximações a escoamentos bidimensionais. Resultados preliminares para as diferentes modelagens de turbulência são apresentados sendo comparados com resultados experimentais da literatura.

Palavras-chave: Método da Fronteira Imersa, Modelo Físico Virtual, URANS, DES, LES

1. INTRODUÇÃO

Escoamentos sobre geometrias complexas sempre foi um dos principais interesses em CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Na verdade, a maioria dos problemas reais existentes envolve geometrias complexas, como por exemplo, bioengenharia, aerodinâmica, escoamentos multifásicos, etc. Duas abordagens vêm sendo utilizadas no tratamento deste tipo de problemas: métodos que fazem uso de malhas não-estruturadas e métodos baseados no conceito de fronteira imersa (MFI). Este último foi proposto por Peskin (1977) para simular o escoamento do sangue em válvulas cardíacas, um problema complexo, que envolve essencialmente fronteiras móveis e geometrias complexas.

A principal idéia do método proposto por Peskin é usar duas malhas independentes: uma malha Euleriana é usada para se resolver às equações governantes do escoamento, enquanto, utiliza-se uma malha Lagrangiana para representar o corpo imerso. A interação entre as duas malhas é feita através de um termo fonte de forças que é adicionado às equações de Navier-Stokes. A fronteira imersa exerce uma força em pontos específicos da malha euleriana, simulando o efeito de um corpo imerso no fluido. Este procedimento permite modelar geometrias complexas imersas no escoamento, sem a necessidade de se utilizar malhas complexas que devem se ajustar a geometria do corpo. A principal vantagem dos métodos de fronteira imersa é a economia de memória e processamento durante a geração da malha quando comparado aos métodos que utilizam malhas não estruturadas (Kim et al. 2001). Uma vez que não existe nenhum tipo de dependência geométrica entre as duas malhas o MFI é capaz de tratar facilmente problemas com interfaces móveis sem a necessidade de re-malhagem completa do domínio no tempo.

Outro aspecto fundamental nos métodos de fronteira imersa é como calcular o termo fonte de força. No presente trabalho é utilizado um novo método chamado de Modelo Físico Virtual (MFV) proposto por Lima e Silva et al. (2003). Neste método as força sobre os pontos são calculadas a partir das equações de Navier-Stokes. Uma vez que o método é baseado somente nas leis de conservação, não existem constantes *ad-hoc* a serem ajustadas.

O método de fronteira imersa usando o modelo físico virtual tem permitido obter bons resultados na simulação de diferentes casos. Por exemplo, em problemas envolvendo geometrias simples, como escoamento a baixos Reynolds sobre cilindros estacionários (Lima e Silva et al. 2003) e também escoamentos complexos sobre corpos rombudos e múltiplos corpos estacionários (Lima e Silva et al. 2004). Silva et al. (2004) simulou escoamentos sobre cilindros rotativos e oscilantes até Reynolds 1000, os resultados obtidos foram comparados a resultados experimentais mostrando uma boa concordância. Arruda (2004) utilizou o método de fronteira imersa para simular escoamentos sobre uma cavidade aberta rasa com fundo móvel periódico. Oliveira et al. (2004) apresentou a simulação de um escoamento no regime laminar em torno de um cilindro de diâmetro variável no tempo.

No presente trabalho, é utilizado o método MFI/MFV para simular escoamentos a Reynolds maiores que 3000 sobre cilindros estacionários. Foram utilizadas três diferentes metodologias de modelagem da turbulência: Equações Médias de Reynolds Transiente (URANS – *Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations*), Modelagem Híbrida da Turbulência (DES – *Detached Eddy Simulation*) e Simulações de Grandes Escalas (LES – *Large Eddy Simulation*). Para o cálculo da viscosidade turbulenta, foi utilizado o modelo sub-malha de Smagorinsky para a metodologia LES e o modelo de Spalart-Almaras (S-A) para URANS e DES. As metodologias LES e DES são usadas como aproximação bidimensional. Os resultados obtidos nas simulações com os diferentes modelos de turbulência foram comparados entre si e com resultados de outros autores.

2. MODELO MATEMÁTICO

2.1 Domínio do Fluido

O domínio de cálculo é tratado como se estivesse ocupado somente por fluido podendo ser sempre retangular, independente da geometria do corpo imerso. O escoamento é modelado pelas equações de Navier-Stokes, Eq. (1), e pela equação da continuidade, Eq. (2), para escoamentos incompressíveis:

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

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

Observa-se que a Eq. (1) já é a equação filtrada de Navier-Stokes, onde foi utilizada a hipótese de Boussinesq para modelar o tensor de Reynolds. Estas equações são resolvidas na malha euleriana e o acoplamento entre as duas malhas é feito pelo termo fonte de força f_i , que é diferente de zero somente sobre a interface imersa. A Equação (3) modela a interação entre a interface sólido-fluido e o escoamento, distribuindo a força lagrangiana nos pontos da malha euleriana:

$$\vec{f}(\vec{x}) = \int_{\Omega} \vec{F}(\vec{x}_k, t) \delta(\vec{x} - \vec{x}_k) d\vec{x}_k, \quad (3)$$

onde $\vec{F}$ é a densidade de força lagrangiana nos pontos $\vec{x}_k$ sobre a interface e $\delta(\vec{x} - \vec{x}_k)$ é a função delta de Dirac.

