

CARACTERIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS EM CAVIDADES CÚBICAS COM MOVIMENTAÇÃO DIAGONAL DA TAMPA

Elie Luis M. Padilla
epadilla@mecanica.ufu.br

Tiago de Assis Silva
tasilva@mecanica.ufu.br

Aristeu da Silveira Neto
Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Mecânica
aristeus@mecanica.ufu.br

Resumo. *Escoamentos em cavidades com tampa deslizante são de natureza tridimensional e apresentam diversas estruturas características em função do número de Reynolds e da razão de aspecto. Na atualidade, devido às muitas aplicações em engenharia e ao interesse pela compreensão da física do problema, uma grande quantidade de pesquisas aborda este problema, focados especificamente no caso de a tampa da cavidade se movimentar paralela a um dos eixos coordenados. Uma vez que, na realidade, os escoamentos externos à cavidade (representados pela tampa deslizante) nem sempre são paralelos aos eixos, o presente trabalho apresenta a caracterização e análise numérica de escoamentos no interior de cavidades cúbicas com tampa deslizante paralela (0° , 90°) e diagonal (15° , 30° , 45°), considerando números de Reynolds na faixa de 100-2000. Apresenta-se também uma comparação quantitativa de transferência de momento através da integral volumétrica de momento, paralela e transversal ao movimento da tampa. As equações de Navier-Stokes são discretizadas com o método dos volumes finitos em coordenadas cartesianas, com malhas deslocadas e esquemas temporal e espacial de segunda ordem. Para o acoplamento pressão-velocidade usa-se o método dos passos fracionados.*

Palavras chave: escoamento estável, cavidade, simulação tridimensional.

1. Introdução

O escoamento em cavidades com tampa deslizante tem diversas aplicações tecnológicas importantes em diferentes áreas da engenharia. A simplicidade da geometria que delimita o problema contrasta com a diversidade de estruturas que formam, e de acordo com a literatura, estas características fazem da cavidade, provavelmente, o problema mais estudado no campo da fluidodinâmica computacional para testes de modelos numéricos.

A representação de cavidades de seção quadrada com comprimento axial infinito, cavidades bidimensionais, tem sido largamente estudada e é agora um caso teste padrão para novos esquemas computacionais. Benjamim e Denny (1979), Ghia *et al.* (1982) e Botella e Peyret (1998) são alguns dos muitos trabalhos existentes, dentre estes Ghia *et al.* (1982) é frequentemente referenciado. Eles empregaram o método das diferenças finitas com a formulação função corrente-vorticidade, usando malha cartesiana uniforme.

Devido à dificuldade de abordar o problema em três dimensões, somente nos anos de 1980 o trabalho experimental pioneiro de Koseff e Street (1984) permitiu mostrar que o escoamento em cavidades é naturalmente tridimensional. Além do mais, características padrão, como vórtices primários e secundários, estruturas como os vórtices de canto e os vórtices do tipo Taylor-Gortler foram observados.

O recente progresso dos métodos numéricos e do poder de cálculo dos computadores tem tornado possível uma análise tridimensional adequada destes problemas. Ku *et al.* (1987) e Babu e Korpela (1994) através da resolução das equações de Navier-Stokes em três dimensões, apresentaram comparações entre resultados bi e tridimensionais para cavidade cúbica. Por outro lado, Iwatsu *et al.* (1989) fizeram uma análise da topologia do escoamento por meio da projeção de linhas de corrente em planos para vários números de Reynolds. Sheu e Tsai (2002) fizeram a análise para Reynolds igual a 400.

O estudo do escoamento em cavidades com tampa deslizante não se restringe somente à movimentação paralela da tampa em relação às paredes. Em muitos escoamentos de interesse prático a movimentação preferencial pode-se dar em várias direções.

Recentemente Povitsky (2005), utilizando-se de um pacote de CFD comercial, estudou o escoamento em cavidades com movimentação diagonal e paralela da tampa. O autor conduziu um estudo comparativo para as duas configurações de movimentação da tampa em diferentes números de Reynolds. Abordando o problema de forma qualitativa e quantitativa, o autor conseguiu evidenciar as diferenças no padrão do escoamento para as duas configurações de movimentação da tampa.

Tendo isto em vista, o presente trabalho trata do estudo do escoamento em cavidades com movimentação da tampa em diagonal, usando um código computacional tridimensional em coordenadas cartesianas, Padilla e Silveira-Neto (2005), para resolver as equações de Navier-Stokes.

2. Problema Físico

Trata-se de escoamentos no interior de cavidades cúbicas com tampa deslizante, de comprimento característico L , como mostrado na Fig. 1(a). A tampa se movimenta com velocidade U , considerando quatro configurações em função do ângulo α : movimentação paralela ao eixo x , $\alpha=0^\circ$; movimentação diagonal da tampa com $\alpha=15^\circ$; movimentação diagonal da tampa com $\alpha=30^\circ$; movimentação diagonal da tampa com $\alpha=45^\circ$. Para efeitos de análise, definem-se alguns planos (Fig. 1b): o plano $(y, \sqrt{x^2+z^2})$ denominado plano A; o plano (x, y) em $z/L=0,5$, denominado plano B; plano (y, z) em $y/L=0,5$, denominado plano C.

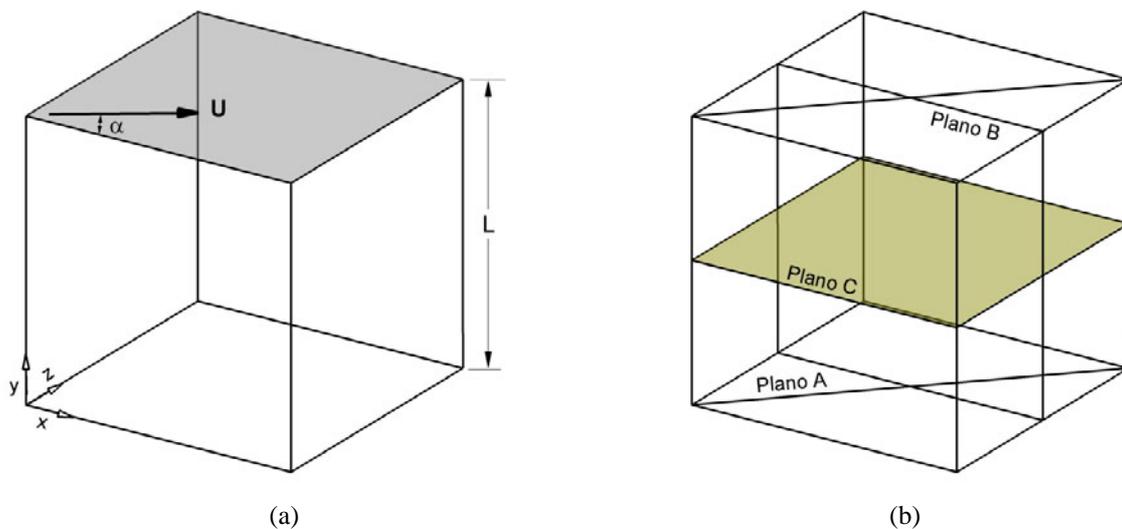


Figura 1. Cavidade cúbica; (a) com movimentação diagonal da tampa, (b) com movimentação paralela.

