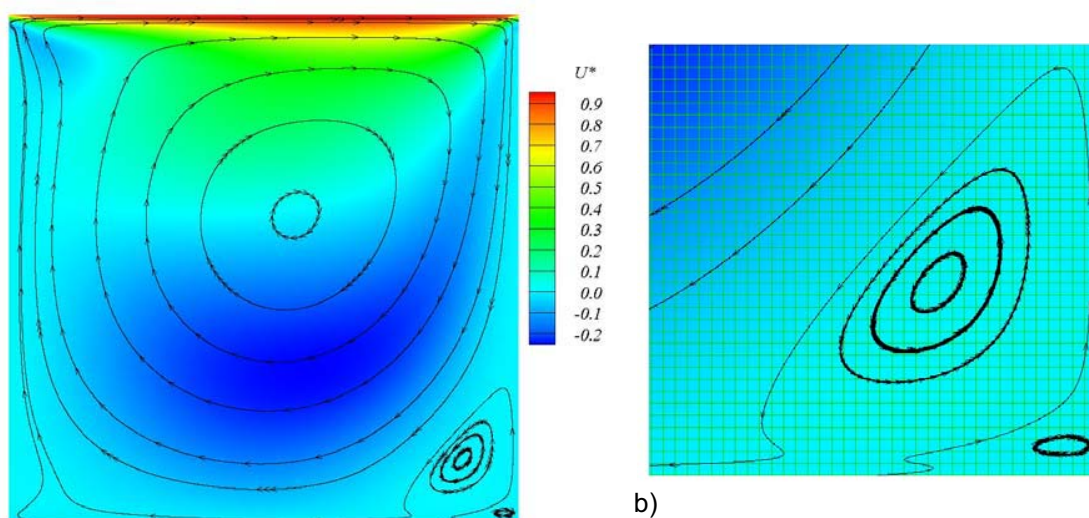


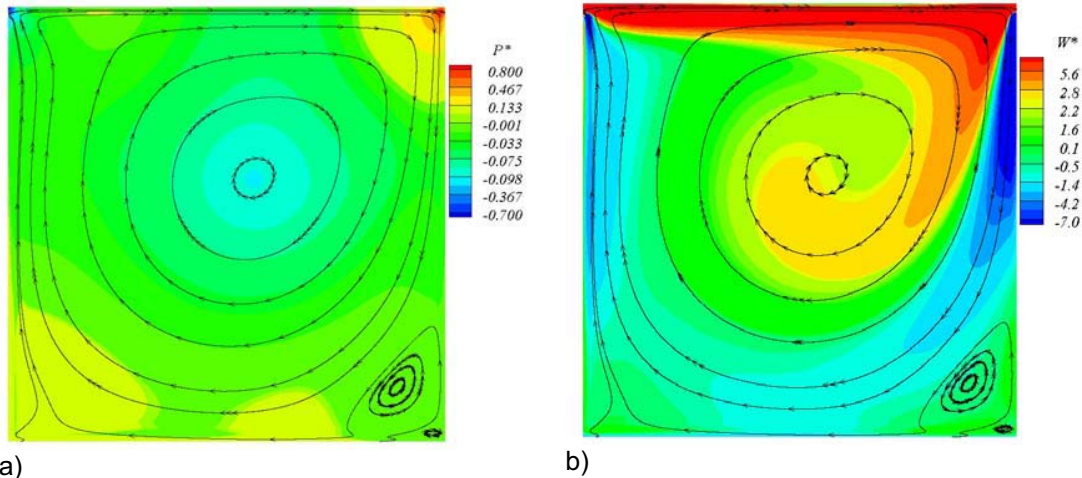
Um resultado interessante para $Re=400$ é a formação de uma recirculação terciária no canto inferior direito da cavidade no caso simulado com domínio retangular. A Figura 4.51 (b) mostra em detalhe este resultado, a capacidade do método pseudo-espectral de capturar as pequenas estruturas que aparecem no escoamento.

A Figura 4.52 mostra os campos de pressão e vorticidade para o caso de $Re=400$ com domínio externo retangular, sendo possível fazer uma análise qualitativa dos resultados, mostrando uma boa relação com o que era esperado para esses campos, quando comparados com dados de referência (GHIA et al., 1982 e ARRUDA, 2004).

Para o campo de pressão, Figura 4.52 (a), observa-se que esta possui um mínimo local interior do vórtice central. Nos cantos superiores, devido as singularidades matemáticas, existem extremos de pressão. A vorticidade, Figura 4.52 (b), evidencia igualmente a recirculação central. Percebe-se também os maiores níveis de cisalhamento junto as paredes virtuais.



a)
 Figura 4.51: Cavidade quadrada; domínio externo retangular; $Re=400$; a) Cavidade; b) Detalhe do canto inferior direito.



a) b)
 Figura 4.52: Cavity quadrada; domínio externo retangular; $Re=400$; a) campo de pressão, b) campo de vorticidade

4.3.7 Influência da filtragem

Nas simulações da cavity para $Re=1.000$ foi observado que, somente alterando o domínio externo, não foi possível atingir o regime permanente, como pode ser visualizado nas Figura 4.53 (a) e (b), as quais mostram a evolução da velocidade horizontal e vertical, respectivamente, em função do tempo, obtidas por uma sonda colocada no centro da cavity.

Canuto (1988) propõe filtrar os campos de velocidade, em determinados intervalos de tempo, para longos períodos de integração. Este procedimento, como já foi descrito, funciona como um modelo de turbulência, dissipando a energia que se acumula no número de onda de corte.

Nas simulações desta sessão foi variado o intervalo de filtragem (N_f) para o escoamento em uma cavity à $Re=1.000$. Com o domínio externo de $L_x = 4\pi$ e $L_y = 2\pi$ utilizando 512x256 nós de colocação e o domínio interno com $l_x = l_y = \pi$ tendo 128x128 nós de colocação, o passo de tempo foi de $\Delta t = 10^{-3}$ s. Foi utilizado o filtro *Sharpened Raised Cosine*, tanto para o cálculo do termo fonte, quanto para a filtragem dos campos de velocidade. Os intervalos de filtragem temporal testados foram: *sem filtragem*, $N_f = 100$, $N_f = 10$, e $N_f = 1$.