Para proceder a discretização, a função delta de Dirac que aparece na Eq. (3), deve ser substituída pela função de distribuição D_{ij} . Esta função age como uma função peso do tipo Gaussiana, a qual guarda a propriedade de integral unitária no intervalo $[-\infty, +\infty]$. Portanto a Eq. (3) é substituída por:

$$\vec{f}(\vec{x}) = \sum D_{ij}(\vec{x} - \vec{x}_k) \vec{F}(\vec{x}_k, t) \Delta s^2, \quad (4)$$

onde Δs é a distância entre dois pontos lagrangianos consecutivos e D_{ij} é dada por:

$$D_{ij}(\vec{x}_k) = \frac{f[(x_k - x_i)/h] f[(y_k - y_i)/h]}{h^2}, \quad (5)$$

$$f(r) = \begin{cases} f_1(r) & \text{se } \|r\| < 1 \\ \frac{1}{2} - f_1(2 - \|r\|) & \text{se } 1 < \|r\| < 2, \text{ onde: } f_1(r) = \frac{3 - 2\|r\| + \sqrt{1 + 4\|r\| - 4\|r\|^2}}{8} \\ 0 & \text{se } \|r\| > 2 \end{cases} \quad (6)$$

com r podendo ser $(x_k - x_i)/h$ ou $(y_k - y_i)/h$ dependendo da direção adotada, h é o tamanho da malha euleriana e (x_i, y_i) são os pontos eulerianos.

2.2. Interface Sólido-Fluido

A força que o fluido exerce sobre o corpo imerso é avaliada pelo MFV, a densidade de força $\vec{F}$ é calculada sobre um ponto lagrangiano (Fig. 1) usando os termos da equação de Navier-Stokes. A força lagrangiana é expressa por:

$$\vec{F}(\vec{x}_k, t) = \vec{F}_a(\vec{x}_k, t) + \vec{F}_i(\vec{x}_k, t) + \vec{F}_v(\vec{x}_k, t) + \vec{F}_p(\vec{x}_k, t). \quad (7)$$

Os diferentes termos do lado direito da Eq. (7), são denominados respectivamente como: força de aceleração, força inercial, força viscosa e força de pressão, as quais são definidas pelas Eq. de (8) à (11):

$$\vec{F}_a(\vec{x}_k, t) = \rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t}(\vec{x}_k, t), \quad (8)$$

$$\vec{F}_i(\vec{x}_k, t) = \rho(\vec{V} \cdot \vec{\nabla})\vec{V}(\vec{x}_k, t), \quad (9)$$

$$\vec{F}_v(\vec{x}_k, t) = -\vec{\nabla} \cdot [(\nu + \nu_t)(\vec{\nabla}\vec{V} + \nabla^T\vec{V})], \quad (10)$$

$$\vec{F}_p(\vec{x}_k, t) = \vec{\nabla}p(\vec{x}_k, t). \quad (11)$$

As quatro componentes da densidade de força são calculadas sobre um volume de controle centrado em um ponto Lagrangiano, como ilustrado na Fig. (1).

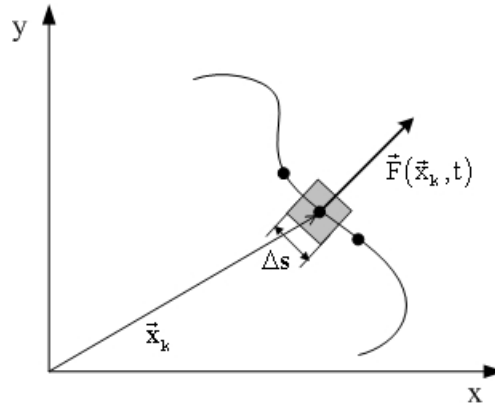


Figura 1: Volume de controle centrado em um ponto lagrangiano genérico.

Para calcular os termos densidade de força lagrangiana é preciso conhecer a priori os campos de velocidade e pressão. Estes campos são calculados sobre a malha euleriana, enquanto o termo de força deve ser calculado sobre a interface. Para contornar este problema os campos eulerianos são interpolados sobre pontos lagrangianos auxiliares como mostrado por Lima e Silva et al. (2003).

3. MODELAGEM DA TURBULÊNCIA

As equações de Navier-Stokes são capazes de simular com uma boa precisão uma extensa gama de problemas em engenharia, incluindo escoamentos turbulentos. Entretanto é necessário resolver todos os graus de liberdade do escoamento, o qual se estima como sendo proporcional a $Re^{9/4}$. Esta técnica é chamada de Simulação Numérica Direta (*DNS – Direct Numerical Simulation*) e é obviamente restrita a escoamentos a baixos Reynolds considerando os atuais recursos computacionais disponíveis, devido à alta resolução de malha exigida para a resolução completa do problema.

