



08 a 11 de Outubro de 2018
Instituto Federal Fluminense
Búzios - RJ

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE MALHA E DOS MODELOS SUBMALHA NA SIMULAÇÃO DAS GRANDES ESCALAS DE ESCOAMENTOS TURBULENTOS EM TUBOS

Bernardo Coelho¹ - bernardocoelho1522@gmail.com

Guilherme da Silva Teixeira² - teixeirasguilherme@gmail.com

Lourival J. Mendes Neto³ - lourival.mendes@unifei.edu.br

Guillermo Vilalta-Alonso⁴ - gvilalta@ufs.br

¹Discente Curso Engenharia Mecânica, UFSJ - SJDR, MG, Brasil

²Discente Programa de Pós-Graduação Engenharia da Energia, UFSJ - SJDR, MG, Brasil

³Instituto de Engenharia Mecânica - IEM - Universidade Federal de Itajubá - Itajubá, MG, Brasil

⁴Departamento de Ciências Térmicas e dos Fluidos, UFSJ, MG, Brasil

Abstract. A crescente evolução no poder dos computadores permitiu que alguns escoamentos turbulentos encontrados em aplicações de engenharia fossem reproduzidos pela Simulação das Grandes Escalas (LES). Neste trabalho, a influência de diferentes parâmetros de malhas e modelos submalha são analisados na modelagem LES de escoamentos turbulentos em tubos a baixo número de Reynolds usando a versão acadêmica do software ANSYS® Fluent® 19.0. Três malhas com diferentes níveis de refinamento e os modelos submalha WALE, Smagorinsky Dinâmico e WMLES são avaliados juntamente com a ausência de modelagem. Os resultados mostram a importância dos parâmetros de malha para a eficiência computacional de LES em contextos industriais e como os modelos submalha são essenciais para a correta representação do fenômeno da turbulência. Nas condições do presente trabalho, parâmetros de malha similares aos da malha B combinados com os modelos WALE e Smagorinsky Dinâmico são capazes de reproduzir com alta precisão as estatísticas de primeira e segunda ordem de escoamentos turbulentos em tubos.

Keywords: Modelagem da turbulência, LES, Perfil de velocidade, RMS, Resolução de malha

1. INTRODUÇÃO

A crescente evolução na potência e na capacidade de processamento dos computadores e a competição industrial possibilitaram a reprodução de escoamentos turbulentos em contextos industriais através da Simulação das Grandes Escalas (LES). Dessa forma, LES deixou de ser uma técnica exclusiva dos centros de pesquisa para se tornar uma ferramenta indispensável no suporte ao *design* industrial, onde já é parte integrante dos modelos de turbulência disponíveis

nos *softwares* de dinâmica dos fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics-CFD) existentes no mercado.

Em LES, as maiores e mais energéticas escalas da turbulência são resolvidas enquanto que as menores e menos energéticas são modeladas. Nos softwares comerciais de CFD, a divisão das escalas é realizada por uma filtragem implícita (Denaro, 2011), onde a resolução da malha computacional define o tamanho do filtro e conseqüentemente quais escalas são resolvidas e quais são modeladas (Denaro, 2011, Rodi et al., 2013). Como os modelos em LES têm a função de reproduzir o comportamento das escalas faltantes do escoamento, analisar a relação de dependência entre resolução da malha e modelos submalha é de grande importância para LES.

Neste trabalho, a influência dos parâmetros de malha e dos modelos submalha será avaliada na modelagem LES de escoamento turbulento em tubos a baixo número de Reynolds, usando a versão acadêmica do software comercial ANSYS® Fluent® 19.0. Os resultados obtidos, a partir de alterações nas resoluções das malhas e no uso de diferentes modelos juntamente com a ausência de modelagem, são comparados com os resultados DNS de Wu & Moin (2008).

2. EQUAÇÕES DE GOVERNO PARA MODELAGEM LES

Nos escoamentos turbulentos, a maior parte da energia cinética turbulenta encontra-se nas maiores escalas existindo nas menores escalas, aquelas menos sensíveis à geometria do problema, apenas uma fração muito pequena da energia. Devido a isso, no modelo de simulação das grandes escalas as maiores escalas são calculadas diretamente usando as equações de movimento, e para as pequenas escalas utilizam-se modelos. Portanto, quando LES é utilizado na simulação de escoamentos turbulentos, as equações são derivadas da aplicação de uma operação de “filtragem” às equações do movimento utilizando, para isso, filtros com largura variável sendo que o uso de tais filtros invalida a derivação padrão das equações básicas para os campos filtrados, uma vez que a operação de filtragem, em geral, não comuta com a operação de diferenciação.