A Figura 4.53 mostra as componentes (a) horizontal e (b) vertical da velocidade em um ponto no centro da cavity em função do tempo, para os diferentes intervalos de filtragem utilizados.

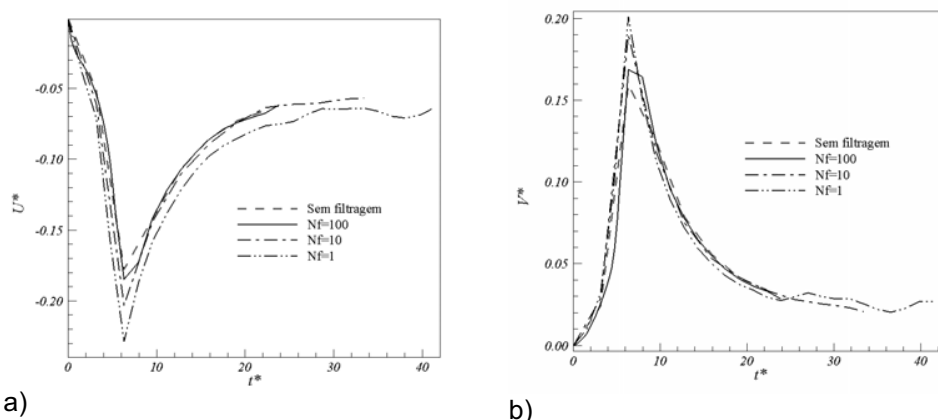


Figura 4.53: Componentes a) horizontal e b) vertical da velocidade no centro da cavidade a $Re=1.000$ em função do tempo para diferentes intervalos de filtragem temporal.

Os resultados da Figura 4.53 (a) e (b) mostram uma ligeira melhora no avanço temporal com a diminuição do passo de filtragem, mas ainda não é possível atingir plenamente o regime permanente. É possível que com a implementação da terceira dimensão e com modelos de turbulência apropriados para métodos espectrais, seja obtida uma melhora na estabilidade dos cálculos para números de Reynolds mais elevados (MOREIRA, 2007)². Na Figura 4.54 pode-se notar que a norma L_2 é modificada pela diminuição do intervalo de filtragem.

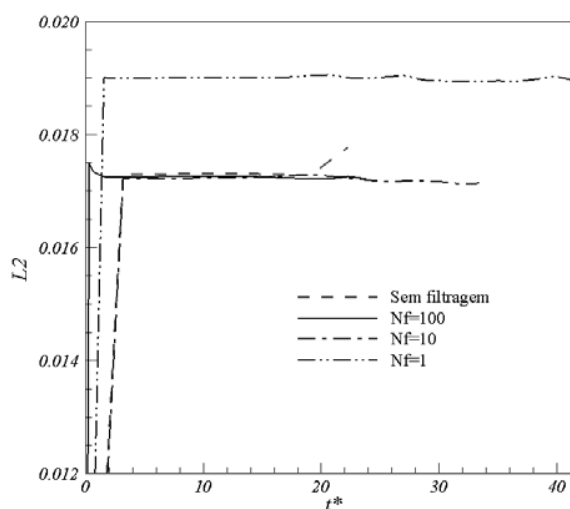


Figura 4.54: Norma L_2 para diferentes intervalos entre de filtragens

² Comunicação interna: MOREIRA, L., Q., Laboratório de Transferência de Calor e Massa da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Mesmo sem atingir o regime permanente, as componentes de velocidade estão tendendo à um valor constante como é mostrado nas Figura 4.53 (a) e (b). As Figuras 4.54 e 4.55 mostram os perfis das componentes horizontal e vertical da velocidade, respectivamente, obtidos por com os de Ghia et al. (1982) e Padilla (2006).

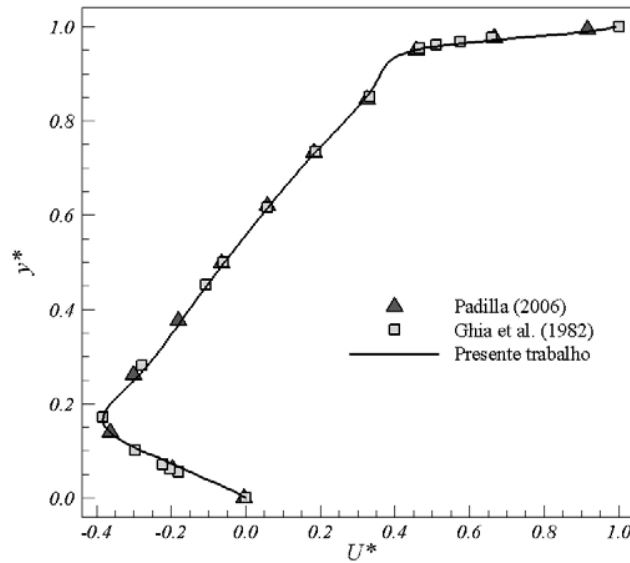


Figura 4.55: Perfil da componente horizontal de velocidade, obtido por uma linha vertical no centro da cavidade, com $N_f=10$, para $Re=1.000$.