Uma maneira alternativa de tratar este tipo de problema é o uso do processo de decomposição de escalas de Reynolds ou mais recentemente do processo de filtragem proposto por Germano (1986). As equações governantes são apropriadamente filtradas, este procedimento dá origem ao *problema de fechamento da turbulência*, que é atualmente resolvido com os ditos modelos de turbulência.

Diferentes metodologias têm sido empregadas na modelagem da turbulência dos fluidos, modelos baseados no conceito de RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) são considerados os mais práticos e usuais modelos de turbulência existentes (Kapadia e Roy, 2003). Os modelos RANS são obtidos decompondo as variáveis dependentes da equação de Navier-Stokes em componentes filtradas e componentes flutuantes e então se filtra todos os termos. Como foi visto faz-se necessário o uso de suposições adicionais para o problema de fechamento, ou seja, modelos de turbulência. Uma terminologia bastante comum encontrada na literatura é URANS (*Unsteady RANS*) usada para se referir a modelos do tipo RANS que tiveram termos transientes incorporados a sua formulação, maiores detalhes sobre esta nomenclatura pode ser encontrado em Silveira-Neto et al. (2002).

Outra metodologia denominada LES é filosoficamente mais próxima a DNS do que a URANS. Na metodologia LES as maiores estruturas são resolvidas por equações filtradas e somente as menores estruturas são modeladas, uma vez que estas são mais homogêneas e isotrópicas (Silveira-Neto, 2003). A escala das pequenas estruturas é determinada pelo tamanho da malha usada para a solução das equações filtradas, ou seja, a largura do filtro torna-se uma função da malha. Desta forma as estruturas turbulentas que são menores do que a resolução da malha são modeladas pelos chamados modelos sub-malha.

A metodologia DES proposta por Spalart et al. (1997), trata-se de um método conceitual de modelagem híbrida e não está ligado a nenhum modelo específico de turbulência. A idéia é combinar as melhores características das metodologias URANS e LES em um único modelo de turbulência. Um modelo do tipo URANS é utilizado nas regiões perto das paredes, onde esta classe de modelos mostra bons resultados com uma menor resolução de malha quando comparado com a metodologia LES. Já para regiões distantes das paredes, usam-se modelos LES, uma vez que esta metodologia consegue capturar com um maior nível de detalhes as estruturas físicas do escoamento.

No presente trabalho foram empregadas três diferentes metodologias de modelagem da turbulência: URANS, DES e LES. Foram usados dois modelos de turbulência, o modelo sub-malha de Smagorinsky e o modelo de turbulência de Spalart-Allmaras usado no contexto de URANS e DES. As formulações destes modelos são discutidas nas seções seguintes.

3.1. Modelo Sub-malha de Smagorinsky

Neste trabalho é utilizado o modelo de turbulência proposto por Smagorinsky (1963), para a metodologia LES. Este modelo sub-malha é baseado no balanço entre a produção de energia cinética turbulenta e a dissipação isotrópica da energia turbulenta. A viscosidade turbulenta é calculada em função da taxa de deformação (S_{ij}) e da escala de comprimento (ℓ):

$$\nu_t = (C_s \ell)^2 \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}}, \quad (12)$$

onde $C_s = 0,18$ é a constante de Smagorinsky e $\ell = \sqrt{\Delta x \Delta y}$ é o comprimento da escala sub-malha.

3.2. Modelo de Spalart-Allmaras

Spalart e Allmaras (1994) propuseram um novo modelo (S-A) do tipo URANS a uma equação de transporte para o cálculo da viscosidade turbulenta. A equação para a viscosidade turbulenta é construída usando principalmente considerações empíricas de diferentes tipos de escoamentos, análise dimensional e aplicando o princípio da relatividade de Galileu para a viscosidade turbulenta. Este modelo tem sido usado com bastante sucesso na simulação de escoamentos aerodinâmicos.

O modelo S-A usa uma variável de trabalho $\tilde{\nu}$ dada pela seguinte equação de transporte:

$$\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial t} + \frac{\partial(u_j \tilde{\nu})}{\partial x_j} = c_{b1} \tilde{S} \tilde{\nu} - c_w f_w \left[\frac{\tilde{\nu}}{d_w} \right]^2 + \frac{1}{\sigma} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left((\nu + \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right) + c_{b2} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right], \quad (13)$$

onde os termos do lado direito representam, respectivamente: a produção de viscosidade turbulenta, termo de destruição que reduz a viscosidade turbulenta junto à parede, termo de difusão da viscosidade turbulenta e molecular, sendo o ultimo termo representa a dissipação da viscosidade turbulenta. O modelo S-A original inclui termos responsáveis pela transição suave do regime laminar para o turbulento, no presente trabalho tais termos estão sendo negligenciados.