O processo de filtragem, quando aplicado a uma variável genérica $f(\vec{x}, t)$, permite a decomposição da variável em duas partes, uma filtrada (primeiro termo do lado direito da equação 1) e outra parte flutuante (o segundo termo dessa equação), da forma:

$$f(\vec{x}, t) = \bar{f}(\vec{x}, t) + f'(\vec{x}, t) \quad (1)$$

Para um escoamento turbulento, incompressível e isotérmico de um fluido newtoniano, a aplicação da filtragem às equações de escoamento resulta em:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (3)$$

em que o tensor submalha τ_{ij} deve ser modelado.

3. MODELAGEM SUBMALHA

Neste trabalho, o desempenho dos modelos submalha Smagorinsky Dinâmico (SD), Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity (WALE) e Wall-Modeled Large-Eddy Simulation (WMLES)

são investigados juntamente com a ausência de modelagem. Os três modelos usam a hipótese de Boussinesq, definida em 1877, que considera que processos de transferência de quantidade de movimento molecular e turbulento se dão de maneira análoga. A tensão submalha τ_{ij} estaria, dessa forma, relacionada ao gradiente local de velocidades através de uma viscosidade, segundo a equação:

$$\tau_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} \tau_{kk} = -2\nu_t \bar{S}_{ij} \quad (4)$$

onde δ_{ij} representa o delta de Kronecker e

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

é o tensor deformação do campo resolvido. Em LES, apenas a viscosidade turbulenta ν_t é modelada.

O modelo WALE (Nicoud & Ducros, 1999) é um modelo estático que define a viscosidade turbulenta como:

$$\nu_t = L_s^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}} \quad (6)$$

no qual o comprimento de mistura das escalas submalha L_s e a parte simétrica, com traço zero, do quadrado do tensor gradiente de velocidade S_{ij}^d são definidos, respectivamente, por:

$$L_s = \min(kd, C_w V^{1/3}) \quad (7)$$

$$S_{ij}^d = \frac{1}{2} (\bar{g}_{ij} \bar{g}_{ji}^2) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \bar{g}_{kk}^2 \quad (8)$$

onde k é a constante de Von Karman, d é a distância até a parede mais próxima, C_w é a constante de WALE, de valor 0,325, V é o volume da célula e $\bar{g}_{ij} = \partial \bar{u}_i / \partial x_j$.

O modelo Smagorinsky Dinâmico (Germano et al. 1991) define a viscosidade turbulenta como:

$$\nu_t = (C_s V^{1/3})^2 \sqrt{2\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (9)$$

onde C_s é calculada dinamicamente por um filtro de teste aplicado as escalas resolvidas do escoamento (Viaro et al., 2012).

O último modelo investigado, o WMLES (Shur et al., 2008), é um modelo híbrido RANS/LES onde a porção RANS é ativada somente na parte interna da camada logarítmica e a parte externa é coberta por uma formulação modificada do modelo Smagorinsky estático. No modelo WMLES do Fluent®, a viscosidade turbulenta é calculada com o uso de uma escala de comprimento híbrida:

$$\nu_t = \min \left[(kd)^2, (C_{smag} V^{1/3})^2 \right] S \{ 1 - \exp[-(y^+/25)^3] \} \quad (10)$$

Onde C_{smag} é igual a 0,2 e y^+ é a escala normal à parede. Daqui em diante essa escala é apresentada como r^+ .

Na investigação sem modelo submalha, as equações governantes são resolvidas diretamente sem a modelagem das menores escalas.

4. DESCRIÇÃO DO ESCOAMENTO E *SETUP* COMPUTACIONAL

As simulações realizadas no presente trabalho representam um escoamento turbulento em tubo. O domínio, portanto, consiste de um tubo reto de raio R (diâmetro D) e comprimento L_z . A direção do escoamento é ao longo do eixo z , enquanto que as direções r e θ definem, respectivamente, as coordenadas radial e tangencial. As respectivas velocidades nas três direções são u_z , u_r e u_θ . O número de Reynolds baseado no diâmetro do tubo e na velocidade média do escoamento u_z , é igual a 5300. O número de Reynolds de atrito Re_τ , baseado na velocidade de atrito u_τ , é de 360.

