

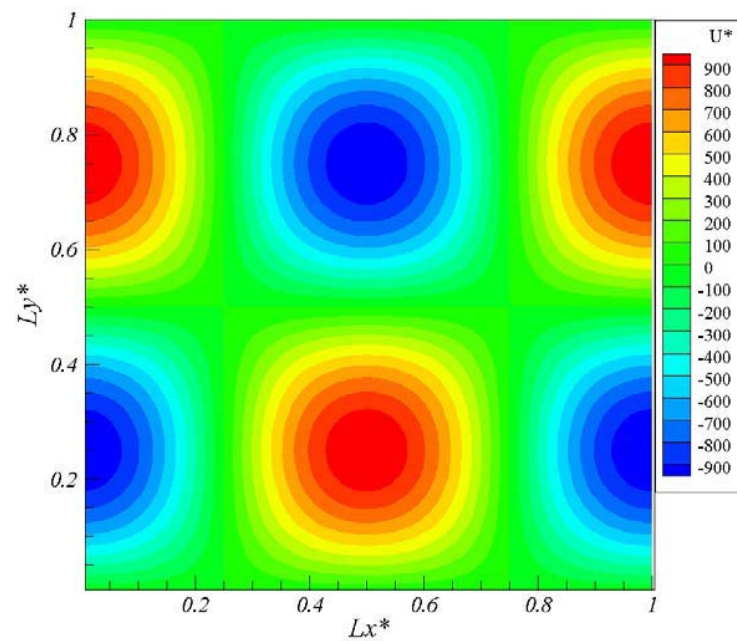


Figura 4.6: Componente horizontal de velocidade (128x128 nós de colocação).

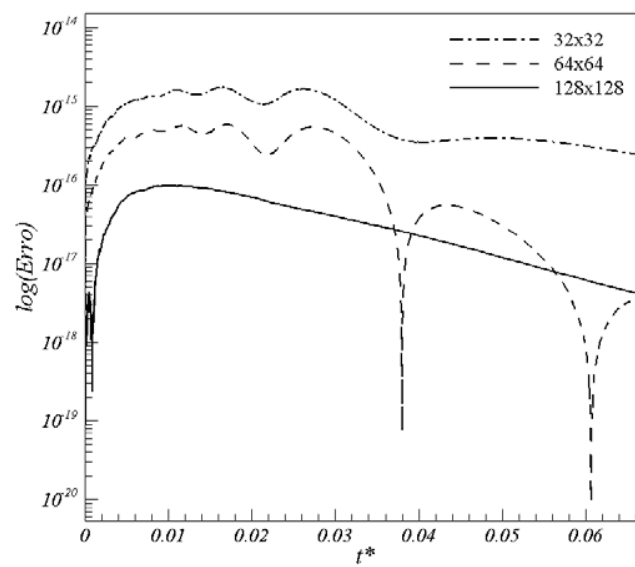


Figura 4.7: Comparação do erro para a componente horizontal de velocidade para diferentes níveis de refinamento.

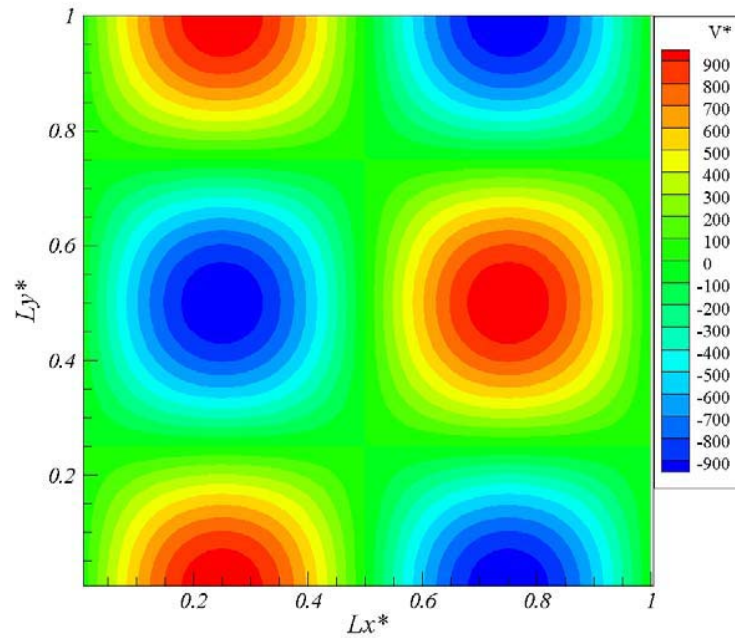


Figura 4.8: Componente vertical de velocidade (128x128nós de colocação).