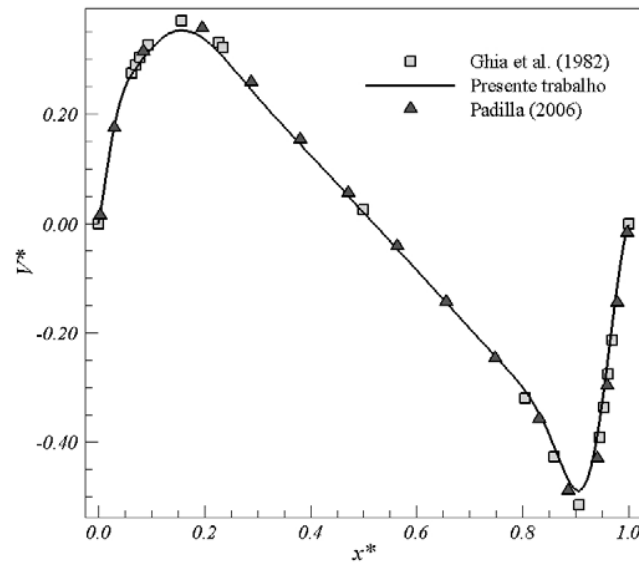


Figura 4.56: Perfil da componente vertical de velocidade, obtido por uma linha horizontal no centro da cavidade, com $N_f=10$, para $Re=1.000$.

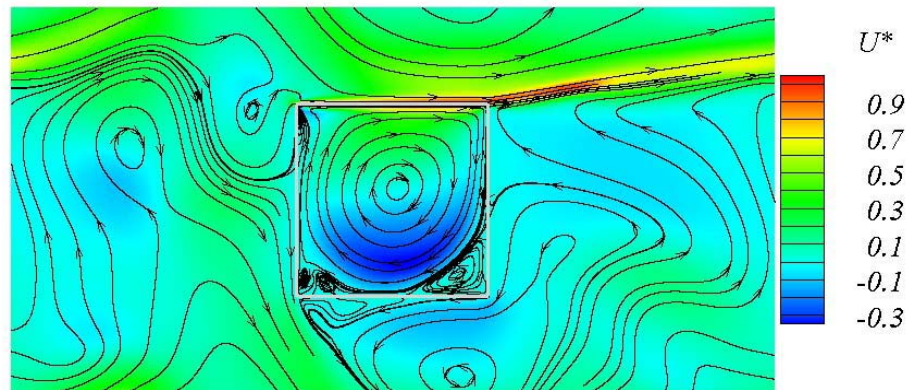


Figura 4.57: Componente horizontal de velocidade à $Re=1.000$ com $N_f=10$.

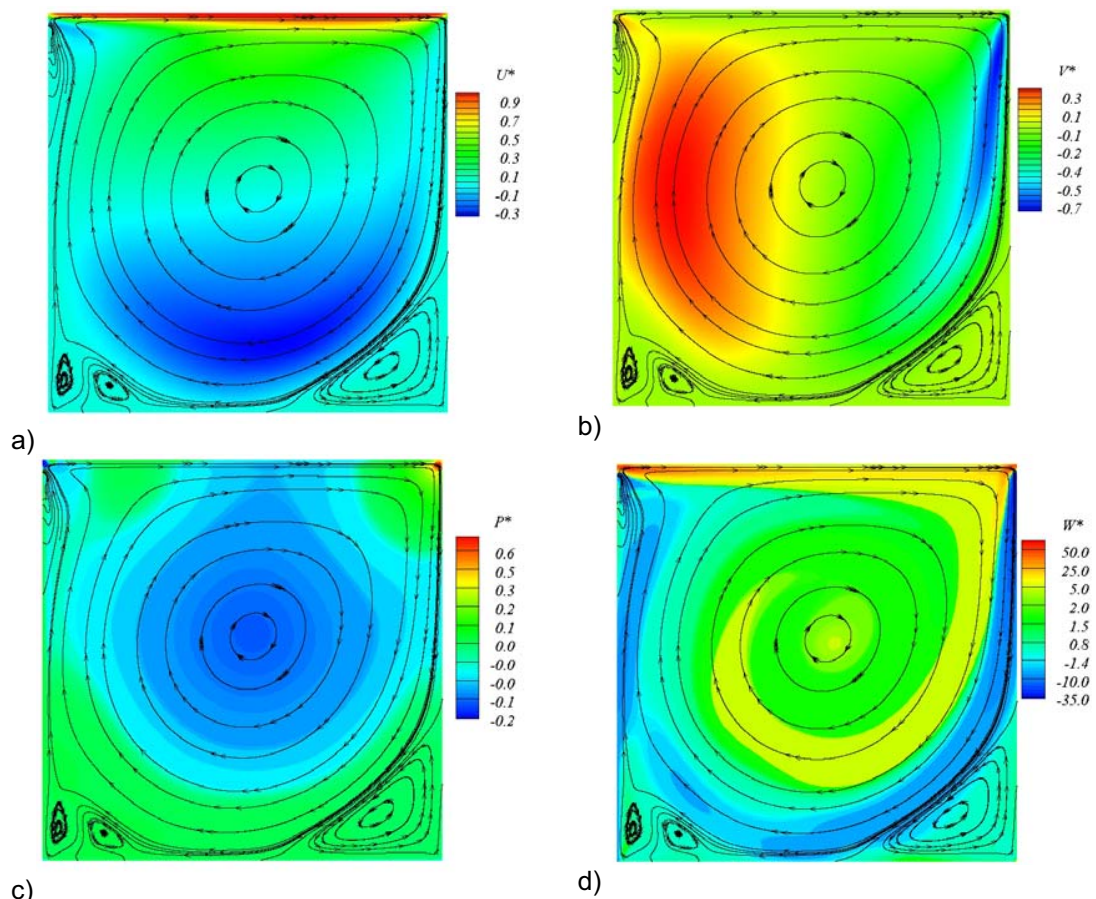


Figura 4.58: Cavity com tampa deslizando à $Re=1.000$ com $N_f=10$ a) componente horizontal de velocidade, b) componente vertical de velocidade, c) campo de pressão, d) campo de vorticidade.