Condição de contorno de não deslizamento é aplicada na parede e periodicidade é usada na direção axial, uma vez que o escoamento turbulento totalmente desenvolvido é homogêneo na direção do escoamento. O uso de condições de contorno periódicas em direções homogêneas pode ser justificado se o domínio computacional é escolhido para incluir as maiores escalas do escoamento (Kim et al., 1987). Neste trabalho, o comprimento adotado é de $L_z = 10D$ e é apoiado nos estudos de correlações de dois pontos de Eggels (1994) e de Wu & Moin (2008) para o mesmo número de Reynolds. Com a condição periódica, o escoamento é conduzido por um gradiente de pressão fixo definido por:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{4\rho u_\tau^2}{D} \quad (11)$$

Onde ρ é a massa específica do fluido e a velocidade de atrito u_τ é definida segundo:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (12)$$

em que τ_w é a tensão de cisalhamento média na parede.

Três malhas estruturadas e formadas exclusivamente por células hexaédricas são usadas na investigação. Em todas as três, o espaçamento Δr^+ ($\Delta r^+ = \Delta r Re_\tau / D$) da primeira célula a partir da parede são menores do que 2 ($r^+ \leq 1$) e está em conformidade com o requerido pelos modelos submalha utilizados e pela função de parede usada implicitamente em modelagens LES no Fluent®. Os espaçamentos das malhas nas outras direções também estão de acordo com as recomendações de Piomelli (1997), no qual uma resolução suficiente para LES é de $R\Delta\theta^+ \sim 15 - 40$ e $\Delta z^+ \sim 50 - 150$. Em regiões próximas a parede não são usados valores muito pequenos de Δr^+ nem muito grandes de Δz^+ para evitar células com alta razão de aspecto na subcamada viscosa.

As três malhas são apresentadas na Fig. 1 e na Tabela 1, são mostrados seus respectivos espaçamentos e número de células em cada uma das direções. As resoluções nas direções radial e tangencial das malhas A e B diferem por um fator de 1,5 enquanto que das malhas A e C diferem por um fator de 2.

Os métodos numéricos usados em todas as simulações são recomendações dos trabalhos de Viaro (2012) e Lampitella (2014). São eles: *Fractional Step* para o acoplamento velocidade-pressão, *Least Squares Cell Based* para o cálculo do gradiente, *PRESTO!* para a interpolação da pressão, *Central Differencing* para a discretização espacial dos termos convectivos e *Bounded Second Order Implicit* para a integração no tempo com um passo de tempo fixo de $\Delta t = 0,0005D/u_\tau$. O passo de tempo é escolhido respeitando os estudos de Lampitella (2014) que concluiu que, para o esquema de integração no tempo usado, somente um número de Courant menor ou igual a 0,1 é apropriado.

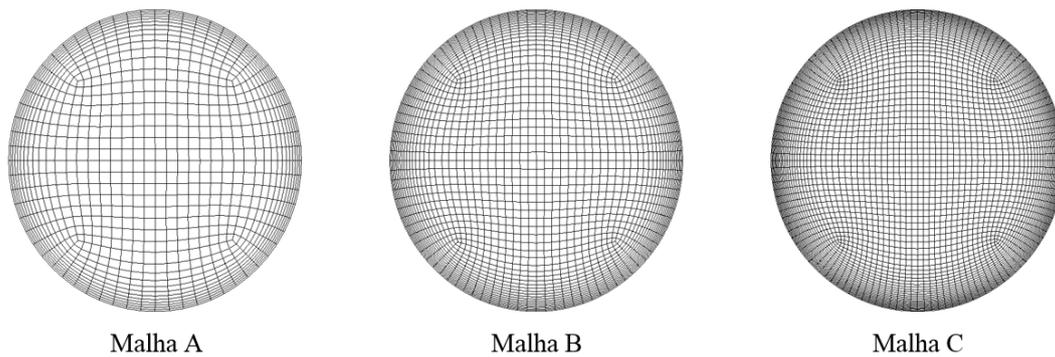


Figure 1- Malhas utilizadas no estudo.

