

PARTICULARIDADES DA MODELAGEM HÍBRIDA RANS-LES COM MODELO DE TURBULÊNCIA SA

Elie Luis Martínez Padilla, Aristeu da Silveira Neto

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica
Av. João Naves de Ávila 2160, Campus Santa Mônica – Bloco 1M
CEP: 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil, Fone 034 3239 4149
epadilla@mecanica.ufu.br
aristeus@mecanica.ufu.br

Palavras chave: Turbulência, metodologia híbrida, modelo SA.

Resumo. Como resposta aos desafios físicos e computacionais associados à solução numérica de escoamentos turbulentos na área de engenharia aeronáutica, com descolamento da camada limite e a altos números de Reynolds, foi desenvolvida uma metodologia híbrida para modelagem da turbulência denominada DES (Detached-Eddy Simulation), que consiste de uma hibridação das metodologias RANS (Reynolds Average Navier-Stokes Equations) e LES (Large-Eddy Simulation). No presente trabalho, utiliza-se o modelo RANS SA (Spalart Allmaras) como base, o qual nas regiões externas à camada limite migra e atua como modelo sub-malha de Smagorinsky. Apresentam-se resultados da aplicação desta nova metodologia a escoamentos turbulentos no interior de cavidades tridimensionais com uma superfície deslizante. Campos médios do campo de velocidades e suas flutuações são comparados. Apresentam-se também algumas particularidades da formulação original e de algumas modificações. Os resultados confirmam características próximas das soluções LES.

1 INTRODUÇÃO

A maioria dos problemas de engenharia estão associados a escoamentos turbulentos a altos números de Reynolds sobre geometrias complexas, onde a necessidade de conhecer os processos, acompanhá-los, modificá-los ou resolver problemas, passam pela obtenção de resultados estatísticos médios, resultados instantâneos ou ambos os resultados. Assim, o uso de modelagens da turbulência é inevitável, tanto para se obter convergência numérica quanto para se obter acuracidade nos resultados.

Ante a impossibilidade de realizar uma simulação numérica direta DNS (*Direct Numerical Simulation*), as metodologias RANS (*Reynolds Average Navier-Stokes Equations*) e LES (*Large-Eddy Simulation*) têm sido usadas para avaliar os diversos problemas. A metodologia RANS tem respondido na solução de muitos problemas, principalmente em problemas a altos Re , devido a características como: não exigir esquemas numéricos de alta ordem nem malhas muito refinadas; custo computacional baixo (comparado com LES). A necessidade de soluções finas dos escoamentos, que permitam computar os efeitos da dinâmica das grandes e pequenas escalas, para resolver adequadamente problemas de aplicação industrial, tornou LES um caminho natural. No entanto, devido ao requerimento de uma alta resolução de malha na região da camada limite, LES resulta muito cara em muitas aplicações industriais e impossíveis em outras, como estimado por Piomelli e Balaras (2002).

Como resposta aos desafios físicos e computacionais associados à solução numérica de escoamentos turbulentos com descolamento da camada limite a altos números de Reynolds, Spalart et al. (1997) conceitua e apresenta uma metodologia híbrida para modelagem da turbulência denominada DES (*Detached-Eddy Simulation*). Esta metodologia resulta de uma combinação das metodologias RANS e LES. O tratamento da camada limite é realizado usando RANS e o tratamento do restante do escoamento é realizado com LES. Como base, em DES, utiliza-se um modelo RANS, o qual na região de malha refinada (comparada com a escala de comprimento turbulenta) migra e atua como um modelo sub-malha de Smagorinsky. O aprimoramento das metodologias é constante, motivado pela necessidade de torná-las genéricas, assim, a evolução do desenvolvimento da metodologia DES levou a modificações das versões originais propostas que possibilitem o uso do modo RANS não só nas regiões parietais, se não também em regiões onde a intensidade de turbulência é baixa, como exposto no trabalhos de Menter et al. (2003) e Spalart et al. (2006).