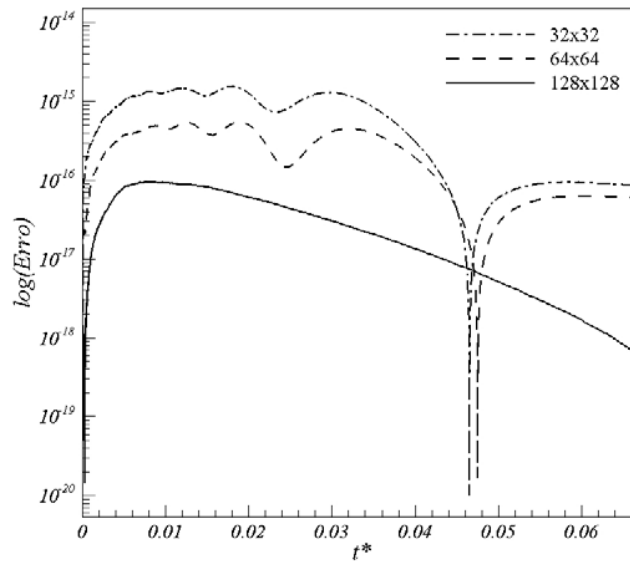


Figura 4.9: Comparação do erro para a componente vertical de velocidade para diferentes níveis de refinamento.

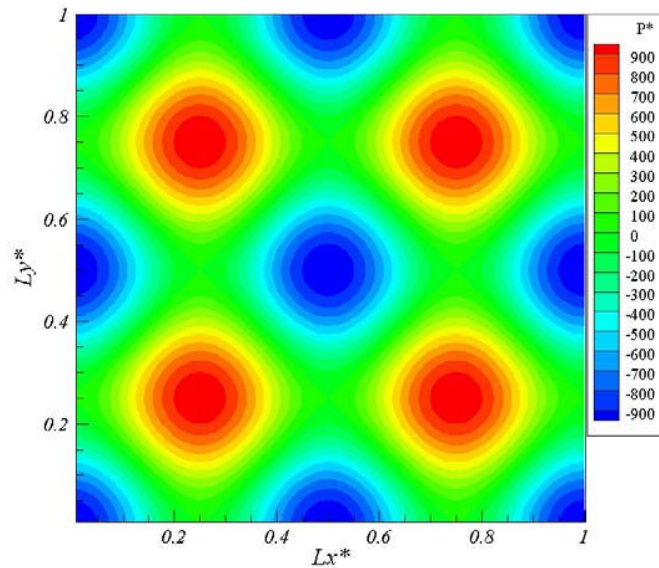


Figura 4.10: Campo de pressão (128x128 nós de colocação).

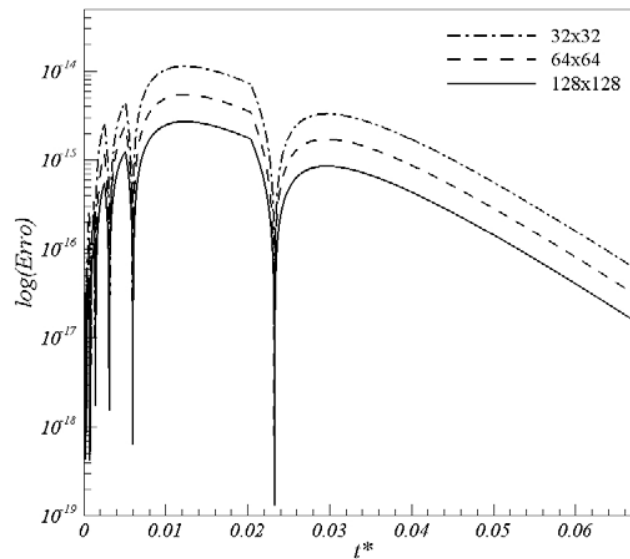


Figura 4.11: Comparação do erro para o campo de pressão para diferentes níveis de refinamento.

Como pode ser notado, os resultados, tanto dos campos de velocidade quanto do campo de pressão, apresentam erros da ordem de 10^{-16} , mostrando o nível de precisão que o método pseudo-espectral de Fourier pode atingir para a solução de equações diferenciais com condições de contorno periódicas.