3. Modelagem Matemática e Método Numérico

Considera-se um fluido newtoniano e incompressível com densidade ρ e viscosidade dinâmica μ . O escoamento do fluido no interior de cavidades é regido pelas equações de Navier-Stokes, expressas na sua forma conservativa e em coordenadas cartesianas na Eqs. (1-4),

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + \frac{\partial wv}{\partial z} \right] = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}, \quad (3)$$

$$\rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} + \frac{\partial ww}{\partial z} \right] = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}, \quad (4)$$

em que u , v , e w são as componentes da velocidade nas direções coordenadas x , y , z , respectivamente, p a pressão e τ_{ij} são as tensões viscosas. O parâmetro adimensional que governa este tipo de escoamentos é o Número de Reynolds baseado na velocidade de tampa e na altura da cavidade, definido como:

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu}, \tag{5}$$

A equações foram discretizadas pelo método dos volumes finitos, como proposto por Patankar (1980), os termos advectivo e difusivo foram aproximados por um esquema de diferenças centradas, Ferziger e Péric (1999). O acoplamento pressão-velocidade foi feito pelo Método dos Passos Fracionado, Kim e Moin (1985), e para a evolução temporal foi utilizado o esquema de Adams-Bashforth de segunda ordem. O sistema de equações para o campo de pressão é resolvido usando o método fortemente implícito (Stone, 1968), conhecido como método SIP.

4. Testes Preliminares

Diversos tamanhos de malhas não uniformes foram usadas para o escoamento a $Re=400$. Os resultados para a componente horizontal da velocidade u , ao longo da direção vertical y na posição $x/L = y/L = 0,5$, são mostrados na Fig. 2. Para cavidade com movimentação diagonal da tampa (Fig. 2a), os perfis de velocidade obtidos com malhas $30 \times 30 \times 30$ e $40 \times 40 \times 40$ são muito próximos e apresentam diferença com a solução para malha $20 \times 20 \times 20$, principalmente no pico formado na parte inferior da cavidade. Para cavidade com movimentação paralela da tampa (Fig. 2b), a solução em função do tamanho da malha é similar ao caso apresentado, sendo que a solução com malha $50 \times 50 \times 50$ se apresenta idêntica à solução com malha $40 \times 40 \times 40$. Quando comparados com os resultados numéricos de Kato *et al.* (1990), Babu e Korpela (1994) e Sheu e Tsai (2002), observa-se boa concordância, no entanto, os resultados para as malhas mais densas mostram melhor aproximação com os dados de Sheu e Tsai (2002).

Considerando a análise dos resultados da Fig. 2, o número de Reynolds máximo a ser estudado e o custo computacional relacionado a cada tamanho de malha, a malha $40 \times 40 \times 40$ foi escolhida para gerar os resultados do presente trabalho.

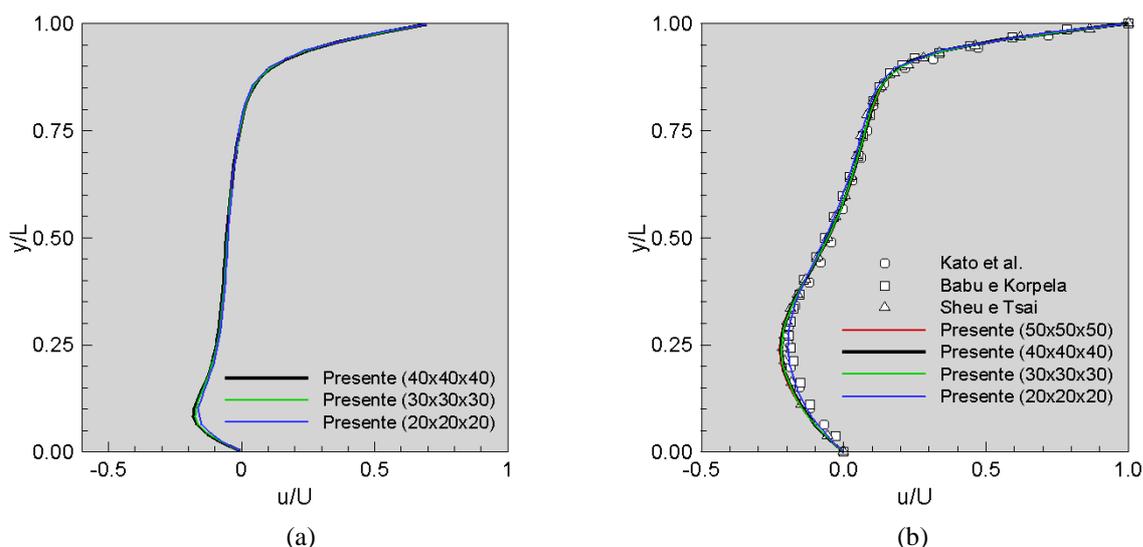


Figura 2. Distribuição da componente horizontal da velocidade, $Re=400$; (a) movimentação diagonal da tampa, (b) movimentação paralela da tampa.

5. Resultados e Discussão

As simulações de escoamentos no interior de cavidades com movimentação diagonal da tampa foram realizadas para diversos valores do número de Reynolds compreendidos na faixa $100 \leq Re \leq 2000$, usando malha não uniforme de 64000 volumes. Um computador Pentium IV de 2.8 GHz foi usado para executar os cálculos. O custo computacional aumenta em função do incremento do número de Re , como exemplo, pode-se mencionar que para o caso de $Re = 1000$ são necessários 13,94 e 12,17 minutos para simular um segundo físico do problema considerando as configurações de movimentação diagonal ($\alpha = 45^\circ$) e paralela da tampa, respectivamente. O tempo necessário para atingir regime permanente para o caso de cavidade com movimentação diagonal da tampa é de aproximadamente 70 s, maior que para o outro caso (em torno de 50 s).