2 MODELAGEM MATEMÁTICA

O modelo matemático que representa a dinâmica dos fluidos newtonianos, incompressíveis e isotérmicos são as equações de Navier-Stokes, como detalhado em Bird et al. 2002. Certamente essas equações seriam suficientes para resolver também escoamentos turbulentos, dentro do contexto da metodologia de simulação numérica direta DNS, no entanto, devido ao grande número de equações simultâneas a resolver e à atual capacidade tecnológica das máquinas resulta impossível de resolver problemas de aplicação nas diversas áreas da engenharia. Assim, tem-se como alternativa a solução de uma parte do escoamento, usando as equações de Navier-Stokes, e modelar uma outra parte. Usando o conceito de equações globais filtradas para a turbulência, Silveira Neto et al. 2002, representa-se as metodologias RANS e LES com um conjunto só de equações onde em função da metodologia adotada o conjunto representa as equações médias de Reynolds, cujo complemento são as flutuações, ou as equações filtradas, que representam as grandes escalas e cujo complemento são as escalas sub-malha. Dessa forma, o tensor de Reynolds τ_{ij} modela a transferência de energia entre o campo médio e suas flutuações, para RANS, ou a transferência de energia

entre as grandes e as pequenas escalas, para LES. De acordo com a hipótese de Boussinesq o tensor τ_{ij} está associado à taxa de deformação, energia cinética turbulenta e viscosidade turbulenta ν_t , sendo esta última avaliada via modelo.

2.1 Metodologia Híbrida com Modelo SA

O modelo de turbulência desta modelagem é o modelo SA, é com esse modelo que Spalart e Allmaras (1992) propõem DES. O modelo SA foi desenvolvido em função das necessidades da indústria aeronáutica, com coeficientes calibrados basicamente em função de considerações empíricas. Trata-se de um modelo com uma equação de transporte para o escalar viscosidade turbulenta, denominado viscosidade auxiliar $\tilde{\nu}$, expressa na forma da Eq. (1):

$$\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial t} + \frac{\partial u_j \tilde{\nu}}{\partial x_j} = c_{b1}(1 - f_{t2})\tilde{S}\tilde{\nu} + D - \left[c_w f_w - \frac{c_{b1}}{k^2} f_{t2} \right] \left[\frac{\tilde{\nu}}{\tilde{d}} \right]^2 + f_{t1} \Delta U^2, \quad (1)$$

$$D = \frac{1}{\sigma} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left((\nu + \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right) + c_{b2} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right],$$

onde $\tilde{d} = d_w$ é a distância à parede mais próxima, as funções f são de amortecimento para as regiões parietais ou agem como controladores dos diversos termos da equação, \tilde{S} é a taxa de deformação modificada e (c, σ) são constantes do modelo. As funções com sub-índice t estão associados à transição à turbulência dentro da camada limite, que no presente trabalho não são considerados. A viscosidade turbulenta é definida como:

$$\nu_t = \tilde{\nu} f_{v1}, \quad (2)$$

onde a função de amortecimento f_{v1} torna-se nula nas regiões afastadas das paredes.

Spalart et al. (1997) substituíram a definição de \tilde{d} , que no modelo SA é a distância à parede mais próxima, por uma variável que representa a escala de comprimento da formulação DES, expressa como:

$$\tilde{d} = \min(d_w, \Delta C_{DES}), \quad (3)$$

onde $C_{DES} = 0,65$. Assim, \tilde{d} modera o comportamento da modelagem nos modos URANS e LES por comparação entre as escalas de comprimento turbulentas d_w (URANS) e $C_{DES} \Delta$ (LES), permitindo o uso do modo URANS nas proximidades das paredes.

3 PROBLEMA FÍSICO DE APLICAÇÃO

Trata-se de um problema representativo dos escoamentos confinados, escoamentos turbulentos em cavidades cúbicas com uma superfície deslizante, os quais possuem características interessantes que permitem avaliar adequadamente o potencial da nova metodologia. A formação de diversas estruturas turbilhonares, típicas de escoamentos

internos, e uma boa base de dados experimentais (Prasad e Koseff, 1989) e numéricos (Deshpande e Milton, 1998; Padilla et al., 2005; Padilla et al., 2009) são os fatores que sustentam a escolha deste problema para avaliar a metodologia híbrida DES. Os parâmetros que definem o problema são o altura da cavidade L , a velocidade da superfície deslizante U e o número de Reynolds $Re = UL/\nu = 10000$.