A viscosidade turbulenta é definida em termos da variável de trabalho $\tilde{\nu}$ e de uma função de parede f_{wl} , dadas por:

$$\nu_t = \tilde{\nu} \cdot f_{v1}, \quad f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + c_{v1}^3} \quad e \quad \chi \equiv \frac{\tilde{\nu}}{\nu}. \quad (14)$$

O parâmetro $\tilde{S}$, presente no termo de produção da Eq. (13), pode ser escrito como:

$$\tilde{S} \equiv S + \frac{\tilde{\nu}}{(\kappa d_w)^2} f_{v2} \quad e \quad f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}}. \quad (15)$$

onde d_w é a distância até a parede mais próxima e S o módulo da taxa de deformação, dada por:

$$S = \sqrt{2 \overline{S_{ij}} \overline{S_{ij}}}. \quad (16)$$

A função de destruição junto à parede f_w é:

$$f_w = g \left(\frac{1 + c_{w3}^6}{g^6 + c_{w3}^6} \right)^{1/6}, \quad g = r + c_{w2} (r^6 - r) \quad e \quad r \equiv \frac{\tilde{\nu}}{\tilde{S} \kappa^2 d_w^2}. \quad (17)$$

As demais constantes do modelo são:

$$c_{w1} = \frac{c_{b1}}{\kappa^2} + \frac{(1+c_{b2})}{\sigma}, \quad c_{w2} = 0,3, \quad c_{w3} = 2, \quad (18)$$

$$\kappa = 0,41, \quad c_{v1} = 7,1, \quad \sigma = 2/3, \quad c_{b1} = 0,1355, \quad c_{b2} = 0,622.$$

O modelo S-A foi originalmente baseado na filosofia URANS, neste modelo a distância até a parede mais próxima d_w é usada como comprimento de escala. Entretanto, na formulação DES do modelo S-A a variável d_w é substituída por um novo comprimento de escala $\tilde{d}$, definido como:

$$\tilde{d} \equiv \min(d_w, C_{DES} \Delta) \quad onde \quad \Delta \equiv \max(\Delta x, \Delta y). \quad (19)$$

Se $\tilde{d} = d_w$, isto é, na região de camada limite o modelo age no modo URANS. Nas regiões longe das paredes, o comprimento de escala torna-se dependente da malha $\tilde{d} = C_{DES} \Delta$ e o modelo opera em seu modo LES. Isto pode ser visto quanto os termos de produção e destruição do modelo S-A estão balanceados ele atua de maneira similar ao modelo sub-malha de Smagorinsky ($\nu \propto \Delta^2 S$). Shur et al. (1999) ajustou a constante adicional do modelo $C_{DES} = 0,65$ para o caso de turbulência homogênea, este valor é usado neste trabalho sem modificações.

4. MÉTODO NUMÉRICO

As equações governantes, Eq. (1) e (2), foram discretizadas no espaço usando o método de diferenças finitas centradas e no tempo pelo método de Runge-Kutta de segunda ordem. O acoplamento pressão-velocidade feito pelo método dos passos fracionados, como proposto por Armfield e Street (1999), que consiste em resolver o seguinte sistema de equações:

$$\frac{\bar{u}_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^n}{\partial x_i} - \frac{\partial (u_i u_j)^n}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial u_i^n}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j^n}{\partial x_i} \right) \right] + f_i^n, \quad (20)$$

$$\frac{\partial^2 \phi^{n+1}}{\partial x_j \partial x_j} = \frac{\rho}{\Delta t} \frac{\partial \bar{u}_j^{n+1}}{\partial x_j}, \quad (21)$$

$$u_i^{n+1} = \bar{u}_i^{n+1} - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{\partial \phi^{n+1}}{\partial x_i}, \quad (22)$$

$$p^{n+1} = p^n + \phi^{n+1}. \quad (23)$$

O sistema linear para a correção de pressão é resolvido usando o MSI (*Modified Strongly Implicit Procedure*) proposto por Schneider e Zedan (1981). Observe que o cálculo do campo de força sobre a interface e a solução das equações de momento são feitos de maneira explícita

O domínio de cálculo é mostrado na representação esquemática da Fig. (2), que tem comprimento de $50d$ e largura de $25d$, discretizado por uma malha euleriana uniforme de 800×400 pontos. O cilindro imerso tem diâmetro igual a d com o centro posicionado a $16,5d$ da entrada do domínio e a $12,5d$ na vertical.