Nas Figuras 4.56 e 4.57 (a), (b), (c) e (d) é possível realizar uma análise qualitativa dos resultados obtidos para a cavidade com $Re=1.000$, utilizando-se como intervalo de filtragem no tempo $N_t=10$. Os resultados estão qualitativamente consistentes quando comparados com os de Ghia et al. (1982) e os de Arruda (2004) não mostrados aqui. O centro de baixa pressão encontra-se no interior do vórtice primário. É possível observar que a bolha de recirculação secundária aparece bem definida no canto inferior direito, enquanto que no canto inferior esquerdo aparecem duas pequenas bolhas de recirculação. Analisando a Figura 4.58 (d), que mostra o campo de vorticidade, também apresenta-se qualitativamente consistente com a física, pois mostra uma maior vorticidade na parede superior da cavidade e vorticidade negativa próximas a parede laterais, mostrando a força de cisalhamento devido aos efeitos viscosos nestas regiões.

A Tabela 4.4 mostra a posição das recirculações primárias e secundárias das cavidades simuladas a $Re=100$ (Figura 4.19-d), $Re=400$ (Figura 4.50) e $Re=1.000$ (Figura 4.57) comparada com diferentes autores.

Tabela 4.4: Posição do centro das recirculações formadas na cavidade com tampa deslizante.

Re	Autores	Vórtice Central		Vórtice esquerdo		Vórtice Direito	
		x (m)	y (m)	x (m)	y (m)	x (m)	y (m)
100	Ghia et al. (1982)	0,6172	0,7344	0,0313	0,0391	0,9453	0,0625
	Hou et al. (1995)	0,6196	0,7373	0,0353	0,9451	0,9451	0,0627
	Arruda (2004)	0,62	0,78	-	-	-	-
	Presente trabalho	0,6172	0,7365	-	-	0,9525	0,0634
	% do erro em relação à Ghia et al. (1982)	0,00	0,29	-	-	0,76	1,44
400	Ghia et al. (1982)	0,5547	0,6055	0,0508	0,0469	0,8906	0,1250
	Hou et al. (1995)	0,5608	0,6078	0,0549	0,0510	0,8902	0,1255
	Arruda (2004)	0,55	0,60	-	-	0,88	0,12
	Presente trabalho	0,5614	0,6059	0,0621	0,0430	0,8895	0,1250
	% do erro em relação à Ghia et al. (1982)	1,21	0,07	22,24	8,32	0,12	0,00
1.000	Ghia et al. (1982)	0,5313	0,5625	0,0859	0,0781	0,8594	0,1094
	Hou et al. (1995)	0,5333	0,5647	0,0902	0,0784	0,8667	0,1137
	Arruda (2004)	0,53	0,58	0,09	0,08	0,84	0,13
	Presente trabalho	0,5269	0,5612	0,1535	0,0699	0,8361	0,1151
	% do erro em relação à Ghia et al. (1982)	0,83	0,23	78,70	10,50	2,71	5,21

A Tabela 4.4 mostra uma boa concordância para o parâmetro comparado (posição geométrica dos centros dos vórtices), com os resultados de Ghia et al. (1982), Hou et al. (1995) e Arruda (2004). Observa-se que os resultados da posição da recirculação primária estão muito próximos dos de Ghia et al. (1982) e de Hou et al. (1995), apresentando erros em torno de 1,00%. O vórtice secundário direito para todos os casos comparados também estão bem representados, os erros apresentados estão em torno de 1,00%, a menos do caso de $Re=1.000$ que apresenta um erro relativo de 5,21%.

O vórtice secundário esquerdo apresentou os maiores erro relativos. Para o caso comparado com número de Reynolds igual a 100 a simulação não conseguiu capturá-lo, isso se deve ao fato da proximidade da parede, pois é nessa região que sofre a maior influência do processo de filtragem da força. Nas outras duas comparações ($Re=400$ e $Re=1.000$) a posição da recirculação secundária esquerda não foi bem representada, acredita-se que o regime do escoamento ainda se encontra em processo transiente nessa região, principalmente no caso de $Re=1.000$.

A Tabela 4.5 mostra o valor da vorticidade no centro da recirculação primária para as cavidades simuladas a $Re=100$ (Figura 4.19-d), $Re=400$ (Figura 4.50) e $Re=1.000$ (Figura 4.57) comparada com diferentes autores.

Tabela 4.5: Valor da vorticidade no centro da recirculação primária.

Autores	$Re=100$	$Re=400$	$Re=1.000$
Ghia et al. (1982)	3,17	2,29	2,05
Hou et al. (1995)	3,13	2,29	2,08
Arruda (2004)	3,30	2,31	2,09
Presente trabalho	3,11	2,19	2,02
% do erro em relação à Ghia et al. (1982)	1,89	4,37	1,46

Como pode ser observado os valores da vorticidade para diferentes números de Reynolds estão próximos dos valores determinados por outros autores (GHIA et al., 1982, HOU et al., 1995 e ARRUDA, 2004). Os erros relativos variam de 1,46% a 4,37% em comparação com os dados de Ghia et al. (1982).

As tabelas 4.4 e 4.5 mostram que os resultados estão bem calculados na região central da cavidade, mostrando boa concordância com os dados de referência, porém nas regiões próxima as paredes os resultados sofrem influência do processo de filtragem do termo fonte, bem como do escoamento do domínio externo.

4.3.8 Zona de amortecimento (Buffer Zone)

Como último teste para buscar estabilizar os cálculos bidimensionais foi implementada uma zona de amortecimento (*buffer zone*, *sponge zone*), a qual foi colocada na parte direita do domínio de cálculo, a fim de amortecer as instabilidades formadas devido ao escoamento externo.

Com o domínio externo de $L_x = 4\pi$ e $L_y = 2\pi$ utilizando 256x128 nós de colocação e o domínio interno com $l_x = l_y = \pi$ tendo 64x64 nós de colocação, o passo de tempo foi de $\Delta t = 10^{-3}$ s, foi utilizado o filtro *Sharpened Raised Cosine*, tanto para o cálculo do termo fonte, quanto para a filtragem dos campos de velocidade. O intervalo de filtragem utilizado foi de $N_f = 10$. Foram simulados dois casos com $Re = 1.000$, um com a zona de amortecimento imposta e outro sem zona de amortecimento. As Figura 4.59 e Figura 4.60 mostram os campos da componente horizontal de velocidade para os dois casos simulados.