4 RESULTADOS

Inicialmente, foram realizadas diversas simulações para avaliar o modelo SA, via metodologia URANS. Baseado em experiências anteriores, Padilla et al. (2009), considerou-se seis casos, conforme a Tab. 1. As malhas não uniformes são concentradas nas proximidades das paredes com uma razão de redução de 5%. O termo de produção foi avaliado em função de: a) $S =$ taxa de vorticidade (R_{ij}), como proposta original; b) $S =$ taxa de deformação (S_{ij}), como usado em Bardina et al. (1997); c) $S =$ Eq. (4), Mod, segundo modificação de Dacles et al. (1995).

$$S = |R_{ij}| + C_{prod} \min(0, |S_{ij}| - |R_{ij}|). \quad (4)$$

| Re | Caso | Malha | T. Produção |
|-------|------------|-----------------------|-----------------|
| 10000 | SA_40n_Rij | 40x40x40 não uniforme | tx. vorticidade |
| | SA_40n_Sij | 40x40x40 não uniforme | tx. deformação |
| | SA_40n_Mod | 40x40x40 não uniforme | equação (4) |
| | SA_50n_Rij | 50x50x50 não uniforme | tx. vorticidade |
| | SA_50n_Sij | 50x50x50 não uniforme | tx. deformação |
| | SA_50n_Mod | 50x50x50 não uniforme | equação (4) |

Tabela 1. Simulações realizadas usando a metodologia URANS.

As comparações são realizadas usando o plano transversal médio em $z/L=0,5$ e perfis, no plano médio normalizados com a velocidade da tampa, ao longo das direções horizontal (em $y/L=0,5$) e vertical (em $x/L=0,5$) para as componentes horizontal u/U e vertical v/U da velocidade.

Perfis de velocidade média são apresentados na Fig. 1. Na Fig. 1(a) observa-se a influência do refino da malha e das diferentes formas de avaliar o termo de produção da equação de transporte de viscosidade turbulenta. O efeito do refino de malha sobre o caso SA_Rij (cor azul) resulta em afastamento dos perfis médios dos dados experimentais (Prasad e Koseff, 1989), comportamento oposto dos outros casos, onde a aproximação com os dados experimentais mostra características diferenciadas. O caso SA_Sij superestima um pouco em relação os dados experimentais nos picos localizados próximos das paredes inferior, para u/U , e anterior ($x/L=0$), para v/U (ver Fig. 1b). Por outro lado, o caso SA_Mod (cor vermelha) subestima os dados de referência nas regiões próximas da parede posterior ($x/L=1$). Na Fig. 1(b) comparam-se os casos SA_50n_Sij e SA_50n_Mod com os dados experimentais e numéricos de referência. A solução URANS-SST (Padilla et al., 2009) apresenta comportamento intermediário entre os casos SA_50n_Sij e SA_50n_Mod, sendo que URANS-SST se mostra próximo da solução LES (Padilla et al., 2005) na maioria das regiões da cavidade. Comparados com os dados experimentais e de DNS (Deshpande e Milton, 1998), a modelagem URANS-SA se ajusta bem em algumas regiões e em outras subestima ou superestima.

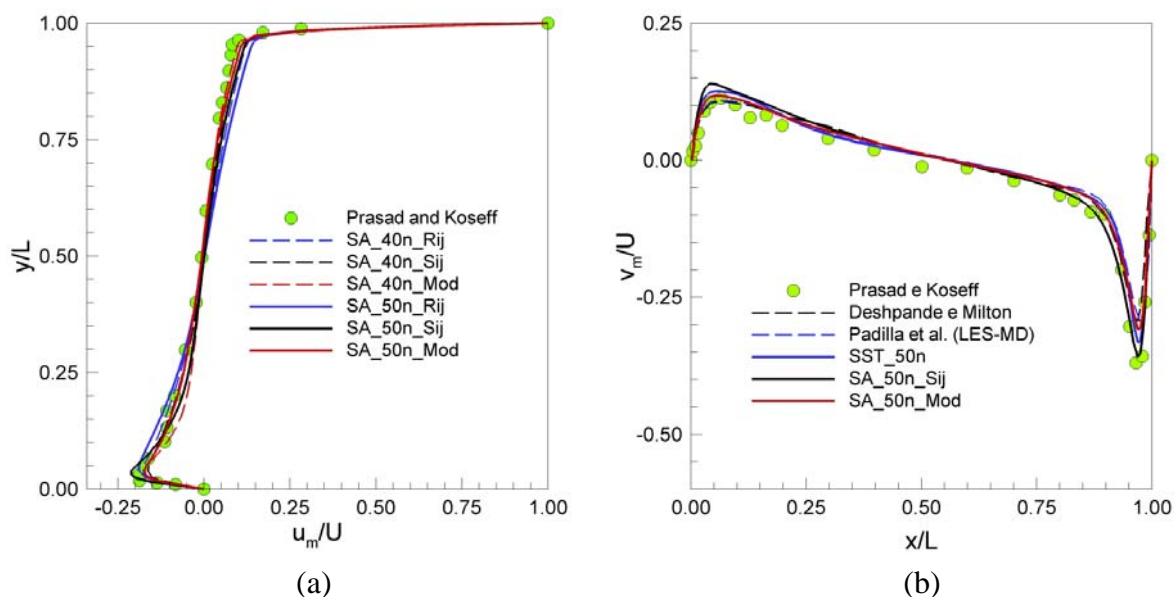


Figura 1. Perfis de velocidade média sobre o plano médio; (a) componente horizontal ao longo de y em $x/L=0,5$, (b) componente vertical ao longo de x em $y/L=0,5$.