Table 1- Parâmetros das malhas utilizadas.

Malha	A	B	C
r^+	~ 1	$\sim 0,67$	$\sim 0,5$
Δz^+	30	30	30
$R\Delta\theta^+$	17,67	11,78	8,84
N_r	20	30	40
N_z	120	120	120
N_θ	64	96	128
N_{total}	122880	276480	491520

O modelo WALE é usado nas três simulações onde os parâmetros de malha são investigados ao mesmo tempo que a malha B é usada nas quatro simulações onde os modelos submalha e a ausência de modelagem são investigados. Assim, as malhas e os modelos são submetidos aos mesmos parâmetros computacionais e suas influências analisadas à parte.

A fim de alcançar rapidamente o estado estacionário e evitar uma provável laminarização do escoamento em consequência da geometria e do baixo número de Reynolds, um campo de velocidade LES, obtido usando a malha A e o modelo submalha WALE, é interpolado, quando necessário, e utilizado como campo de velocidade inicial em todas as simulações. Apenas na simulação que deu origem ao campo de velocidade LES a condição inicial do escoamento foi produzida por um campo de velocidade RANS com flutuações artificiais sobrepostas.

A partir do campo de velocidade LES, as soluções são calculadas por um período de $40D/u_\tau$ até que o escoamento atinja um estado estatisticamente estacionário. Quando atingido, amostras do escoamento são coletadas a cada passo de tempo por mais $40D/u_\tau$ e as estatísticas de primeira e segunda ordem do escoamento são calculadas. O tempo total de amostragem é suficiente para uma partícula de fluido, viajando a velocidade média do escoamento, percorrer, aproximadamente, 60 vezes o comprimento L_z do domínio computacional (Lampitella, 2014).

Todos os resultados apresentados neste trabalho são adimensionalizados pela velocidade atrito.

5. RESULTADOS

A influência dos parâmetros de malha é mostrada nas Figs. 2 a 5. Nas Figs. 2 e 3, os perfis de velocidade média axial $\langle u_z^+ \rangle$ são representados em escalas linear e logarítmica e comparados com os resultados DNS de Wu & Moin (2008) e com a lei logarítmica de parede, em que a subcamada viscosa ($r^+ < 5$) e a região externa do escoamento ($r^+ > 30$) são definidas, respectivamente, pelas Eq. (13) e Eq. (14).

$$u^+ = r^+ \quad (13)$$

$$u^+ = 2,5 \ln(r^+) + 5,5 \quad (14)$$

De forma geral, é possível de se observar que, para o escoamento médio, as três malhas apresentam bons resultados. Observa-se também, pela análise dessas figuras, que os resultados das três malhas coincidem entre si e com a lei logarítmica de parede, diferindo dos resultados DNS em 9,2 %, em média, na faixa de $50 < r^+ < 150$. Esse comportamento já foi descrito em Patel & Head (1969), onde os autores demonstraram que a lei logarítmica de parede é falha em representar escoamentos turbulentos em tubos a baixo número de Reynolds. A razão desse comportamento, em simulações LES, está sendo pesquisada pelos autores deste trabalho.

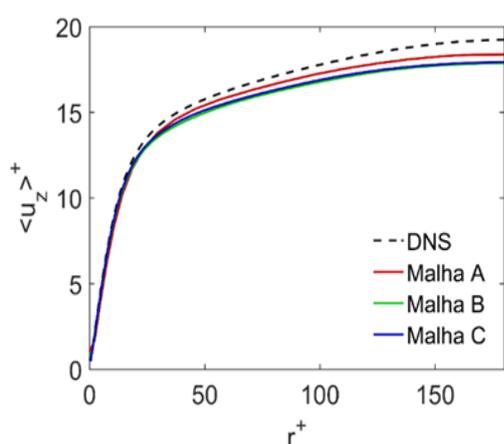


Figure 2- Perfis médios de velocidade axial para as diferentes malhas avaliadas.

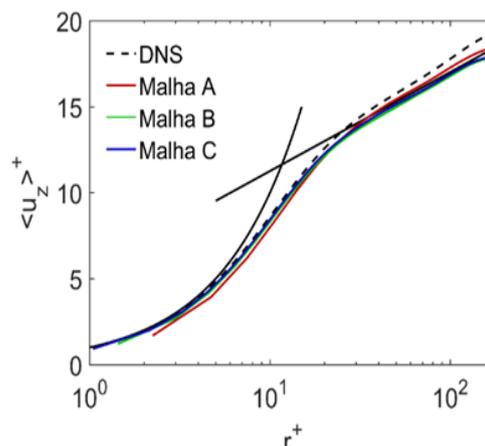


Figure 3- Perfis médios de velocidade axial em escala logarítmica.