5.1. Escoamento com $\alpha = 0^\circ$

Este tipo de configuração se caracteriza pela presença de um vórtice primário, um ou dois vórtices secundários e

vórtices de canto nas proximidades das paredes laterais ($z/L=0$ e 1), assim como por serem simétricos respeito do plano B, fato que pode ser observado na Fig. 3, bem como em trabalhos como Babu e Korpela (1994), Sheu e Tsai (2002) e Padilla e Silveira Neto (2005). Os vórtices secundários estão localizados na região inferior da cavidade, entre as paredes inferior, anterior ($x/L=1$) e posterior ($x/L=0$). Um vórtice secundário aparece para os escoamentos com $500 \leq Re$, próximo das paredes anterior e inferior; nos outros casos, dois vórtices secundários aparecem. Por outro lado, os vórtices de canto são visualizados para a maioria dos casos, exceto para os escoamentos com $400 < Re$. A projeção das linhas de corrente para $Re = 1200$ sobre o plano de simetria e sobre paredes laterais são mostradas na Fig. 3(a), e sobre o plano C e sobre os planos inferior e superior são mostrados na Fig. 3(b). O plano de simetria permite observar a dimensão dos vórtices primário e secundário, sendo que o vórtice secundário próximo da parede anterior é maior que o outro. Os planos C e os correspondentes às paredes laterais permitem visualizar as características dos vórtices de canto, quais ficam mais confinados em relação às paredes inferior e posterior à medida que o Re é incrementado. A topologia apresentada pelos diversos casos é muito similar à apresentada nos trabalhos citados anteriormente.

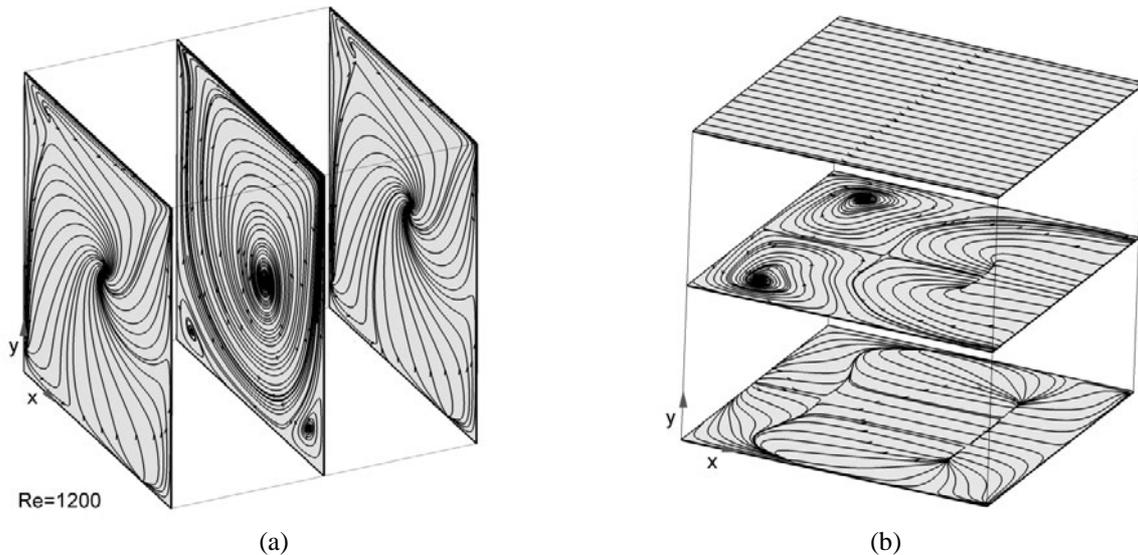


Figura 3. Projeção das linhas de corrente, $Re = 1200$ e $\alpha = 0^\circ$; (a) sobre as paredes laterais e o plano B, (b) sobre o plano inferior, o plano C e a tampa.

Sendo que o vórtice primário é a estrutura principal do escoamento, é importante reportar as mudanças desta estrutura em função do número de Reynolds através da posição da linha do centro do vórtice. A Tab. 1 mostra a posição do centro do vórtice primário no plano de simetria, de todos os casos considerados. O centro do vórtice primário se desloca desde $x/L=0,6767$ e $y/L=0,7559$, correspondente a $Re = 100$, até a posição localizada em $x/L=0,6169$ e $y/L=0,463$, correspondente a $Re = 2000$. Quando comparado o escoamento para $Re = 400$, com os resultados numéricos de Sheu e Tsai (2002), encontra-se uma diferença de 1,4 e 3,5 % nas direções coordenadas x e y , respectivamente.

Tabela 1. Posição do centro do vórtice principal no plano de simetria para configuração de cavidade com movimentação paralela da tampa.

Re	100	400	500	600	700	750
x/L	0,6767	0,6248	0,6152	0,6083	0,6036	0,6017
y/L	0,7559	0,5794	0,5415	0,5143	0,4960	0,4886
Re	800	850	1000	1200	1500	2000
x/L	0,6002	0,5989	0,5967	0,5968	0,6016	0,6169
y/L	0,4823	0,4777	0,4686	0,4628	0,4607	0,4630

5.2. Escoamento com $\alpha = 15^\circ$

Os escoamentos para a configuração de cavidade com movimentação diagonal da tampa, com ângulo $\alpha = 15^\circ$, apresentam as mesmas estruturas da configuração da cavidade com tampa deslizante paralela à direção coordenada x , porém distorcidas devido à assimetria característica desta configuração, como visualizado claramente nas Figs. 4 e 5.

Estas figuras mostram as projeções das linhas de corrente, sobre os mesmos planos da figura anterior, para $Re = 700$ e $Re = 1500$. O plano correspondente a parede lateral em $z/L = 0$ e o plano B mostram a presença dos vórtices primário, secundários e de canto, onde aparentemente só um vórtice de canto é formado, a projeção sobre o plano C não permite mais confirmar a presença deste tipo de vórtices. As linhas de corrente sobre a tampa da cavidade permitem ver o grau de inclinação com que esta se movimentava. O número de vórtices no plano C aumenta quando o Re passa de 700 a 1500. A linha que descreve o centro do vórtice principal apresenta notória inclinação respeito dos planos anterior e inferior; na região próxima da parede lateral $z/L = 0$ localiza-se abaixo da linha horizontal média, já na região próxima da parede lateral $z/L = 1$ localiza-se na parte superior direita.