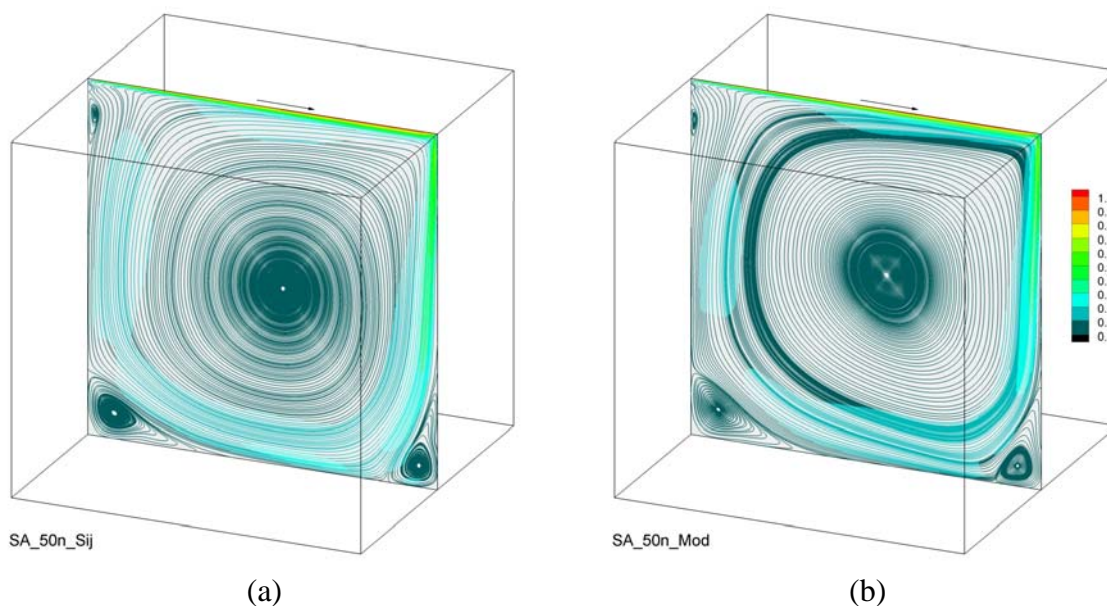


Figura 2. Padrão do escoamento médio para malha 50x50x50; (a) usando taxa de deformação, (b) usando Eq. (4).

Usando o campo médio de velocidade, mostra-se o padrão do escoamento para os casos SA_50n_Sij e SA_50n_Mod através das linhas de corrente coloridas com a norma da velocidade (Fig. 2). Observa-se leve diferença na forma dos vórtices, bem como no tamanho do vórtice secundário anterior-superior (menor das estruturas). Em concordância com o perfil da Fig 3(a), o caso SA_50n_Sij atinge maior velocidade na região próxima à parede posterior (em $y/L=0,5$), conforme indica o campo verde.

4.1 DES com Modelo SA

As simulações realizadas levam em conta: a) as taxas de vorticidade e deformação para avaliar o termo de produção de viscosidade turbulenta; b) esquemas de interpolação do termo advectivo upwind (upw), diferenças centradas (dc) e híbrido (hib; Strelets, 2001), sendo que o último dos esquemas usa upwind quando se ativa o modo URANS e diferenças centradas quando se ativa o modo LES. Na Tab. 2 apresenta-se também a nomenclatura usada para os casos e os tipos de malha.

| Re | Caso | Malha | T. Produção | T. Advectivo |
|-------|--------------------|--------------------|-----------------|---------------|
| 10000 | SA-DES_40n_Rij_upw | 40x40x40 não unif. | tx. vorticidade | upwind |
| | SA-DES_40n_Rij_dc | 40x40x40 não unif. | tx. vorticidade | diferenças c. |
| | SA-DES_40n_Rij_hib | 40x40x40 não unif. | tx. vorticidade | híbrido |
| | SA-DES_40n_Sij_hib | 40x40x40 não unif. | tx. deformação | híbrido |
| | SA-DES_50n_Rij_hib | 50x50x50 não unif. | tx. vorticidade | híbrido |
| | SA-DES_50n_Sij_hib | 50x50x50 não unif. | tx. deformação | híbrido |

Tabela 2. Simulações realizadas com modelagem híbrida SA-DES.