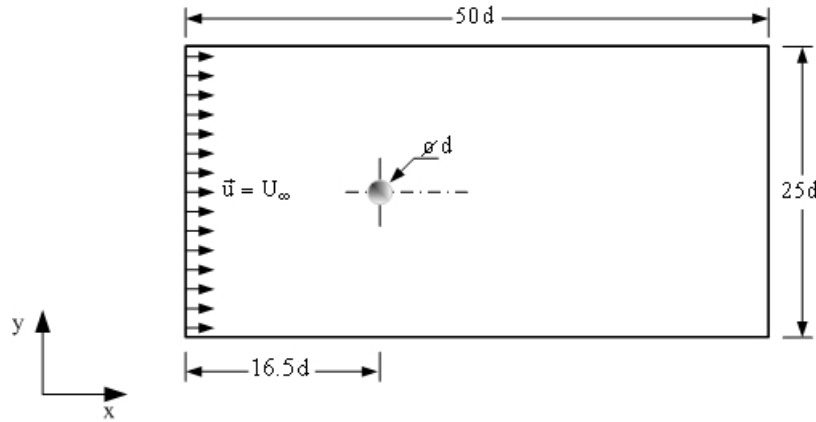


Figura 2: Esquema do domínio de cálculo.

Um perfil de velocidade constante igual a U_∞ foi imposto na entrada do domínio, de maneira que o escoamento se desenvolva da esquerda para a direita. Nas demais faces do domínio foram impostas condições de Neumann para a velocidade. Para a correção de pressão, foi imposto derivada nula na entrada e zero nas demais faces.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados alguns resultados preliminares para o escoamento bi-dimensional sobre um cilindro circular estacionário. O cilindro imerso é representado pelo método MFI/MFV. Três modelos de turbulência (S-A/URANS, S-A/DES e Smagorinsky/LES) foram empregados para a simulação de dois diferentes números de Reynolds: 3×10^3 e 1×10^4 . Um teste caso a $Re_D = 6 \times 10^5$ (*drag crisis*) foi também simulado usando o modelo S-A baseado no conceito de URANS.

A Figura (3) mostra a viscosidade efetiva e os campos de vorticidade para o escoamento a $Re_D = 1 \times 10^4$. A viscosidade efetiva perto da parede calculada pelo modelo URANS tem a mesma magnitude da viscosidade molecular ($\nu = 1 \times 10^{-3}$), para regiões à jusante do cilindro, região da esteira, a viscosidade efetiva assume valores elevados. Inibindo o desprendimento de vórtices como pode ser observado na Fig. (3-b).

Diferentemente, a viscosidade efetiva calculada pelo modelo de Smagorinsky apresenta elevados valores nas regiões parietais. Isto é devido ao fato que o modelo de Smagorinsky não amortece a viscosidade turbulenta perto das paredes (esta é uma deficiência do modelo). Como se sabe este comportamento não é fisicamente consistente, porque as regiões de camada limite apresentam velocidades relativamente baixas e conseqüentemente não deveriam apresentar altos valores para a viscosidade efetiva. Altos valores da viscosidade efetiva perto da parede podem causar o descolamento prematuro da camada limite, não é muito bem observado em escoamentos em torno de cilindros devido as características geométricas destes corpos.

De fato simulações preliminares do escoamento sobre aerofólios NACA 0012 mostram que a metodologia LES conduz a um descolamento prematuro da camada limite mesmo para baixos ângulos de ataque. Entretanto, para regiões distantes das paredes LES consegue capturar um espectro maior de fenômenos físicos, como mostrado na Fig. (3-b) observe que para LES as estruturas formadas atrás do cilindro são mais coerentes.

A metodologia DES mostra um comportamento intermediário entre LES e URANS. A viscosidade efetiva calculada pelo modelo S-A/DES, na região da esteira é menos intensa que os valores calculados pelo modelo S-A tradicional (URANS), como conseqüência pode-se visualizar os vórtices sendo transportados pelo escoamento, entretanto a metodologia DES apresenta maior viscosidade efetiva do que LES nesta região do escoamento. O modelo S-A/DES calculou valores máximos da viscosidade efetiva na zona próxima as paredes do corpo imerso (assim como o modelo de Smagorinsky). Mas estes altos valores estão concentrados somente sobre uma pequena região da parede onde ocorre um elevado nível de tensão, para todos os outros pontos da parede DES fornece resultados similares a modelagem URANS, isto é, viscosidade turbulenta próxima de zero.