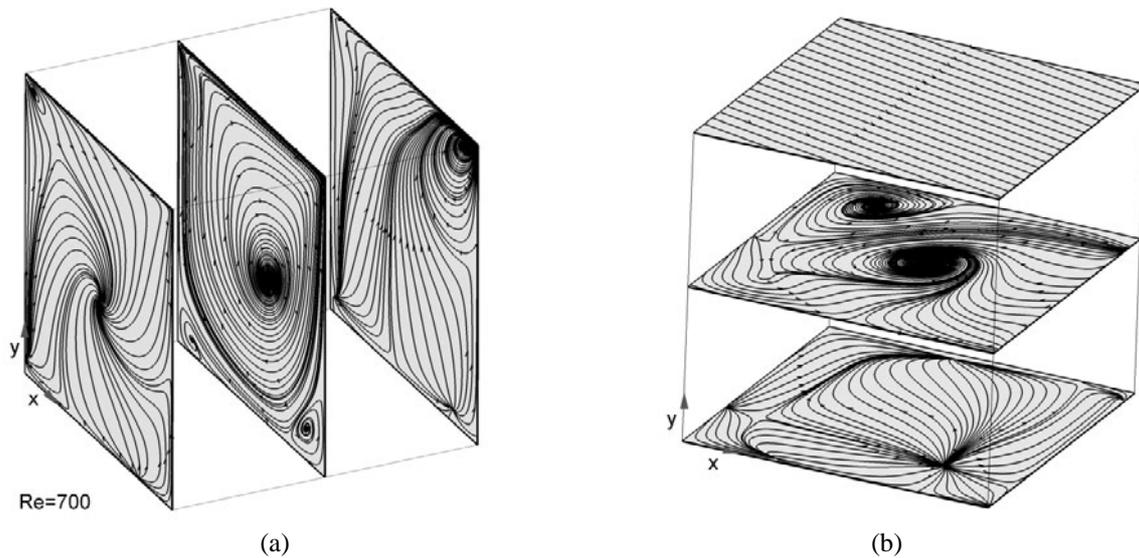


Figura 4. Projeção das linhas de corrente, $Re = 700$ e $\alpha = 15^\circ$; (a) sobre as paredes laterais e o plano B, (b) sobre o plano inferior, o plano C e a tampa.

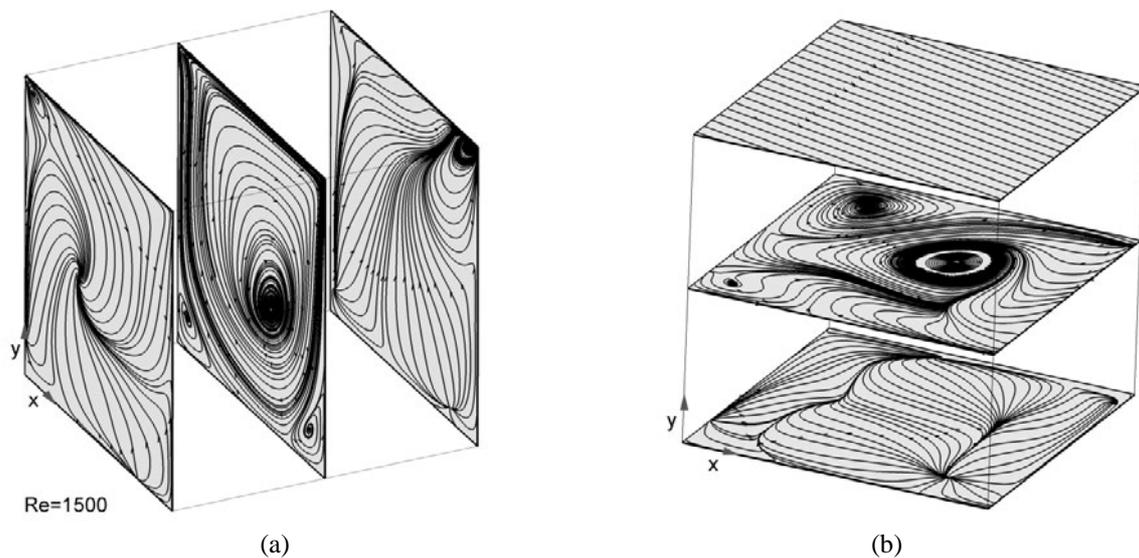


Figura 5. Projeção das linhas de corrente, $Re = 1500$ e $\alpha = 15^\circ$; (a) sobre as paredes laterais e o plano B, (b) sobre o plano inferior, o plano C e a tampa.

5.3. escoamento com $\alpha = 30^\circ$

Nesta configuração, em que o ângulo de movimentação diagonal da tampa se incrementa a 30° , observam-se mudanças mais acentuadas, se a análise continua através da projeção das linhas de corrente nos planos equidistantes e paralelos nas direções coordenadas y e z . Por exemplo: o centro do vórtice principal para $Re = 700$ (Fig. 6a, plano B) se localiza aproximadamente na parte central, enquanto que para $Re = 1500$ (Fig. 7a) deslocou-se para a parte inferior esquerda; o número de vórtices que aparecem no plano C (Figs. 6b e 7b) aumentam consideravelmente, passando de

dois ($Re = 700$) para cinco ($Re = 1500$). Evidentemente, há a necessidade de uma análise mais cuidadosa que permita identificar claramente as características dos vórtices presentes, principalmente dos novos vórtices secundários que aparecem, pois a análise através das projeções das linhas de corrente resulta insuficiente. Critérios como o Q (Jeong e Hussain, 1995) e o H (Hussain, 1993) são parâmetros a ser considerados para posterior análise.

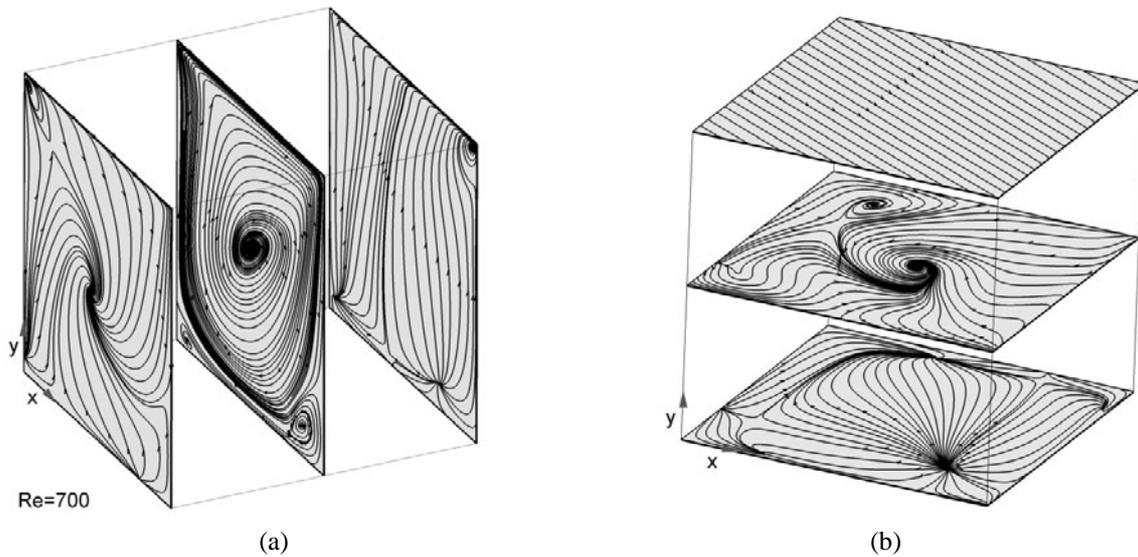


Figura 6. Projeção das linhas de corrente, $Re = 700$ e $\alpha = 30^\circ$; (a) sobre as paredes laterais e o plano B, (b) sobre o plano inferior, o plano C e a tampa.