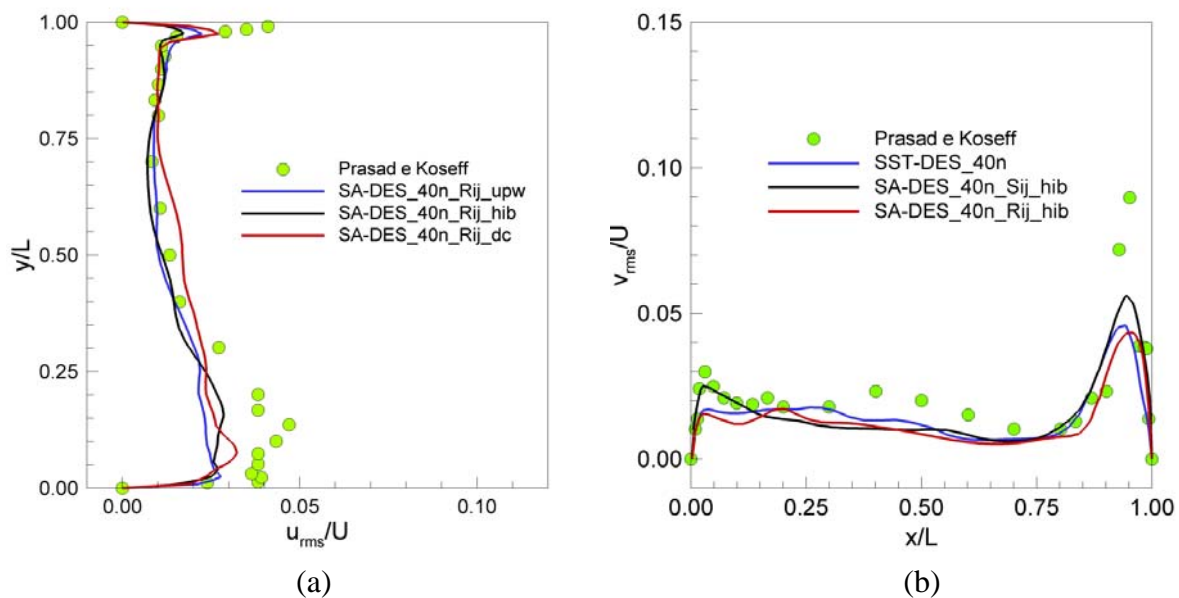


Figura 3. Perfis de intensidade de turbulência no plano médio; (a) componente horizontal ao longo de y em $x/L=0,5$, (b) componente vertical ao longo de x em $y/L=0,5$.

Segundo Strelets (2001), metodologias híbridas precisam de esquemas de interpolação híbridos para não perder as características quando a metodologia DES atua tanto no modo URANS quanto no modo LES. Nesse contexto, na Fig. 3 tem-se uma confrontação de resultados com os três esquemas de interpolação espacial usados no termo advectivo da modelagem SA-DES (Spalart, 1997), onde o caso SA-DES_40n_Rij_hib representa melhor o comportamento dos dados experimentais (Prasad e Kossef, 1989) de intensidade de turbulência associada à componente horizontal $u_{rms} = \sqrt{u'u'}/U$ (Fig. 3a) da velocidade. Comparando com o caso SA-DES_40n_Sij_hib, na Fig. 3(b), observa-se que a distribuição da componente de vertical de intensidade de turbulência v_{rms} do caso SA-DES_40n_Rij_hib é

menos representativa dos dados experimentais, principalmente nas proximidades das paredes, onde subestima os máximos.