Nas Figs. 4 e 5 são mostrados os perfis RMS das flutuações nas direções axial e radial. Observa-se pela Fig. 4, que a malha A sobrestima as estatísticas de segunda ordem na direção do escoamento, na região externa do escoamento, enquanto que as malhas B e C apresentam excelentes resultados em toda a faixa de r^+ . Na direção radial, conforme mostrado na Fig. (5), as três malhas, embora subestimem a solução direta de Wu & Moin (2008), apresentam resultados semelhantes entre si, sendo considerados satisfatórios.

Os efeitos dos diferentes modelos submalha e da não modelagem (SM) são exibidos nas Figs. 6 a 9. Nas Figs. 6 e 7, onde são mostrados os perfis de velocidade média, observa-se que os três modelos submalha apresentam bons resultados para o escoamento médio, com uma ligeira tendência a apresentar melhores resultados nos modelos WALE e Smagorinsky Dinâmico, ao passo que a ausência de modelagem sobrestima, em muito, os resultados DNS.

As estatísticas de segunda ordem na avaliação dos modelos submalha e da não modelagem, são mostradas nas Figs. 8 e 9. Na figura 8, os modelos WALE e Smagorinsky Dinâmico comprovam seu bom desempenho em representar escoamentos turbulentos em tubos a baixo número

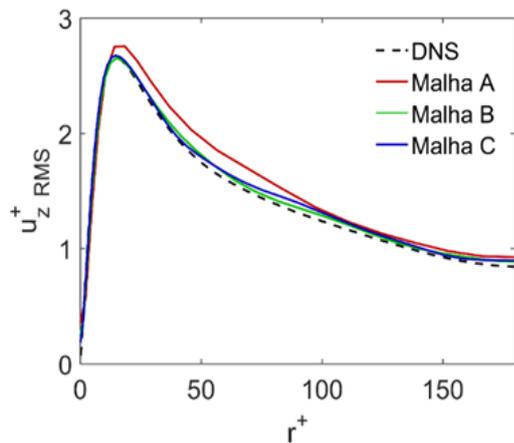


Figure 4- Perfis RMS da componente flutuante da velocidade na direção axial.

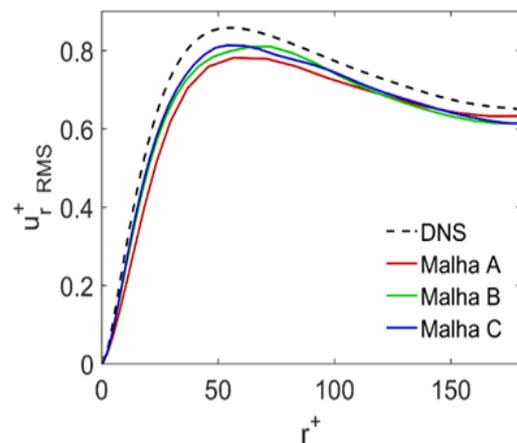


Figure 5- Perfis RMS da componente flutuante da velocidade na direção radial.

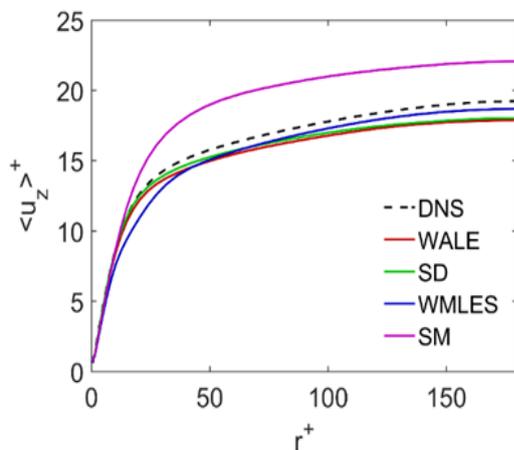


Figure 6- Perfis médios de velocidade axial para os diferentes modelos submalha avaliados.