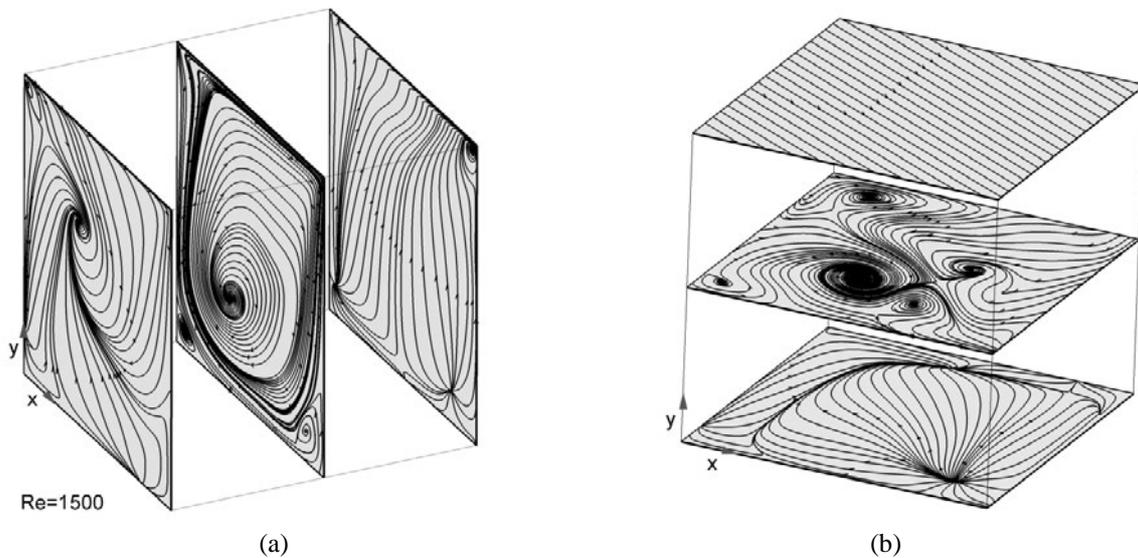


Figura 7. Projeção das linhas de corrente, $Re = 1500$ e $\alpha = 30^\circ$; (a) sobre as paredes laterais e o plano B, (b) sobre o plano inferior, o plano C e a tampa.

5.4. escoamento com $\alpha = 45^\circ$

As características do padrão do escoamento no interior de cavidades com movimentação diagonal da tampa, configuração com $\alpha = 45^\circ$, são apresentadas nas Figs. 8-10. Devido à existência de simetria dos escoamentos respeito ao plano A, os resultados são apresentados com projeções das linhas de corrente sobre os planos A, transversal ao plano A e C.

Na Fig. 3 mostra-se a topografia do escoamento no plano A, observando-se um vórtice primário, que passa por grandes mudanças à medida que o Re aumenta, e dois vórtices secundários nos extremos inferiores do plano. Para os menores Re (100), o padrão do escoamento é similar ao padrão do escoamento bidimensional (Padilla *et al.* 2005, Ghia *et al.* 1982) com centro do vórtice primário localizado em $x/L=0,5716$, $y/L=0,7663$ e $z/L=0,5716$. À medida que

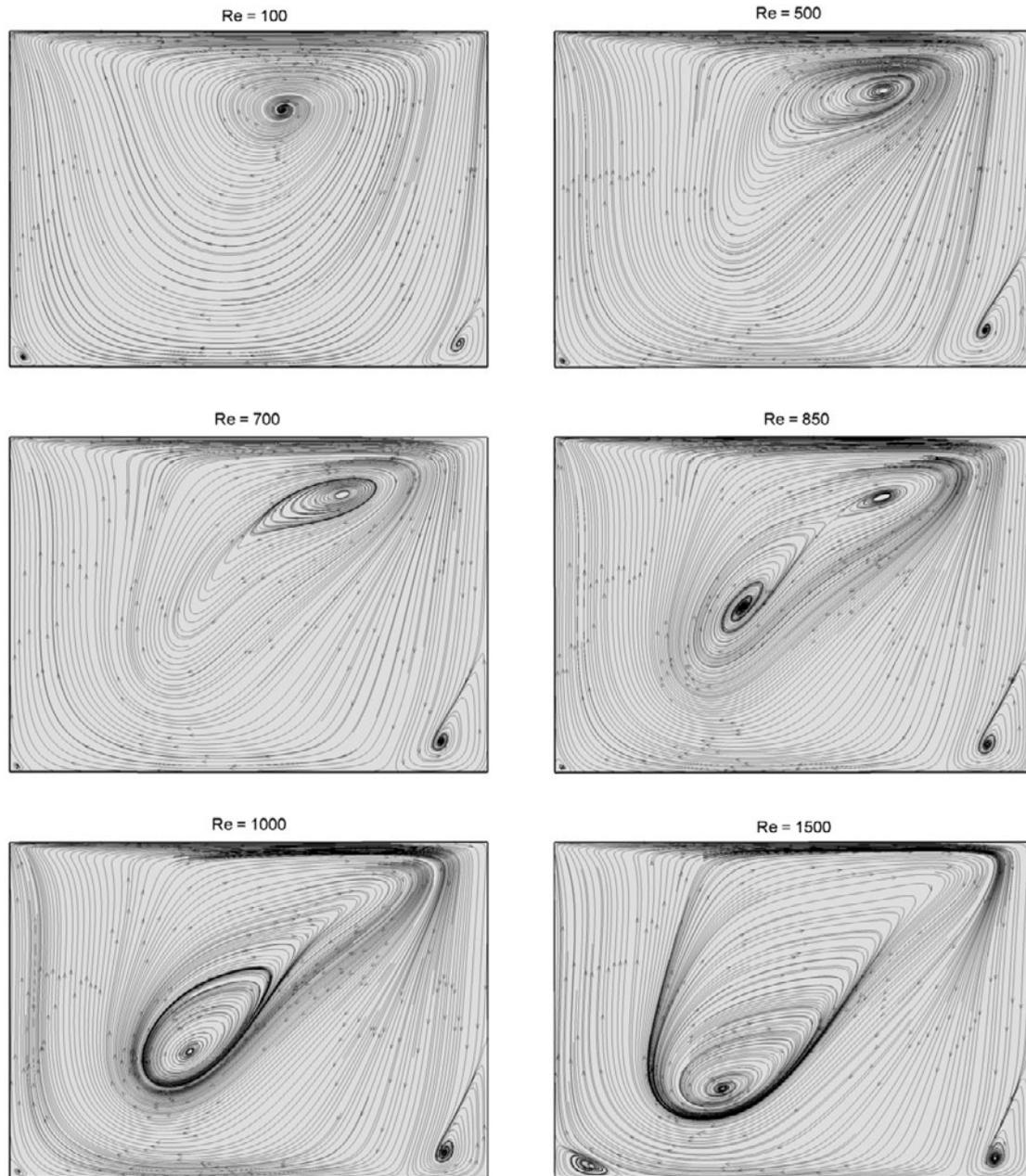


Figura 8. Projeção das linhas de corrente no plano A.