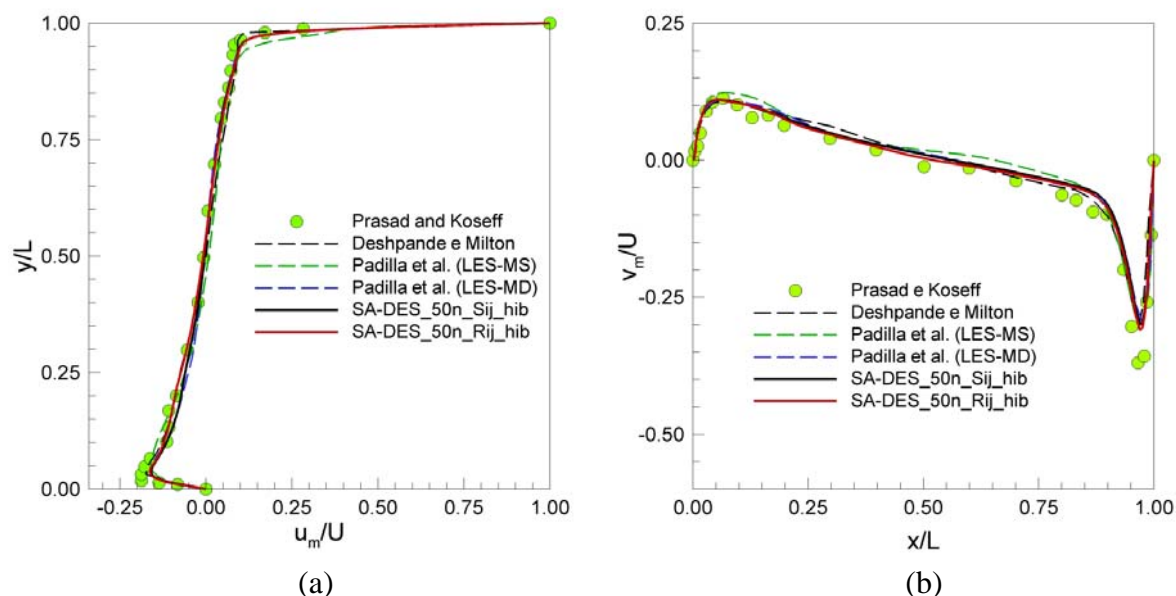


Figura 4. Comparação da velocidade média; (a) componente horizontal ao longo de y em $x/L=0,5$, (b) componente vertical ao longo de x em $y/L=0,5$.

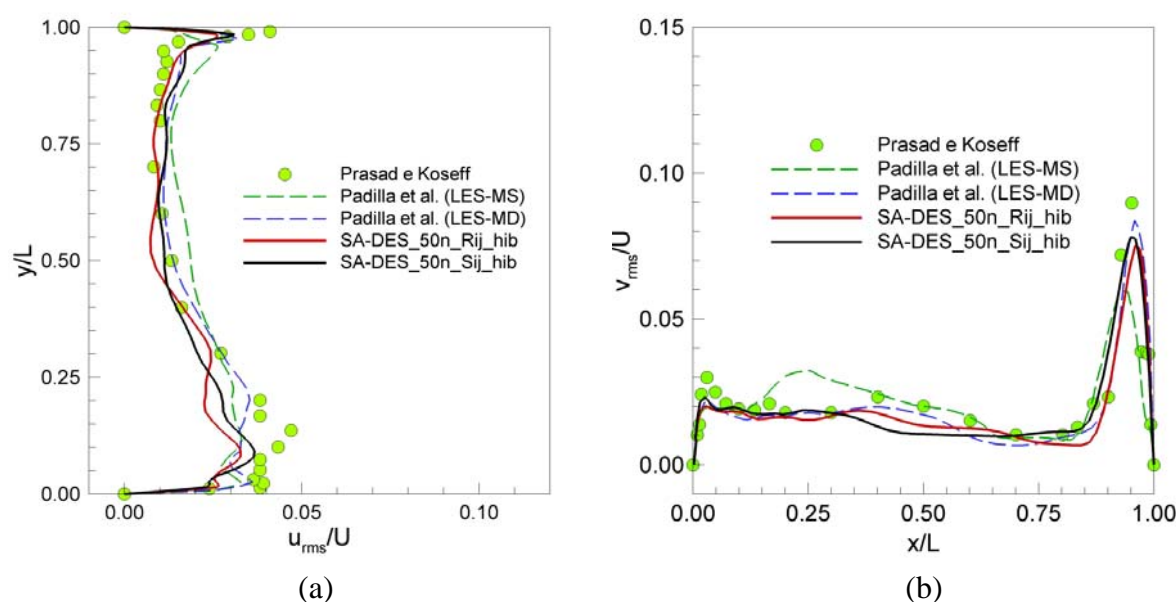


Figura 5. Comparação de intensidade de turbulência; (a) componente horizontal ao longo de y em $x/L=0,5$, (b) componente vertical ao longo de x em $y/L=0,5$.