Nas Figuras 4.58 e 4.59 mostram-se as linhas de corrente sobre os campos de velocidade horizontal do escoamento na cavidade à $Re = 1.000$. Pode-se observar, que no campo com a zona de amortecimento, as linhas de corrente se apresentam muito mais alinhadas, com menos recirculações no interior do domínio. No campo sem zona de amortecimento aparecem três grandes zonas de recirculação no domínio exterior, mostrando uma maior complexidade no escoamento externo. Para o caso simulado com a zona de amortecimento foi possível fazer 5.000 iterações a mais que o caso simulado sem zona de amortecimento, dando um indicativo que o escoamento externo deve ser, de alguma forma, controlado para que o escoamento atinja o regime permanente. No entanto analisando-se a Figura 4.61, que compara a norma L_2 em função do tempo, o ganho no avanço temporal é muito pequeno comparado com o custo computacional que a imposição da zona de amortecimento requer, uma vez que para se impô-la é preciso trazer os campos de velocidade para o espaço físico, calcular a função ZA dada em 3.17 e, por último, transformar a função ZA para o espaço espectral.

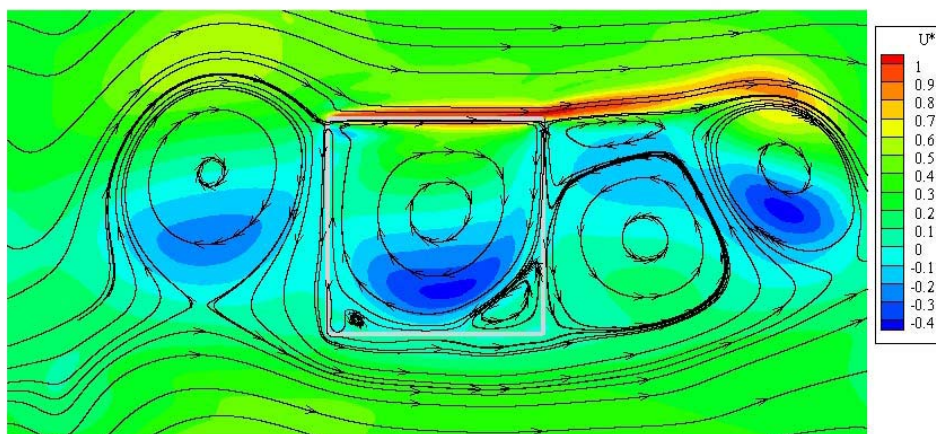


Figura 4.59: Campo de velocidade horizontal sem zona de amortecimento

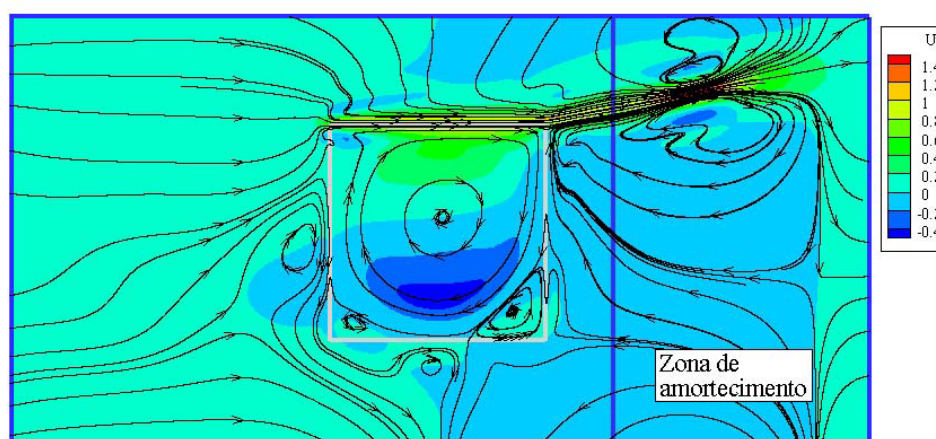


Figura 4.60: Campo de velocidade horizontal com zona de amortecimento

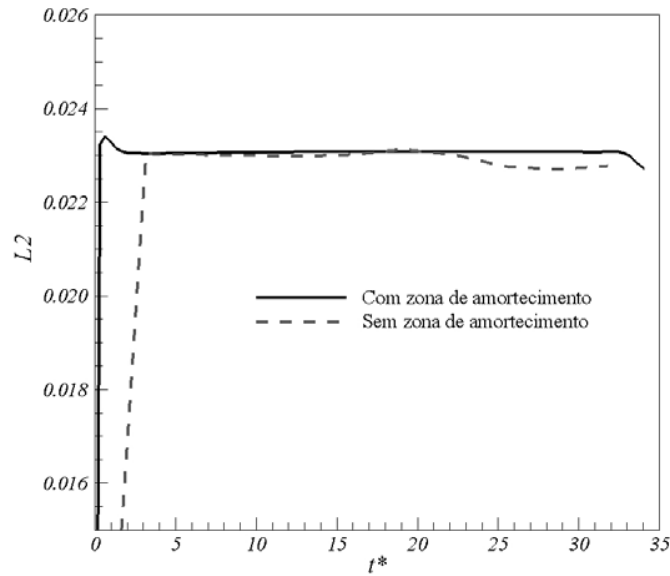


Figura 4.61: Norma L_2 simulação com e sem zona de amortecimento.

A Figura 4.60 mostra o monitoramento das velocidades horizontal e vertical, respectivamente, no centro da cavidade. Na simulação em que não se utilizou a zona de amortecimento a velocidade apresenta algumas oscilações no decorrer do tempo, isto ocorre devido ao desprendimento dos turbilhões gerados no escoamento externo. Já no caso em que se tem a zona de amortecimento imposta, devido a ausência desses turbilhões não aparecem essas instabilidades.