Tabela 1. Posição do centro do vórtice principal para no plano de simetria para configuração de cavidade com movimentação diagonal da tampa, $\alpha = 45^\circ$.

Re	100	400	500	600	700	750
x/L	0,5716	0,6743	0,6900	0,6949	0,6959	0,6944
y/L	0,7663	0,8128	0,8233	0,8278	0,8285	0,8260
z/L	0,5716	0,6743	0,6900	0,6949	0,6959	0,6944
Re	800	850	1000	1200	1500	2000
x/L	0,6914	0,3937	0,3766	0,3673	0,3515	0,3202
y/L	0,8214	0,4935	0,3759	0,3187	0,2674	0,2206
y/L	0,6914	0,3937	0,3766	0,3673	0,3515	0,3202

Re é incrementado, o centro do vórtice primário se desloca para a direita ($Re = 700$) e logo passa para a parte inferior da cavidade ($Re = 1000$). A posição exata do centro do vórtice principal, para os diversos *Re* considerados, são

apresentados na Tab. 2. Um fenômeno interessante é evidenciado para $750 \leq Re \leq 850$, trata-se do surgimento e coexistência de dois vórtices secundários no interior do vórtice primário. Inicialmente, o vórtice secundário formado próximo da região central é menor ($Re = 750$), mais logo passa a ser dominante ($Re = 850$), até anular o outro e se posicionar como centro do vórtice principal.

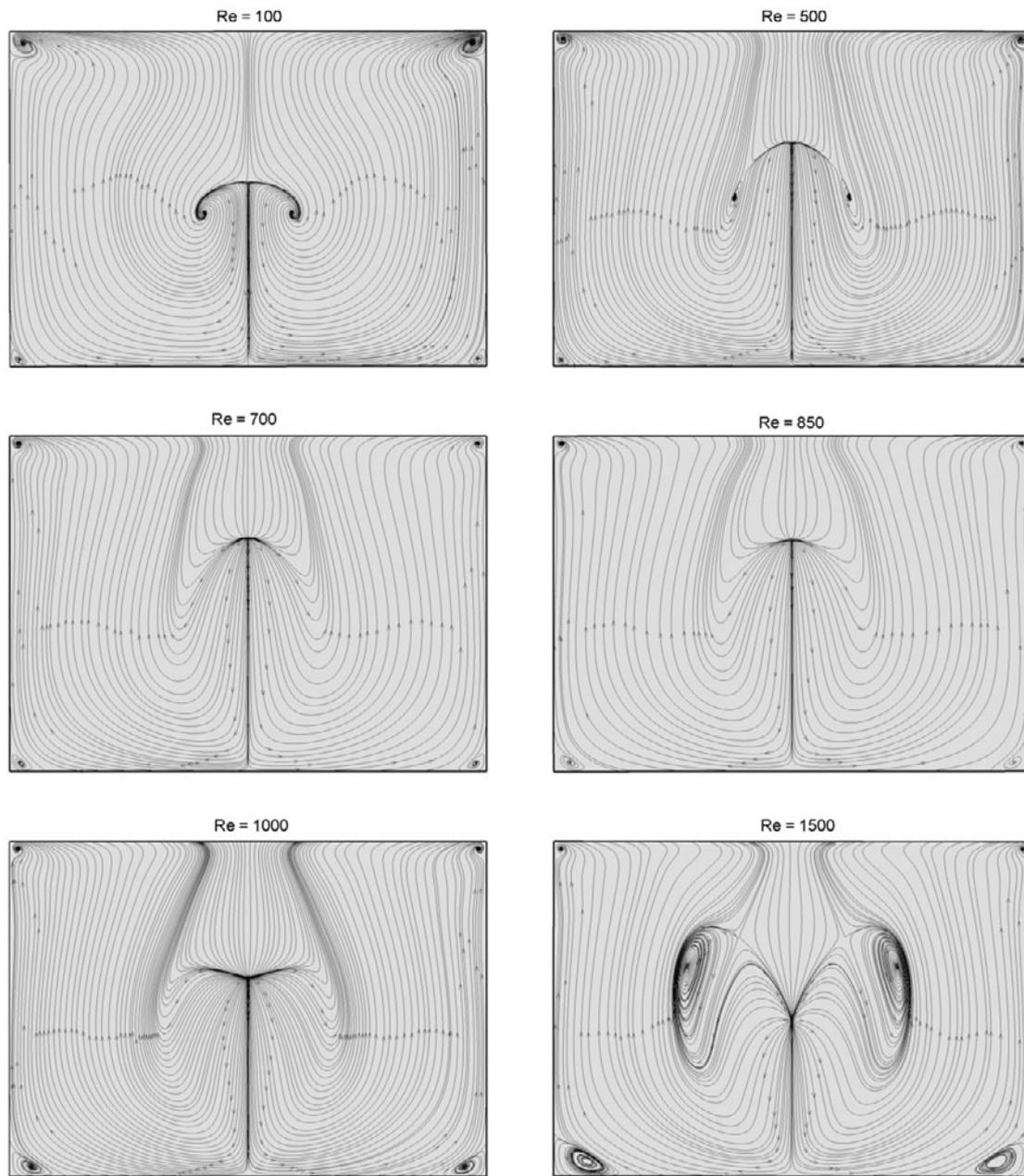


Figura 9. Projeção das linhas de corrente no plano transversal ao plano A.

As características dos escoamentos no plano transversal ao plano A são mostrados na Fig. 9. Observam-se quatro vórtices pequenos dispostos nos extremos do plano, para todos os casos. Por outro lado, na parte central as mudanças são notórias. Para $100 \leq Re \leq 500$, um par de vórtices estão presentes nos extremos da linha de recolamento (Sheu e Tsai, 2002). Para $600 \leq Re \leq 1000$, os vórtices não estão mais presentes, observando-se um ponto de repulsão (ponto de onde emergem linhas de corrente); este ponto é chamado por Povitsky (2005) de ponto de estagnação (visualizado através do campo de vetores). A partir de $Re = 1200$, o ponto de repulsão coexiste com o par de vórtices, os quais surgem novamente, porém diferentes em forma e tamanho e dispostos com centro acima da metade superior do plano, como visualizado para $Re = 1500$. As linhas de corrente no plano C são mostradas na Fig. 10. Para $Re > 400$ aparecem pares de vórtices dispostos simetricamente, até três pares para $Re = 2000$. A partir de $Re > 400$ observam-se também linhas de separação (Sheu e Tsai, 2002) e pontos de repulsão e atração.