Resultados do campo de velocidade média com malha $50 \times 50 \times 50$, Fig. 4, comparados com os dados de referência são: inferiores a DNS (Deshpande e Milton, 1989; resolvido com malha $84 \times 84 \times 84$), similares a LES_MD (Padilla et al., 2005; resolvido com malha $40 \times 40 \times 40$); superiores a LES-MS (Padilla et al., 2005; resolvido com malha $40 \times 40 \times 40$). Em relação ao refino de malha, ambos os casos melhoram um pouco tão só na região entre

$y/L=0,1$ e $0,5$, destacando levemente o caso SA-DES_40n_Rij_hib. Por outro lado, observa-se que os perfis de intensidade de turbulência, Fig. 5, melhoram consideravelmente, principalmente nas proximidades das paredes posterior e superior, mesmo assim, o comportamento da dos resultados com LES-MD se mostram superiores em varias regiões da cavidade.

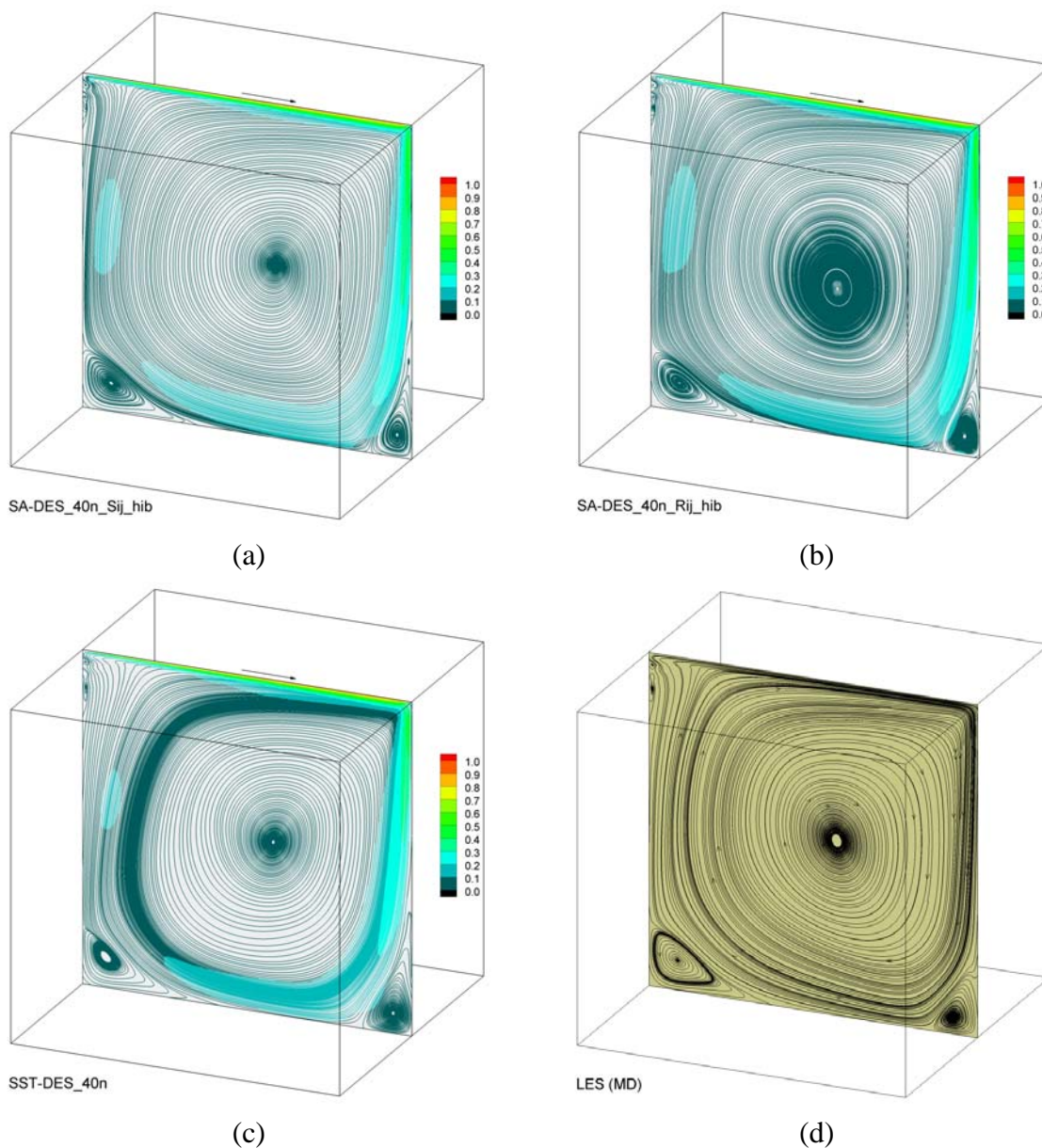


Figura 6. Padrão do escoamento médio para as metodologias DES e LES; (a) SA-DES, (b) SA-DES, (c) SST-DES, (d) LES com modelo dinâmico.