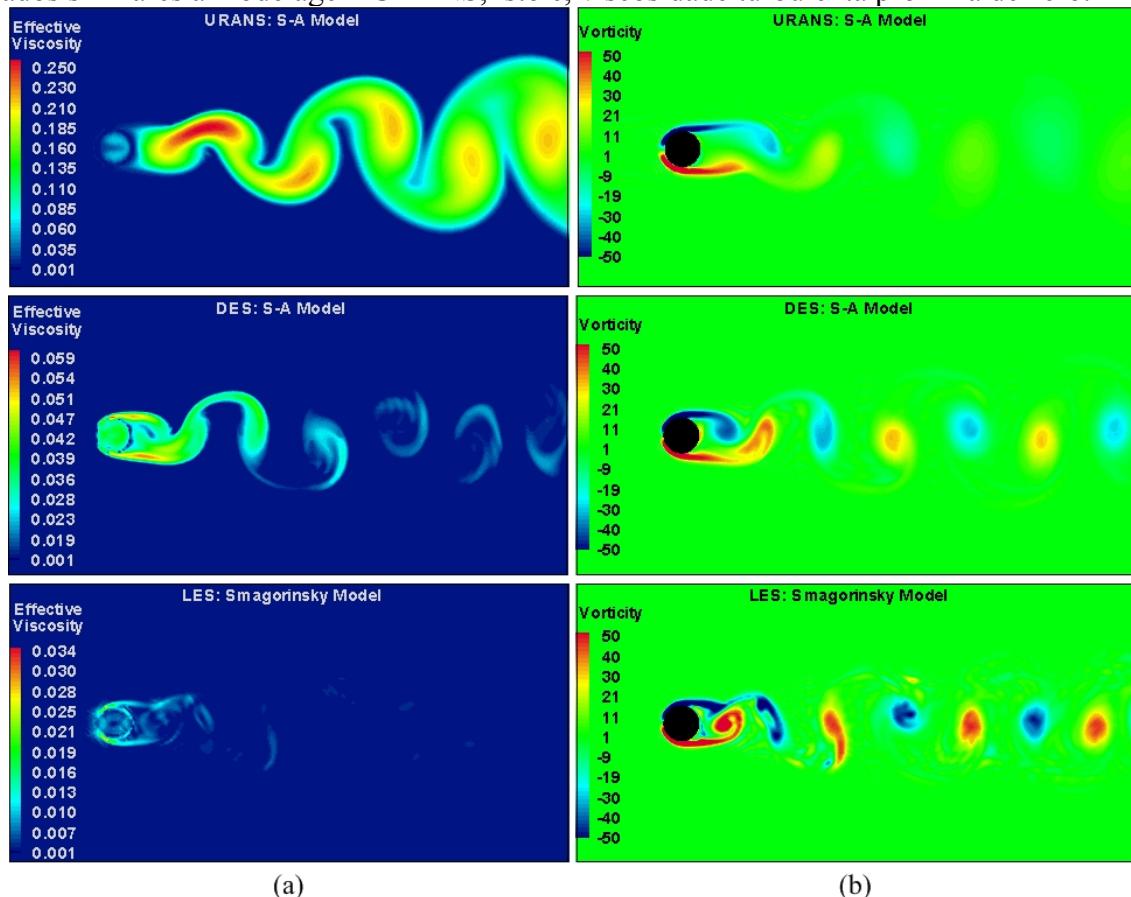


Figura 3: Campos para $Re_D = 1 \times 10^4$: (a) viscosidade efetiva (b) campo de vorticidade.