Uma quarta simulação realizada foi a resolução do mesmo problema, agora com um domínio retangular com $Lx=4\pi$ e $Ly=2\pi$, utilizando 128 x 64 nós de colocação. O

objetivo deste teste foi observar qual o comportamento da FFT utilizada para domínios não quadrados, os resultados estão apresentados nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14.

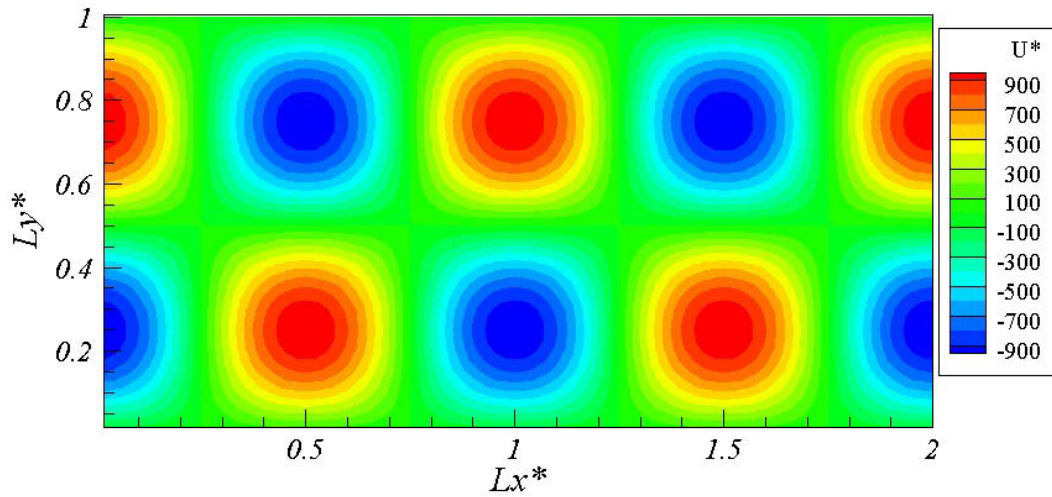


Figura 4.12: Componente horizontal de velocidade (128x64 nós de colocação).

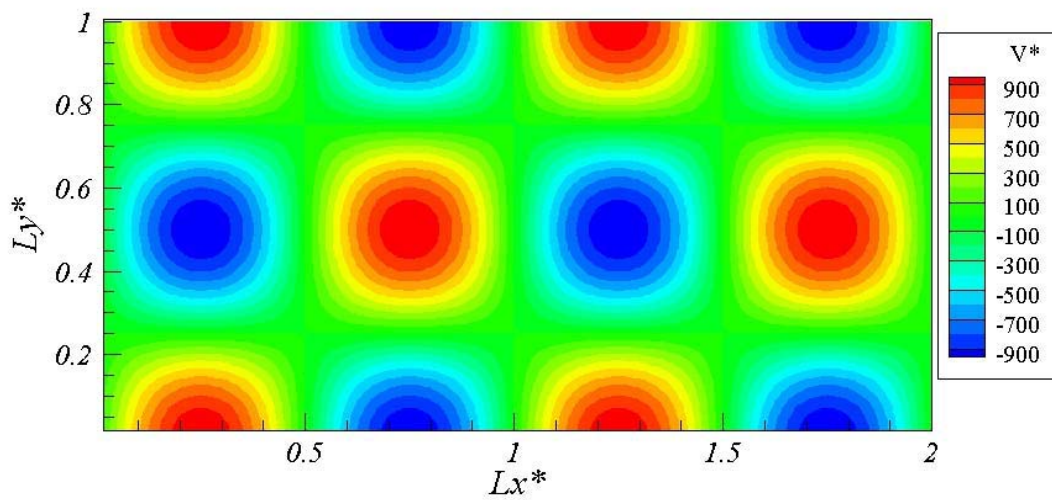


Figura 4.13: Componente vertical de velocidade (128x64 nós de colocação).