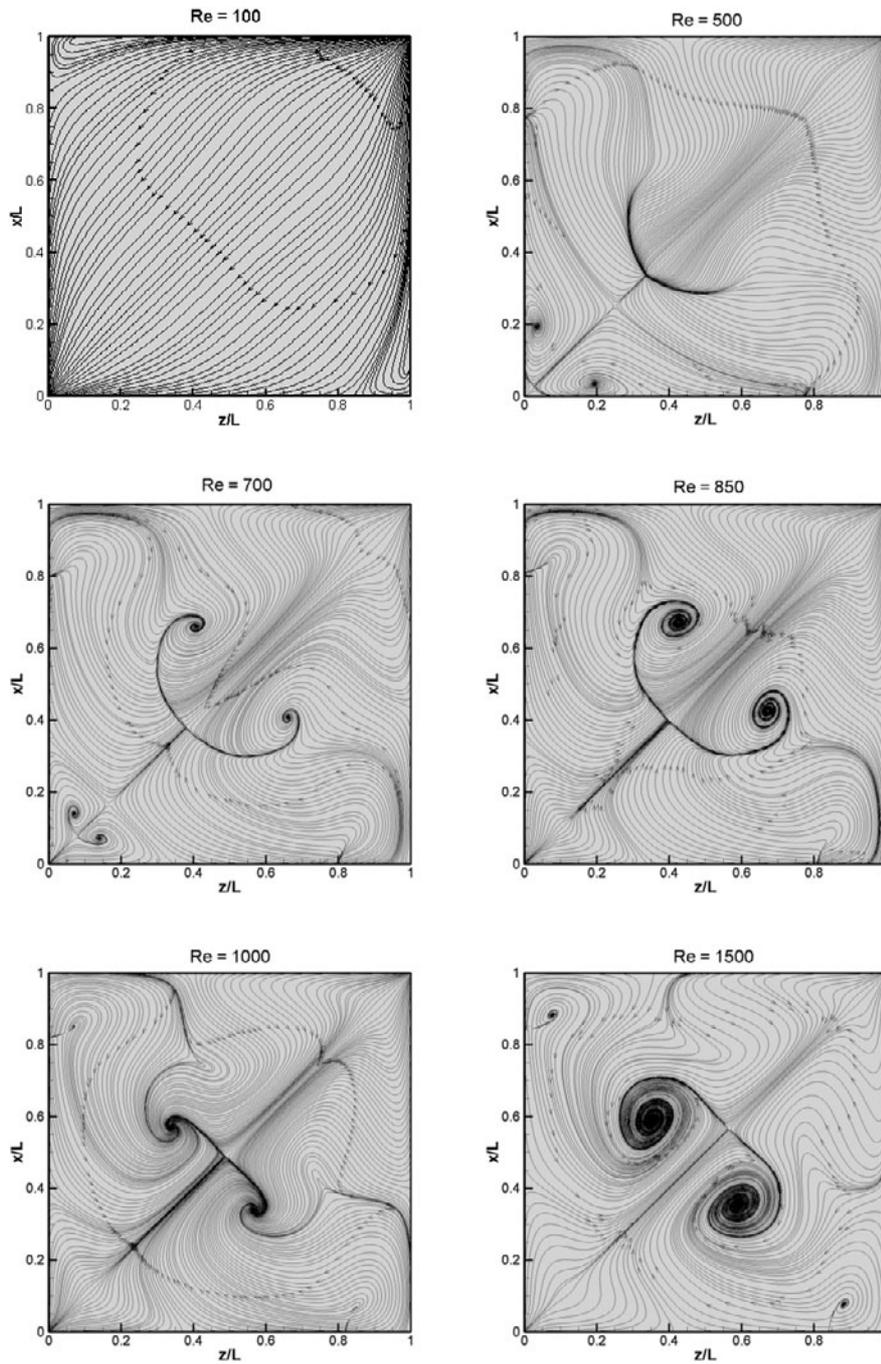


Figura 10. Projeção das linhas de corrente no plano C.

5.5. Comparação

Para comparar quantitativamente as duas configurações de escoamentos em cavidades, foi calculada a transferência de quantidade de movimento volumétrico. Segundo Povitsky (2005), define-se a quantidade de movimento por unidade de massa na direção paralela à movimentação da tampa como $M_p = u \cos \alpha + w \operatorname{sen} \alpha$ e a quantidade de movimento na direção transversal à movimentação da tampa como $M_t = w \cos \alpha - u \operatorname{sen} \alpha$. Assim, a integral de volume é calculada da seguinte forma:

$$L_p = \frac{1}{V} \int_V M_p, \quad (5)$$

$$L_t = \frac{1}{V} \int_V M_t . \quad (6)$$

Na Fig. 8 tem-se a quantidade de movimento volumétrico paralelo e transversal como função do número de Reynolds. A quantidade de movimento paralela (Fig. 11a) decresce à medida que Re se incrementa, sendo que a magnitude para a configuração de cavidade com movimentação paralela da tampa é maior que a magnitude que para a configuração de cavidade com movimentação diagonal da tampa, por tanto a magnitude de L_p cresce à medida que o ângulo da tampa decresce. Em relação à quantidade de movimento volumétrico transversal (Fig. 11b), a distribuição se apresenta crescente até aproximadamente $Re = 800$ e 500 para as configurações com ângulo $\alpha = 45^\circ$ e 0° , respectivamente, para logo decrescer suavemente até os maiores valores de Re . L_t cresce em função do incremento do ângulo α . Os parâmetros L_p e L_t transportam a informação de quão tridimensional é o escoamento com incremento no número de Reynolds.

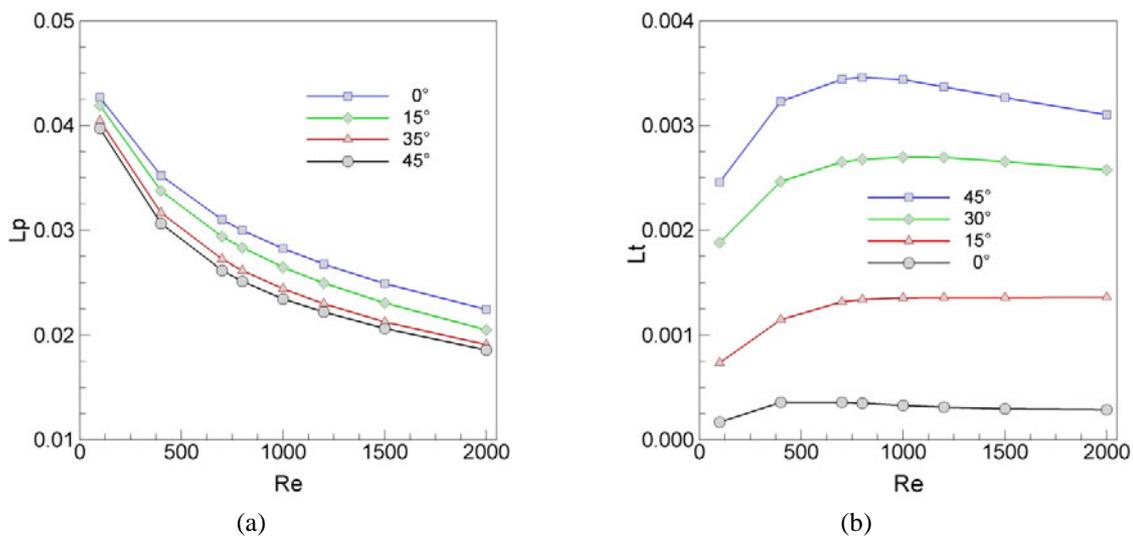


Figura 11. Integral de quantidade de movimento volumétrico; (a) paralela, (b) transversal.