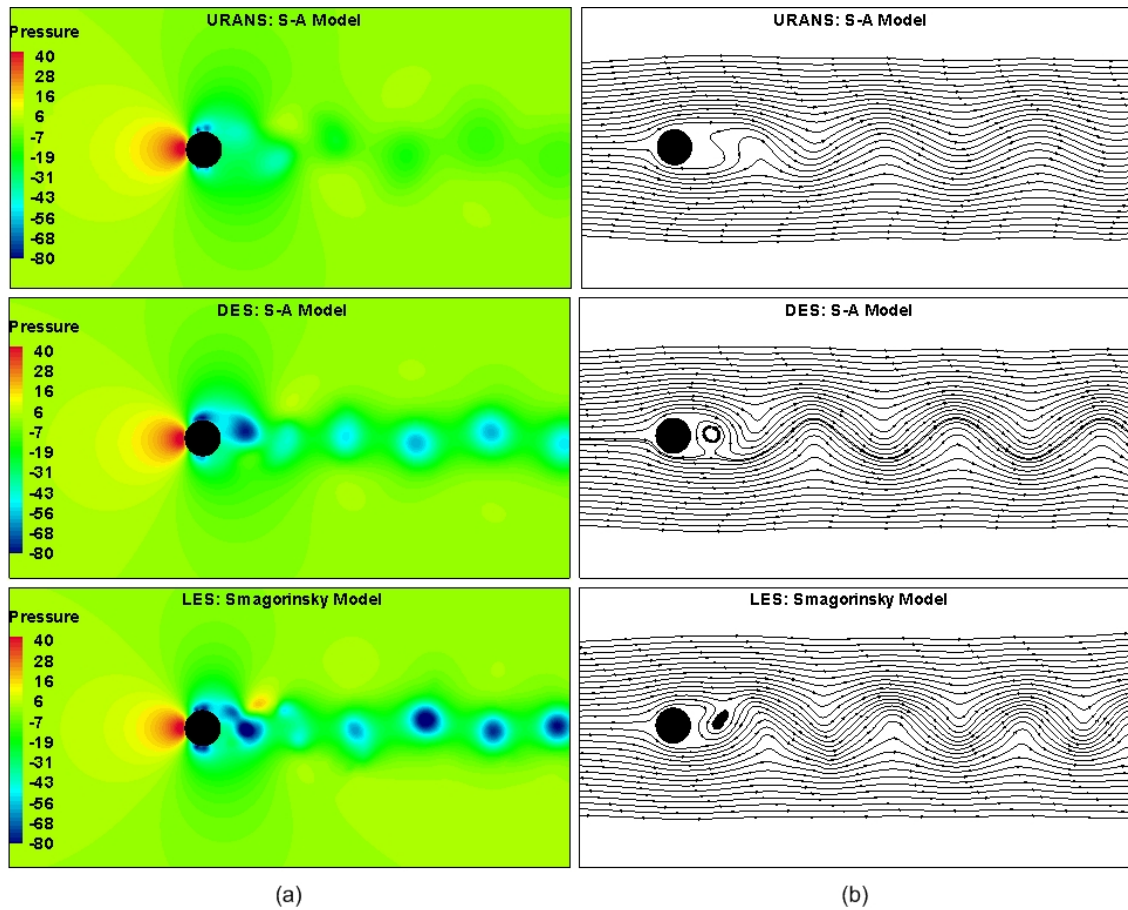


Figura 4: Campos para $Re_D = 1 \times 10^4$: (a) correção da pressão (b) linhas de corrente.

A visualização do campo de pressão e das linhas de corrente para os diferentes modelos de turbulência são mostrados na Fig. (4), para o escoamento a $Re_D = 10^4$. Observa-se que para todas modelagens as linhas de corrente, Fig. (4-b), desviam-se do corpo virtualmente imerso, dando origem a bolhas de recirculação instáveis. Nota-se também a influência dos modelos de turbulência sobre os vórtices, as linhas de corrente apresentam-se mais suaves e com uma menor amplitude à medida que se caminha dos resultados do modelo LES para o modelo URANS.

Os perfis da componente horizontal da velocidade extraídos sobre o cilindro ($Re_D = 1 \times 10^4$) são mostrados na Fig. (5). Os resultados dos três modelos de turbulência são similares, calculando bem a camada limite. Para os dois últimos perfis LES apresentou maiores oscilações porém com pequenas amplitudes.

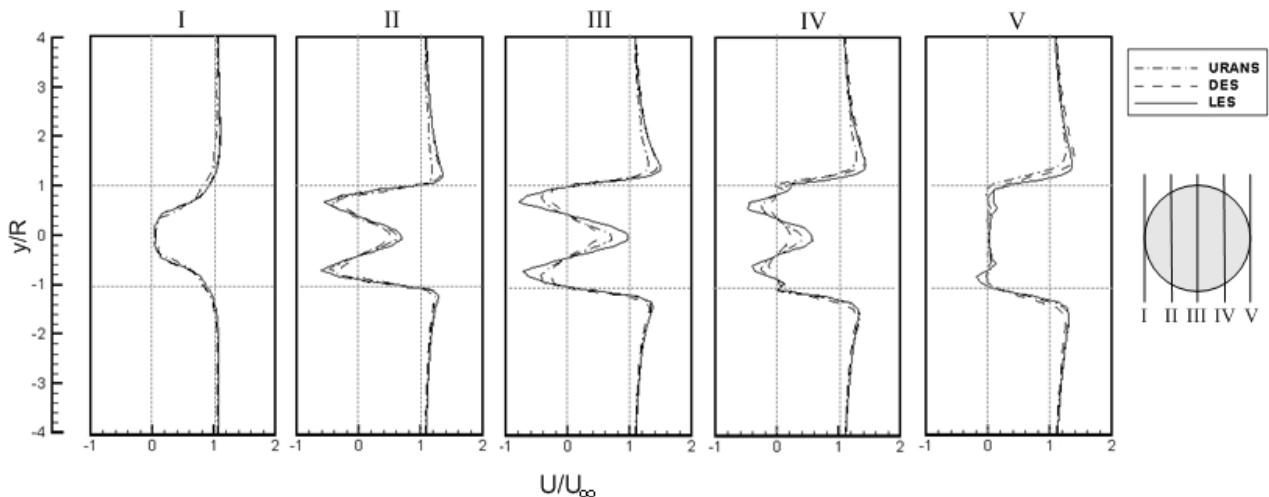


Figura 5: Perfis de velocidade em diferentes seções do cilindro imerso.

O coeficiente de arraste médio (C_D) foi calculado para todos os casos simulados, os resultados são apresentados na Tab. (1). Foi também calculada a frequência adimensional de desprendimento de vórtices, número de Strouhal (St), o qual é apresentado na Tab. (2).