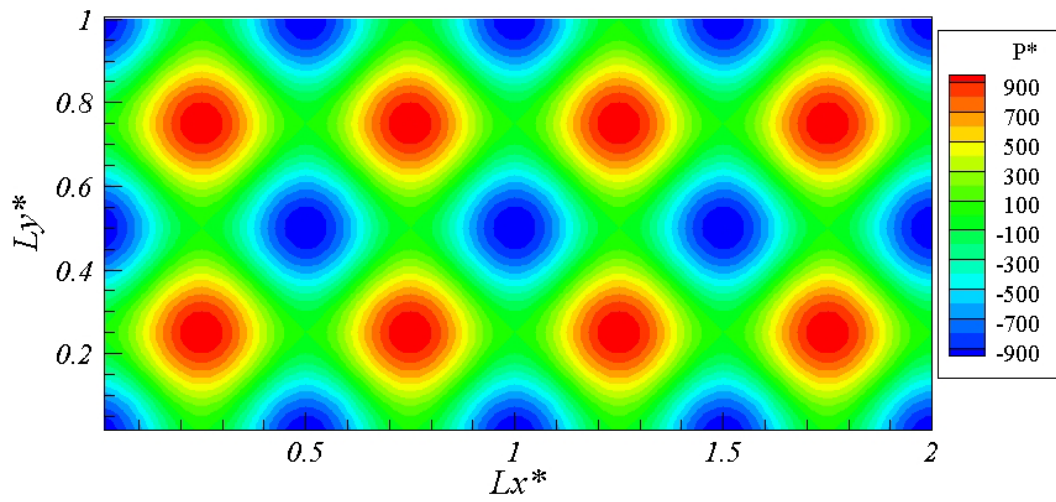


Figura 4.14: Campo de pressão (128x64 nós de colocação).

Os erros calculados para o caso do domínio retangular também apresentam-se da ordem de 10^{-16} , como mostrado na Figura 4.15.

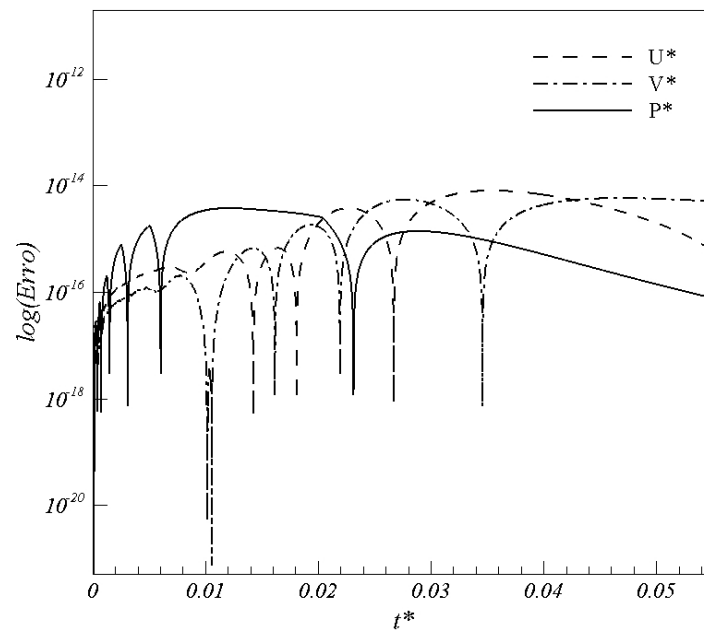


Figura 4.15: Erros obtidos para as componentes de velocidade e para a pressão para o caso dos vórtices de Taylor-Green com domínio retangular.

4.3 Caverna com tampa deslizante

O terceiro caso modelado e simulado é uma caverna retangular com tampa deslizante. Esse é um problema clássico da Dinâmica de Fluidos Computacional para a validação de metodologias e de códigos computacionais, pois ele apresenta uma configuração geométrica simples e com condições de contorno bem definidas. Além disso, apresenta a formação de um vórtice principal estacionário o qual induz a formação de vórtices secundários e terciários. A caverna pode ser entendida como uma geometria de seção retangular, em que em uma de suas faces é imposta uma velocidade constante (ARRUDA, 2004). Este caso teste foi escolhido, devido à sua geometria simples (vide Figura 4.16) e por ser um problema não-periódico.