6. Conclusões

Uma grande quantidade de simulações tridimensionais de escoamentos estáveis no interior de cavidades com tampa deslizante foram realizadas para caracterizar o padrão do escoamento para quatro configurações, dependentes do ângulo de movimentação da tampa (movimento diagonal). Os resultados mostram que tratam-se de escoamentos muito diferentes, sendo que a complexidade aumenta para as configurações que não apresentam simetria, como são as configurações com $\alpha = 15^\circ$ e 30° . Estruturas como os vórtices primário, secundários (localizados na parte inferior da cavidade) e de canto são comuns a todas as configurações, porém com deformações originadas pelo ângulo de incidência do escoamento mais acelerado (próximo da tampa). Quando o ângulo α é diferente de 0, outros vórtices secundários aparecem e geralmente aumentam em número com o incremento do número de Reynolds. A quantidade de movimento na direção paralela à tampa aumenta à medida que o ângulo α decresce e a quantidade de movimento na direção transversal da tampa aumenta à medida que ângulo α cresce. A diferença em magnitude da quantidade de movimento na direção paralela e transversal da tampa é de uma ordem de grandeza. Como comentado, existe a necessidade do uso de novos procedimentos de análise que permitam entender melhor a natureza das estruturas.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG, CNPq e ao CENPES-PETROBRAS pelo apoio financeiro.

8. Referências

- Aidum, C. K., Triantafillopoulos, N. G. and Benson, J. D. 1991, Global Stability of a Lid-Driven Cavity with Through Flow: Flow Visualization Studies”, Phys. Fluids A 3, pp. 2081-2091.
- Babu, V. and Korpela, S. A., 1994, Numerical Solution of the Incompressible Three-Dimensional Navier-Stokes Equations, Computers Fluids 23(5). Pp. 675-691.

- Benjamin, A. S. and Denny V. E., 1979, On the Convergence of Numerical Solutions for 2D Flows in a Cavity Large Re, J. Comput. Phys., 33, pp. 340-358.
- Botella, O., and Peyret, R., 1998, "Benchmark Spectral Results on the Lid-Driven", Comput Fluids, vol 27(4), pp. 421-433.
- Deshpande, M. D. and Milton, S. G., 1998, Kolmogorov Scales in a Driven Cavity Flow, Fluid Dyn. Res., 22, pp. 359-381.
- Ferziger, J. H., Peric, M. 1999, Computational methods for fluid dynamics, 2nd Ed., Springer.
- Ghia, U., Ghia, K. N. and Shin, C. T., 1982, High-Re Solutions for Incompressible Flow Using the Navier-Stokes Equations and a Multigrid Method, J. Comput. Phys., 48, pp. 387-411.
- Iwatsu, R. Ishi, K., Kawamura, T., Kawahara, K. and Hyun, J. M., 1989, Simulation of Transition to Turbulence in a Cubic Cavity, AIAA Pap. No 98-0040.
- Jeong, J. e Hussain, F., 1995, "On the Identification of a Vortex", Journal of Fluid Mechanics 285, 69-94
- Koseff, J. R. and Street R. L., 1984, Visualization of a Shear Driven Three-Dimensional Recirculation Flow, J. Fluids Eng., 106, pp. 21-29.
- Ku, H. C., Hirsh, R. S. and Taylor, T. D., 1987, A Pseudospectral Method for Solutions of the Three-dimensional Incompressible Navier-Stokes Equations, J. Comput. Phys., 70, pp. 439-462.
- Moin, P., Kim, P., 1982, Numerical Investigation of Turbulent Channel Flow, Journal of Fluid Mechanics, vol. 118, pp. 341-377.
- Padilla, E. L. M. e Silveira Neto, A., 2005, Desenvolvimento de um Código Computacional Tridimensional para Solução de Escoamentos em Transição e Turbulência, XXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Guarapari - ES. Proceeding of the CILAMCE 2005, v. 1, p. 1-12.
- Padilla, E. L. M., Martins, A. L. E Silveira Neto, A., 2005, Large-Eddy Simulation of the Three-Dimensional Unstable Flow in a Lid-Driven Cavity. In: 18TH International Congress of Mechanical Engineering, Ouro Preto, Proceedings of COBEM 2005, v. 1, p. 1-8.
- Padilla, E. L. M., 2004, Simulação de Grandes Escalas da Transição à Turbulência em Sistemas Rotativos com Transferência de Calor, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Patankar, S. V., 1980, Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere.
- Povitsky, A., 2005, Three-dimensional flow in cavity at yaw, Nonlinear Analysis 63. Pp. E1573-e1584.
- Sheu, T. W. H. and Tsai, S. F., 2002, Flow Topology in a Steady Three-Dimensional Lid-Driven Cavity, Comput. Fluids, 31, pp. 911-934.
- Stone, H. L., 1968, Iterative Solutions of Implicit Approximations of Multidimensional Partial Differential Equations, SIAMJ Num. Anal., vol. 5, pp 530-558.

CHARACTERIZATION OF FLOWS INSIDE DIAGONAL LID-DRIVEN CAVITIES

Elie Luis M. Padilla
epadilla@mecanica.ufu.br

Tiago de Assis Silva
tasilva@meanica.ufu.br

Aristeu da Silveira Neto
Federal University of Uberlândia
School of Mechanical Engineering
aristeus@mecanica.ufu.br

Abstract – Lid-driven cavity flows are three-dimensional with many characteristics structures that are function of Reynolds number and aspect ratio of the cavity. In present time, in view of many engineering applications and physical problem understanding, there are many researches about this kind of flow. At the classical benchmark case the lid moves in the direction parallel to the cavity side wall. New studies have been done by considering the lid of cavity moving along the lid diagonal with arbitrary angle. The 3-D lid-driven cavity flow is studied by numerical solution of the 3-D Navier-Stokes equations using a computational code developed in house. Computational results for lid moving with angles 15°, 30° e 45° are compared to the case when the lid moves in the direction parallel to the cavity side walls. A flow is investigated numerically for the range of Reynolds numbers corresponding to existence of a laminar solution (100 – 2000). The volume integrals of momentum in the direction of lid motion and perpendicular to it an introduced to compare cases in a quantitative way. The Navier-Stokes equations were discretized with finite volume method in a staggered grid with second-order time advance schemes and second-order spatial schemes. The fractional step method was used to resolve velocity and pressure coupling.

Keywords: stable flow, cavity, three-dimensional simulation.