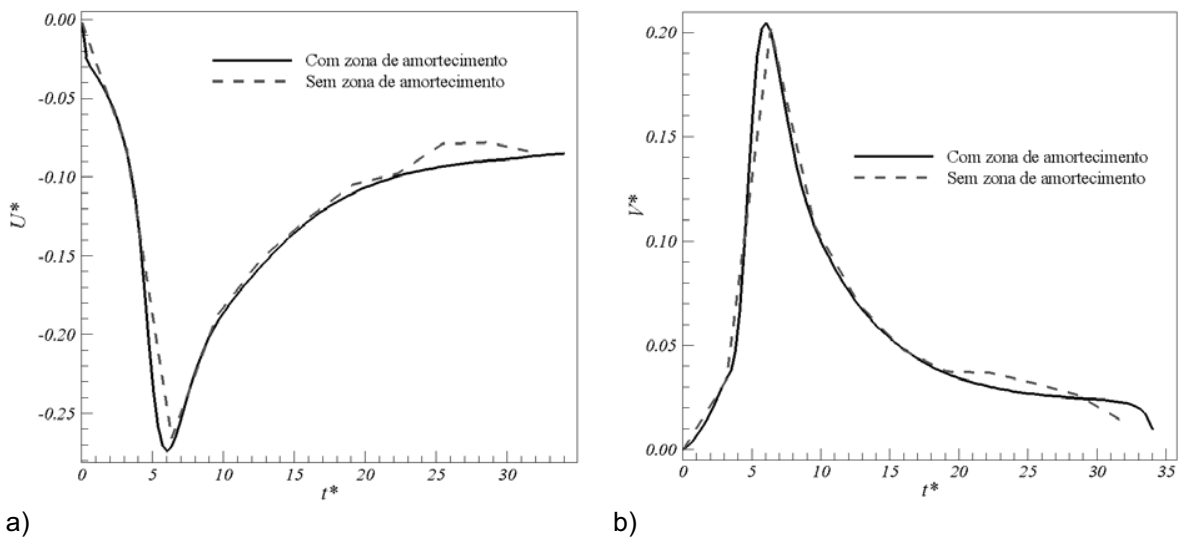


Figura 4.62: Componentes a) horizontal e b) vertical da velocidade no centro da cavidade comparando a utilização da zona de amortecimento.

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

O trabalho apresentado teve como motivação a necessidade de capturar os fenômenos de engenharia que somente métodos de alta ordem conseguem representar significativamente, como, por exemplo, os fenômenos de transição a turbulência, de aeroacústica, de combustão, entre outros. Buscando atingir esse objetivo iniciou-se, no presente trabalho, um projeto maior, com o qual se objetiva o desenvolvimento de uma metodologia híbrida, buscando-se a fusão das metodologias de fronteira imersa e pseudo-espectral.

O método pseudo-espectral de Fourier permite resolver EDPs com uma ordem de precisão muito alta. Em casos que a equação a ser resolvida é suave e apresenta condições de contorno periódicas a ordem de precisão da metodologia restringe-se a ordem de precisão da máquina, como foi observado no caso da resolução dos vórtices em decaimento temporal de Taylor-Green. A solução numérica, quando comparada com a solução analítica, apresentou erros da ordem de 10^{-16} , quando se utiliza dupla precisão.

Outra grande vantagem dessa metodologia é com relação ao custo computacional, devido ao desacoplamento do termo da pressão, que nos casos de metodologias clássicas, é o ponto do algoritmo mais oneroso. No método pseudo-espectral a pressão só é calculada caso seja necessário para pós-processamento. Além disto, o uso da FFT mostra-se muito mais eficiente que outras metodologias de solução de EDP's.

Essa nova metodologia mostrou-se eficiente para o caso da cavidade com tampa deslizante a baixos números de Reynolds, Permitindo determinar a velocidade e as estruturas clássicas que aparecem nesse escoamento.

No caso de $Re=400$ foi evidenciada a formação uma bolha de recirculação terciária, a qual não foi observada em outras publicações. No caso de $Re=1.000$, apesar dos cálculos

não atingirem por completo o regime permanente, foi possível evidenciar estruturas de recirculação terciária da mesma natureza que se observou no caso de $Re=400$.

Imagina-se que, devido a alta ordem de precisão do método, as instabilidades de altas frequências do escoamento começam a ser capturadas, fazendo com que estruturas turbilhonares tendam a aparecer no escoamento, tanto no interior, quanto no exterior. Porém, devido a ausência da terceira dimensão, essas escalas deixam o escoamento instável, fazendo por divergir os cálculos a altos números de Reynolds. Espera-se que, com a implementação da terceira dimensão, esse problema seja resolvido.

A fronteira imersa utilizando o modelo físico virtual, mais uma vez, permitiu representar muito bem a geometria proposta. No presente trabalho, entretanto, não se utilizou a clássica função distribuição. Ao invés disso, foi proposta uma nova abordagem sobre a imposição do termo fonte da fronteira imersa, a qual consiste em filtrar o campo de força. Esta nova abordagem mostrou-se mais precisa que a função distribuição e, principalmente, mais viável em termos de custo computacional. Apesar disso, ela só permite resolver problemas onde haja a coincidência dos pontos de colocação eulerianos com os lagrangianos, limitando o uso dessa metodologia à problemas com geometrias cartesianas, por exemplo, camada limite, jatos e camadas de mistura em desenvolvimento espacial. Para geometrias complexas e móveis será necessário utilizar o processo de distribuição do campo lagrangiano de força.

5.1 Perspectivas futuras

Devido à natureza inovadora da metodologia proposta no presente trabalho, faz-se necessário dar continuidade aos desenvolvimentos. O próximo passo a ser abordado é tentar melhorar a ordem de precisão dos cálculos para recuperar a precisão espectral. Para isso serão estudados outros tipos de filtros e outras formas da função distribuição.

Já é possível realizar estudos sobre outros problema de mecânica de fluidos, tais como escoamentos em canais, escoamentos cisalhantes livres (jatos e camadas de mistura espacial), camada limite em placas planas, entre outros. Porém precisa-se ainda desenvolver uma metodologia que resolva problemas com configurações geométricas não cartesianas e com mobilidade.