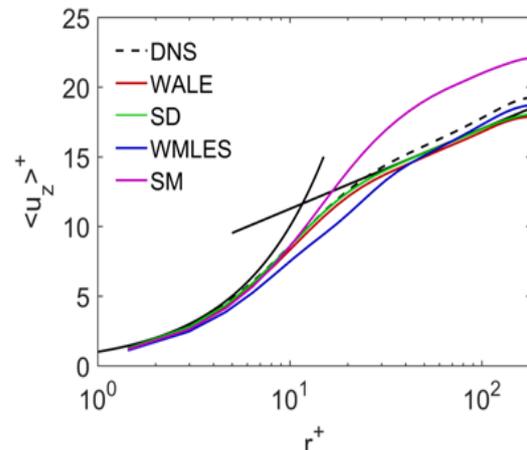


Figure 7- Perfis médios de velocidade axial, em escala logarítmica.

de Reynolds, enquanto que o modelo WMLES tem dificuldades em representar as estatísticas na região intermediária do escoamento. Na figura 9, onde são mostradas as flutuações na direção radial do escoamento, os três modelos e a ausência de modelagem subestimam a simulação numérica direta, porém os resultados para os modelos WALE e Smagorinsky Dinâmico estão, novamente, mais próximos da solução de referência.

De forma geral, a partir destes resultados, é possível de se afirmar que o campo médio de velocidades é corretamente descrito a partir de malhas com resolução aqui avaliada e os modelos submalhas estudados. Já, os resultados para o campo flutuante mostraram-se dependente, principalmente, do modelo submalha, sendo os melhores resultados aqueles obtidos com os modelos WALE e Smagorinsky Dinâmico.

6. CONCLUSÕES

A influência dos parâmetros de malha e dos modelos submalha na Simulação das Grandes Escalas (LES) foi analisada para escoamentos turbulentos em tubos, com baixo número de Reynolds, usando a versão acadêmica do software comercial ANSYS Fluent® 19.0. A utilização

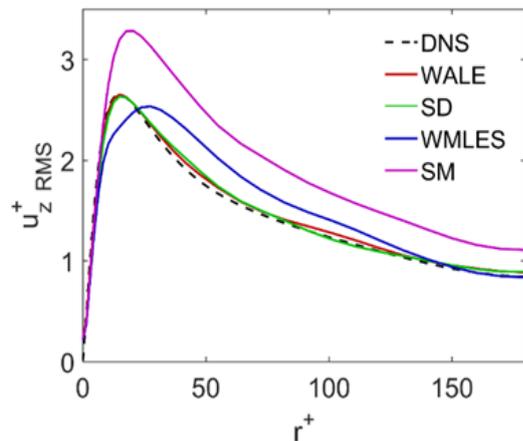


Figure 8- Perfis RMS da componente flutuante da velocidade na direção axial.

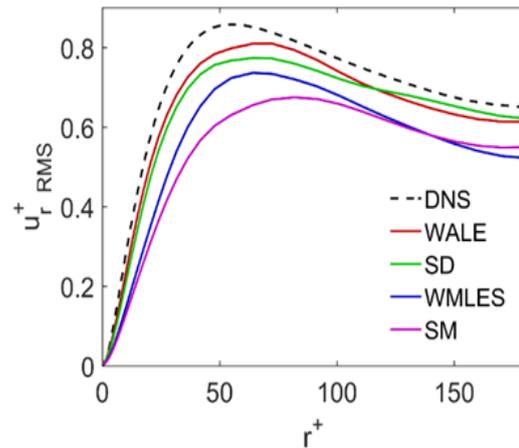


Figure 9- Perfis RMS da componente flutuante da velocidade na direção radial.

de um setup computacional apropriado a partir dos resultados obtidos, permitiu reproduzir, com adequada precisão, os resultados DNS de Wu & Moin (2008), que foram utilizados como referência neste trabalho. A resolução da malha mostrou influenciar os resultados. A malha com pouca resolução, malha A, sobrestimou valores da RMS da componente axial enquanto a malha muito refinada, malha C, não melhorou a precisão dos resultados DNS com respeito à malha de resolução intermediária, malha B. Esse resultado justifica a escolha de malhas com parâmetros adequados, conforme aqui discutido, para não acrescentar tempo de simulação sem melhoras significativas na precisão dos resultados. A importância da modelagem submalha para a correta representação da turbulência ficou nítida com os resultados da ausência de modelagem. Dentre os modelos submalha analisados, todos apresentaram resultados satisfatórios para o escoamento médio enquanto que os modelos WALE e Smagorinsky Dinâmico apresentaram excelentes resultados para as flutuações de velocidade.