Características qualitativas dos escoamentos resultantes sobre o plano médio são visualizadas na Fig. 6. Alguns detalhes são observados nessa figura: o núcleo do vórtice principal do caso SA-DES_40n_Sij_hib, como do resultado SST-DES_40n, localizam-se em posições muito próximas do núcleo do resultado LES-MD; a altura do vórtice secundário posterior é maior para as metodologias DES; os vórtices anteriores dos casos SA-DES são similares a LES-MD; todos apresentam vórtice secundário anterior-superior.

5 CONCLUSÕES

Foram apresentados resultados comparativos da aplicação da metodologia DES a um problema de escoamento turbulento interno, com a finalidade de avaliar sua capacidade de reproduzir a dinâmica das estruturas presentes no escoamento. As modificações no modelo base SA modificam substancialmente o escoamento em regiões críticas, regiões de maior intensidade de turbulência, destacando as modificações SA_Sij e SA_Mod para a metodologia URANS e SA-DES_Sij para a metodologia DES (a modificação SA-DES_Mod não foi avaliada). Resulta evidente a necessidade do uso de esquema de interpolação híbrida para manter as características dos modos URANS e LES. Qualitativa e quantitativamente a metodologia DES com modelo SA reproduz as características dos escoamentos turbulentos no interior de cavidades cúbicas, onde as aproximações são similares aos resultados com a metodologia LES.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG, PETROBRAS e à FEMEC pelo apoio financeiro e de infra-estrutura.

REFERÊNCIAS

- Bardina, J. E., Huang, P. G. and Coakley T. J., Turbulence Modeling Validation, Testing and Development, *NASA Technical Memorandum 110446*, Ames Research Center, pp. 1-88, 1997.
- Dacles-Mariani, G., Zilliac, G. G., Chow, J. S. and Brashdew, P., Numerical /Experimental Study of a Wingtip Vortex in the Near Field, *AIAA Journal*, 33(9), pp. 1568-1568, 1995.
- Deshpande, M.D. and Milton, S.G., Kolmogorov Scales in a Driven Cavity Flow, *Fluid Dyn. Res.*, 22, pp. 359-381, 1998.
- Menter, F. R., Kuntz M., and Bender, R., A Scale-Adaptive Simulation Model for Turbulent Flow Prediction, *AIAA 41st Aerospace Science Meeting & Exhibit*, Reno, Nevada, 2004.
- Padilla, E.L.M. ; Martins, A. L. e Silveira Neto, A. Large-Eddy Simulation of the Three-Dimensional Unstable Flow in a Lid-Driven Cavity, *18th International Congress of Mechanical Engineering*, Ouro Preto. Proceedings of COBEM, v. 1. p. 1-8, 2005.
- Padilla, E. L. M., Mariano, F.P. and Silveira Neto, A. Particularidades da Modelagem Híbrida RANS-LES com Modelo de Turbulência SST, *XXX Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*, Búzios, v. 1, p. 1-8, 2009.
- Prasad, A.K. and Koseff, J.R., Reynolds Number and End-Wall Effects on a Lid-Driven Cavity Flow, *Phys. Fluids A*, 1, pp. 208-218, 1989.
- Silveira-Neto, A., Mansur, S.S. and Silvestrini, J.H., Equações da Turbulência: Média Versus Filtragem, *III Escola de Primavera de Transição e Turbulência*, Florianópolis, pp. 1-7, 2002.
- Spalart, P. and Allmaras, S., 1992, A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamics Flows, *AIAA Journal* , pp. 92-0439.
- Spalart, P., S. Jou, W.-H., Strelets, M. and Allmaras, S., Comments in the Feasibility of LES for Wings and on a Hybrid RAN/LES approach, *Advances in LES/DNS, First Int. Conference on DNS/LES*, Louisiana Tech University: Greyden Press, 1997.
- Spalart, P. W., Lou, M., Strelets, M. & Allmaras S., Comments on the Feasibility of LES for Wings, and on a Hybrid RAN/LES approach. *Advances in DNS/LES, 1st AFOSR Int. Conf. On DNS/LES*, Columbus, Ohio, 2001.
- Spalart, P. W., Deck, S., Shur, M.L. and Squires, K.D., A New Version of Deattached-Eddy-Simulation, Resistant to Ambiguous grid Densities, *Theo. Comput. Fluid Dyn.*, 2006