O código deve ser estendido para a terceira dimensão permitindo resolver problemas de engenharia mais próximos da realidade. Após isso, provavelmente, o código também deve ser paralelizado.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS

ARRUDA, J. **Modelagem matemática de escoamentos internos forçados utilizando o Método da Fronteira Imersa e o Modelo Físico Virtual**. 2004. 153 f. Tese (Doutorado em Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.

BRIGGS, W. L.; HENSON, V. E. **The DFT**. Philadelphia: SIAM, 1995. 434 p.

BURGERS, J.M. A mathematical model illustrating the theory of turbulence. **Advances Applied Mechanics**, San Diego. v. 1, p. 171-199, 1948.

BURGRAF, O. R. Analitical and numerical studies of the structure of steady separated flow. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge. v. 24, n. 1, p. 113-151, 1966.

CAMPREGHER, R. **Modelagem matemática tridimensional para problemas de interação fluido-estrutura**. 2005. 179 f. Tese (Doutorado em Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2005.

CANUTO, C.; HUSSAINI, M.Y.; QUARTERONI, A.; ZANG, T.A. **Spectral methods in fluid dynamics**. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 1988. 567 p. (Springer Series in Computational Physics).

CAREY, G.F.; ODEN, J.T. **Finite elements: fluid mechanics**. New York: Prentice-Hall, 1986. v. 6.

COOLEY, T. W.; TUKEY, J. W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. **Mathematics Computation**. Providence. v.19 p. 297-301, 1965.

DELVES, L. M.; HALL, C.A. An implicit matching procedure for global element calculations. **Journal of Institute of Mathematics Applications**. London. v. 23, p. 223-234, 1979.

DEVILLE, M.; MUND, E. Chebyshev pseudospectral solution of second-order elliptic equations with finite element preconditioning. **Journal of Computational Physics**, New York. v. 60, p. 517-533, 1985.

DON, W. S.; GOTTLIEB, D.; SHU, C. W. Numerical convergence study of nearly-incompressible, inviscid Taylor-Green Vortex flow. Providence, 2002.

ENRIQUEZ-REMIGIO, S. A. E. **Introdução de fontes e sumidouros em escoamentos incompressíveis bidimensionais por intermédio do Método da Fronteira Imersa**. 2000. Dissertação (Mestrado em Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ENRIQUEZ-REMIGIO, S. A. E.; SILVEIRA-NETO, A. **A new modeling of fluid-structure interaction problems through Immersed Boundary Method/Virtual Physical Model (IBM/VPM)**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHEIRA MECÂNICA, 19º, 2007, Brasília. No prelo.

FORNBERG, B. **A practical guide to pseudospectral methods**. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 1998.

FORTUNA, A. O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos**. São Paulo: EDUSP. 2000.

GHIA, U.; GHIA, K. N.; SHIN, C. T. High re solutions for incompressible flow using the navier stokes equations and a multigrid method. **Journal of Computational Physics**. New York. v. 48, p. 387-411, 1982.

GOLDSTEIN, D.; ADACHI, T.; SAKATA, H. Modeling a no-slip flow with an external force field. **Journal Computational Physics**, New York. v. 105, p. 354, 1993.

GOTTLIEB, D.; ORSZAG, S.A. **Numerical analysis of spectral methods: theory and applications**. 4th. ed. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1977. (CBMS - REGIONAL CONFERENCE SERIES IN MATHEMATICS)

GOTTLIEB, D.; HUSSAINI, M.Y.; ORSZAG, S.A.; VOIGT, R. Theory and applications of spectral methods. In: R.G. VOIGT, R.G.; GOTTLIEB, D.; HUSSAINI, M.Y. **Spectral methods for partial differential equations**. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1984, p. 1-54.

GOTTLIEB, D.; TURKEL, E. Topics in spectral methods. In: **Numerical methods in fluid dynamics**. New York: Springer-Verlag, p. 115-155, 1983. (Lecture Notes in Mathematics, v. 1127)

HOU, S. Simulation of cavity flow by Lattice Boltzmann Method. **Journal of Computational Physics**, New York. v. 118, p. 329-347, 1995.

HUANG, X.; Zhang, X. **A Fourier Pseudospectral Method for some computational aeroacoustic problems**. Southampton. 2004.

HUSSAINI, M.Y.; ZANG, T.A. Spectral methods in fluid dynamics. **Annual Review of Fluids Mechanics**, Palo Alto. v. 19. p. 339-367, 1987.

HUSSAINI, M.Y.; KOPRIVA, D. A.; PATERA, A.T. Spectral collocation methods. **Applied Numerical Mathematics**, Amsterdam. v. 5, p.177-208, 1989.

KARNIADAKIS, G. E. Spectral element - Fourier methods for incompressible turbulent flows. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, Amsterdam. v. 80, p. 367-380, 1990.

KARNIADAKIS, G. E.; ORSZAG, S. A. Nodes, modes and flow codes. **Physics Today**, New York. v. 46, p. 34-42, 1993.

KIRBY R. M.; KARNIADAKIS, G. E. Under-resolution and diagnostic in spectral simulations of complex geometry flows. 2003. Disponível em: <<http://www.dam.brown.edu/scicomp/reports/2001/BrownSC-2001-23.pdf>>. Acesso em: 7 fev.2007

KOPRIVA, D.A. A spectral multidomain method for the solution of hyperbolic systems. **Applied Numerical Mathematics**, Amsterdan. v. 2, p. 221-241, 1986.

LIMA e SILVA, A. L. F. **Desenvolvimento e Implementação de uma Nova Metodologia para Modelagem de Escoamentos sobre Geometrias Complexas: Método da Fronteira Imersa como Modelo Físico Virtual**. 2002. 162 f. Tese (Doutorado em Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2002.

LIMA e SILVA, A.; SILVEIRA-NETO, A.; DAMASCENO, J. Numerical simulation of two dimensional flows over a circular cylinder using the immersed boundary method. **Journal of Computational Physics**, New York. v. 189, p. 351–370, 2003.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos, 1995.