Em um contexto industrial, a escolha dos diferentes parâmetros de malhas e modelos submalha dependerá de qual o nível de precisão pretendido e de quais estatísticas serão importantes no projeto. Em situações onde somente os valores do escoamento médio são importantes, como em uma análise de perda de carga, malhas sem refinamento importante e qualquer um dos três modelos estudados são suficientes para representar corretamente o escoamento turbulento. Já para situações em que as flutuações do escoamento são importantes, análise de vibração em tubulações, por exemplo, os parâmetros de malha da ordem dos da malha B e os modelos WALE e Smagorinsky Dinâmico devem ser preferidos.

REFERENCES

- Denaro, F. M. (2011), What does Finite Volume-based implicit filtering really resolve in Large-Eddy Simulations?, *Journal of Computational Physics* 230, 3849–3883.
- Eggels, J. G. M. (1994), Direct and large eddy simulation of turbulent flow in a cylindrical pipe geometry. PhD thesis, Delft University of Technology, The Netherlands.
- Germano, M., Piomelli, U., Moin, P., Caboy, W.H. (1991), A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 3, 3128.
- Kim, J., Moin, P., Moser, R. (1987), Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number, *J. Fluid Mech.*, 177, 133-166.
- Lampitella, P., (2014), Large Eddy Simulation for complex industrial flows, PhD thesis, Politecnico di Milano, Italia.

- Nicoud, F., Ducros, C. (1999), Subgrid-Scale Stress Modelling Based on the Square of the Velocity Gradient Tensor. *Flow, Turbulence and Combustion*, 62, 183–200.
- Patel, V.C., & Head, M.R. (1969), Some observations on skin friction and velocity profiles in fully developed pipe and channel flows. *J. Fluid Mech.*, 38(1), 181–201.
- Piomelli, U. (1997), Large-Eddy Simulations: Where We Stand, *Advances in LES/DNS*, (eds): C. Liu, Z. Liu, L. Sakell, Greyden Press, Columbus, Ohio, 93-104.
- Piomelli, U., Balaras, E., (2002), Wall-Layer models for large-eddy simulations. *Annu. Rev. Fluid Mech*, 34.
- Rodi, W., Constantinescu, G., Stoesser, T. (2013), *Large Eddy Simulation in Hydraulics*. CRC Press, IAHR Monographs.
- Shur, M.L., Spalart, P.R., Strelets, M.K., Travin, A.K. (2008), A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29(6), 1638-1649.
- Viaro, S., Lampitella, P., Mereu, R., Colombo, E., Inzoli, F. (2012), Large Eddy Simulation of a turbulent pipe flow: a sensitivity analysis on computational parameters, XXX UIT Heat Transfer Conference.
- Wu, X., Moin, P. (2008), A direct numerical simulation study on the mean velocity characteristics in turbulent pipe flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 608, 81-112.

INFLUENCE ANALYSIS OF MESH PARAMETERS AND SUB-GRID SCALE MODELS IN THE LARGE EDDY SIMULATION OF TURBULENT PIPE FLOW

Abstract. *The increasing evolution in the power of the computers allowed that some turbulent flows found in engineering applications to be reproduced by using the Large Eddy Simulations (LES). In this work, the influence of different mesh parameters and sub-grid scale models are analyzed in the LES modeling of turbulent pipe flows at low Reynolds number using the academic version of the ANSYS® Fluent® 19.0 software. Three meshes with different refinement levels and the WALE, Dynamic Smagorinsky and WMLES models are assessed along with the absence of modeling. The results show the importance of the mesh parameters for the computational efficiency of LES in industrial contexts and how the sub-grid scale models are essential for the correct representation of the turbulence phenomena. Under the conditions of the present work, mesh parameters similar to those used in mesh B combined with the WALE and Dynamic Smagorinsky models are able to reproduce with high precision the first and second order statistics of the turbulent pipe flow.*

Keywords: *Turbulence modeling, LES, Velocity profile, RMS, Mesh resolution*