Tabela 1: Coeficiente de arraste médio

Número de Reynolds	Presente Trabalho			Sucker e Brauer (Correlação Empírica)
	<i>URANS</i>	<i>DES</i>	<i>LES</i>	
3×10^3	0,976	1,194	1,164	0,936
1×10^4	0,977	1,266	1,159	1,091
6×10^5	0,959	—	—	—

Os valores do coeficiente de arrasto obtidos pelo modelo URANS apresentaram uma boa concordância com relação aos valores da correlação empírica de Sucker e Brauer (White, 1991), já os resultados para o C_D obtidos pelas metodologias LES e DES ficaram relativamente maiores. Para o caso a $Re_D = 6 \times 10^5$, simulado com o modelo URANS o C_D superestima os resultados experimentais medidos por Wieselsberger (C_D abaixo de 0,4, Schlichting, 1979). Como a crise do arrasto está associada a transição da camada limite para o regime turbulento, fenômeno tipicamente tridimensional, e portanto difícil de ser simulado corretamente por uma aproximação bidimensional.

Tabela 2: Número de Strouhal calculado

Número de Reynolds	Presente Trabalho		
	<i>URANS</i>	<i>DES</i>	<i>LES</i>
3×10^3	0,202	0,217	0,229
1×10^4	0,196	0,214	0,235
6×10^5	0,188	—	—

Os resultados para o St obtidos nas simulações do presente trabalho mostraram um bom ajuste com relação aos resultados da literatura. Para esta faixa de Reynolds ($10^3 \leq Re_D \leq 10^5$) o St é aproximadamente constante em torno de 0,2. A variação dos valores calculado para St entre as diferentes metodologias de modelagem da turbulência provavelmente está associado as próprias características de cada metodologia. Como mencionado anteriormente, modelos do tipo URANS capturam

8. REFERÊNCIAS

- Armfield, S. e Street, R., 1999, “The Fractional-Step Method for the Navier-Stokes Equations on Staggered Grids: The Accuracy of Three Variations”, *Journal of Computational Physics*, 153.
- Arruda, J. M. (2004). *Modelagem Matemática de Escoamentos Internos Forçados Utilizando o Método da Fronteira Imersa e o Modelo Físico Virtual*. Ph. D. thesis, UFU.
- Germano, M. (1986). A proposal for a redefinition of the turbulent stresses in filtered navier-stokes equations. *Phys.Fluids* 29(7), 2323–2324.
- Kapadia, S. and S. Roy (2003). Detached eddy simulation over a reference ahmed car model. In *Proceedings of the 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Number AIAA-2003-0857.
- Kim, J., D. Kim, and H. Choi (2001). An immersed-boundary finite-volume method for simulations of flow in complex geometries. *Journal of Computational Physics* 171, 132–150.
- Lima e Silva, A. L. F., A. R. Silva, and A. Silveira-Neto (2004). Numerical simulations of two-dimensional complex flows over bluff bodies using the immersed boundary method. Unpublished.
- Lima e Silva, A. L. F., A. Silveira-Neto, and J. J. R. Damasceno (2003). Numerical simulation of two dimensional flows over a circular cylinder using the immersed boundary method. *Journal of Computational Physics* 189, 351–370.
- Oliveira, J. E. S., A. F. L. Lima e Silva, G. Guimarães, and A. Silveira-Neto (2004). Simulação numérica do escoamento a baixo reynolds sobre um cilindro de diâmetro variável usando MFI / MFV. 10° Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering.
- Peskin, C. S. (1977). Numerical analysis of blood flow in the heart. *Journal of Computational Physics* 25, 220–252.
- Schlichting, H. (1979). *Boundary-Layer Theory*. New York, USA: McGraw-Hill Book Company.
- Schneider, G. E. and M. Zedan (1981). A modified strongly implicit procedure for the numerical solution of field problems. *Numerical Heat Transfer* 4, 1–19.
- Shur, M., P. Spalart, M. Strelets, and A. Travin (1999). Detached-eddy simulation of an airfoil at high angle of attack. In *4th Int. Sym. on Eng. Turbulence Modelling and Measurements*.
- Silva, A. R., G. B. Carvalho, S. S. Lima e Silva, A. F. L. Mansur, and A. Silveira-Neto (2004). Modelagem matemática e simulação numérica de escoamentos sobre corpos móveis utilizando-se o método da fronteira imersa. 10° Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering.
- Silveira-Neto, A. (2003). *Introdução Turbulência dos Fluidos*, Apostila do Curso de Pós-Graduação em Eng. Mecânica. LTCM/FEMEC/UFU.
- Silveira-Neto, A., S. S. Mansur, and J. M. Silvestrini (2002). Equações da turbulência: Média versus filtragem. In *Anais da 3° Escola de Turbulência*, Florianópolis - SC.
- Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with primitive equations. *Monthly Weather Review* 91, 99–164.
- Spalart, P. R. and S. R. Allmaras (1994). A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. *La Recherche Aérospatiale* 1, 5–21.
- Spalart, P. R., W.-H. Jou, M. Strelets, and S. R. Allmaras (1997). Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach. In *Advances in DNS/LES*, 1st AFOSR Int. Conf. On DNS/LES, Columbus, Ohio. Greyden Press.
- White, F. M. (1991). *Viscous Fluid Flow*. New York, USA: McGraw-Hill Book Company.