MARIANO, F. P.; MOREIRA, L. Q.; SILVEIRA-NETO, A. **Resolução de escoamentos não periódicos utilizando métodos pseudo-espectrais e o método da fronteira imersa** In: SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, 16º, 2006, Uberlândia: UFU. 2006.

MARTINEZ, J.J. **Aplicação do Método Pseudoespectral de Chebyshev em alguns problemas hidrodinâmicos**. 1999. Dissertação. (Mestrado Engenharia Oceânica) - COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 1999.

MARTINEZ, J.J. **Aplicação de um método multidomínio espectral na simulação de escoamentos viscosos incompressíveis**. 2005. 158 f. Tese. (Doutorado em Engenharia Oceânica) - COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2005.

MORCHOISNE, Y. Inhomogeneous flow calculations by spectral methods: mono-domain and multi-domain techniques. In: VOIGT, R.G.; GOTTLIEB, D.; HUSSAINI, M.Y. **Spectral Methods for Partial Differential Equations**. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1984, p. 181-208.

MOHD-YUSOF, J. **Combined immersed boundaries/B-splines methods for simulations of flows in complex geometries**. NASA: Ames/Stanford University, 1997. (CTR Annual Research Briefs).

NAVARRA, A., Reduction of the Gibbs oscillation in spectral model simulation. **Journal of Climate**. Boston. v.7 p. 1169-1183, 1994.

OLIVEIRA, G. P. **Desenvolvimento de interface gráfica para o solver de dinâmica dos fluidos computacional Fluids-3D**. 2007. 137 f. Dissertação (Mestrado em Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2007 No prelo.

OLIVEIRA, J. E. S. **Método de fronteira imersa aplicado à modelagem matemática e simulação numérica de escoamentos turbulentos sobre geometrias móveis e deformáveis**. 2006. 188 f. Tese. (Doutorado em Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2006.

ORSZAG, S.A. Spectral Methods for Problems in Complex Geometries. **Journal of Computational Physics**, New York. v. 37, p. 70-92, 1970.

PADILLA, E. L. M.; SILVA, T. A.; SILVEIRA-NETO, A. **Efeitos do Ângulo da Tampa Deslizante sobre o Vórtice Primário a $Re = 1.000$** . In: SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, 16º, 2006, Uberlândia: UFU. 2006.

PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. New York: Hemisphere, 1980.

PATERA, A.T. A spectral element method for fluid dynamics: laminar flow in a channel expansion. **Journal of Computational Physics**, New York. v. 54, p. 468-488, 1984.

PESKIN, C. S. Flow patterns around heart valves: a numerical method. **Journal of Computational Physics**, New York. v.10, p. 252-271, 1972.

PESKIN, C. S. Numerical analysis of blood flow in the heart. ***Journal of Computational Physics***, New York. v. 25, p. 220, 1977.

PINHO, F. A. A. **Simulação numérica de grandes escalas em cavidades tridimensionais com tampa deslizante utilizando modelagem dinâmica**. 2006. 122 f. Tese. (Doutorado em Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2006.

PILLER, M.; STALIO, E. Finite-volume compact schemes on staggered grids. ***Journal of Computational Physics***, New York. v. 197, p. 299-340, 2004.

POULTER, G.; MAM340W/AN: project 2 - solution collisions. Disponível em: <<http://graham.poulter.googlepages.com/gpoulter-2004-nls-collisions.pdf>>. Acesso em: 2 fev.2007.

PRESS, W.H.; TEUKOLSKY, S.A.; VETTERLING, W.T.; FLANNERY, B.P. **Numerical recipes in Fortran 77: the art of scientific computing**. New York: Cambridge University Press, 1992.

SAKAKIBARA, J. Scanning stereoscopic PIV. 2004. Disponível em <<http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~sakakiba/sspiv/sspiv-e.html>> Acesso em: 2 fev.2007.

SHUKLA; Very high-order compact finite difference schemes on non-uniform grids for incompressible Navier-Stokes equations. ***Journal of Computational Physics***, New York.

SILVEIRA-NETO, A. **Turbulência nos fluidos aplicada**. Uberlândia: UFU, 2002. Apostila da Disciplina Mecânica dos Fluidos do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Uberlândia.

SOUZA, A. M. Análise numérica da transição à turbulência em escoamentos de jatos circulares livres. 2005. 180 f. Tese. (Doutorado em Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2005.

SWARZTRAUBER, P.N. **Vectorizing the FFTs, in parallel computations**, New York: Academic Press, 1982. pp. 51-83. Disponível em<<http://www.netlib.org/fftpack/>>. Acesso em: 7 fev.2007.

TAYLOR, G. I.; GREEN, A. E. Mechanism of the production of small eddies from large ones. **Proceedings Royal Society London**, London. v. 158, p. 499–521, 1937.

TREFETHEN, L.N. **Spectral methods in matlab**. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2000.

UNVERDI, S.; TRYGGVASON, G. A front-tracking method for viscous, incompressible, multifluid flows. **Journal of Computational Physics**, New York. v. 100, p. 25-37, 1992.

UZUN, A. **3-D Large-eddy simulation for jet aeroacoustics**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Purdue University. Purdue. 2003. 233 f.

VEDOVOTO, J.M. **Modelagem matemática de simulação numérica de escoamentos incompressíveis sobre geometrias complexas tridimensionais utilizando o método da fronteira imersa**. 2007. 125 f. Dissertação (Mestrado em Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2007. No prelo.

ZANG, T. A. Numerical simulation of non-linear interactions in channel and boundary-layer transition. In: MIKSAD, R.W.; AKYLAS, T. R.; HERBERT, T., **Nonlinear wave interactions in fluids**, New York: ASME, 1987, p. 131-145.

ZIENKIEWICZ, O.C.; TAYLOR, R.L. **The finite element method solid and fluid mechanics, dynamics and non-linearity**. 4th ed. London: McGraw-Hill Book, 1991. v. 2.