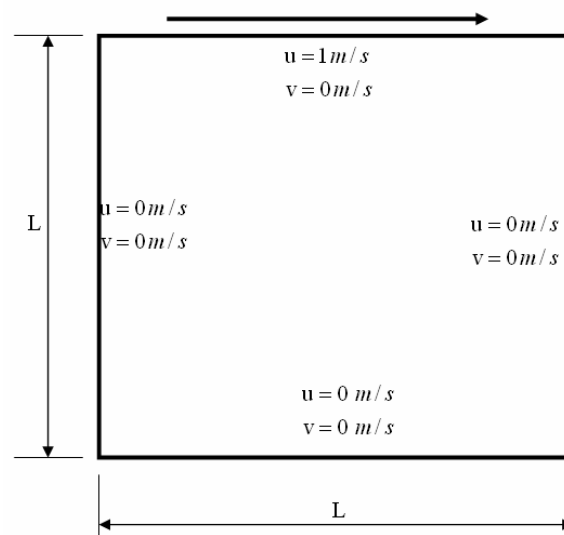


Figura 4.16: Esboço de uma caverna com tampa deslizante

Apesar da simplicidade geométrica deste problema, ele representa um problema de interesse prático, por exemplo, a caverna de um trem de pouso de uma aeronave, a qual é uma importante fonte de ruído. Para conseguir compreender esse fenômeno, deve-se primeiramente entender o que acontece dentro da caverna e, no caso de problemas de fluido-acústica, é imprescindível o uso de métodos de alta ordem para capturar os campos de pressão sonora (PINHO, 2006).

Foram simulados escoamentos a diferentes números de Reynolds com diferentes números de pontos de colocação. Para todas as simulações, utilizaram-se, para o avanço no tempo, o esquema de Adams-Bashforth de terceira ordem inicializado com um esquema

de Runge-Kutta de quarta ordem. O domínio de cálculo é dividido em duas partes, um domínio externo, necessário para que a condição de periodicidade seja imposta e um segundo domínio (domínio interno), o qual representa a cavidade em si, como pode ser visualizado na Figura 4.17. As condições de contorno do domínio interno são impostas, de forma virtual, através do campo de força da metodologia da fronteira imersa.

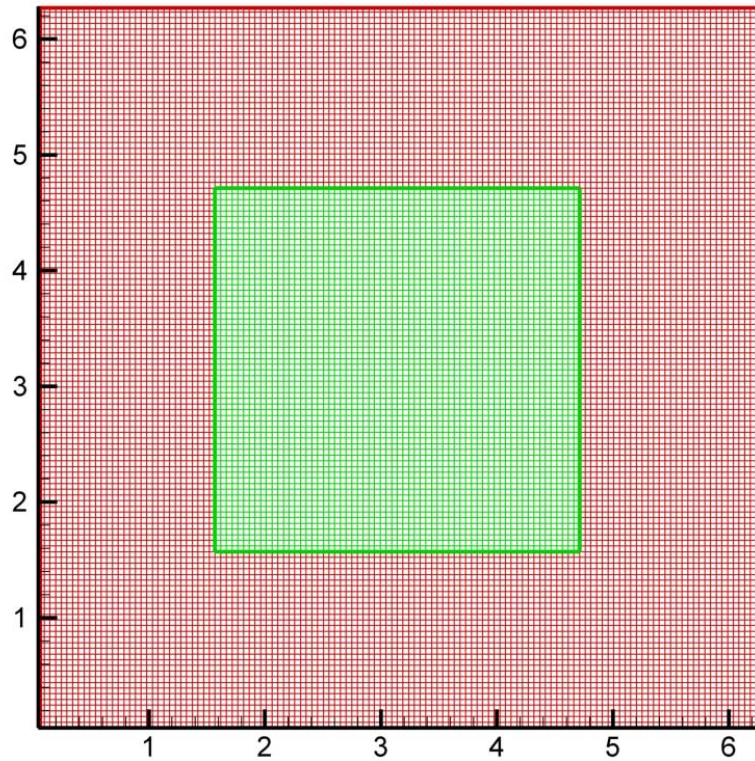


Figura 4.17: Domínio externo e interno para a simulação da cavidade com tampa deslizante

Os parâmetros desse problema foram definidos conforme ilustra a Figura 4.18, onde L é o comprimento do domínio externo e l é o comprimento da cavidade e foi utilizado como comprimento de referência para a adimensionalização do problema, ou seja, $Lx^* = Lx/l_x$, $Ly^* = Ly/l_y$. A velocidade horizontal imposta na tampa da cavidade (U_T) é o parâmetro de adimensionalização das velocidades. Dessa forma obtém-se, $U^* = u/U_T$, $V^* = v/U_T$, e $t^* = U_T t/l_x$.

Para todas as simulações foi usado $U_T = 1.0 \text{ m/s}$ e o número de Reynolds foi definido como $Re = U_T l_x / \nu$. A relação entre o domínio externo e o interno também será estudada, a fim de estabelecer uma relação ótima para esse parâmetro.

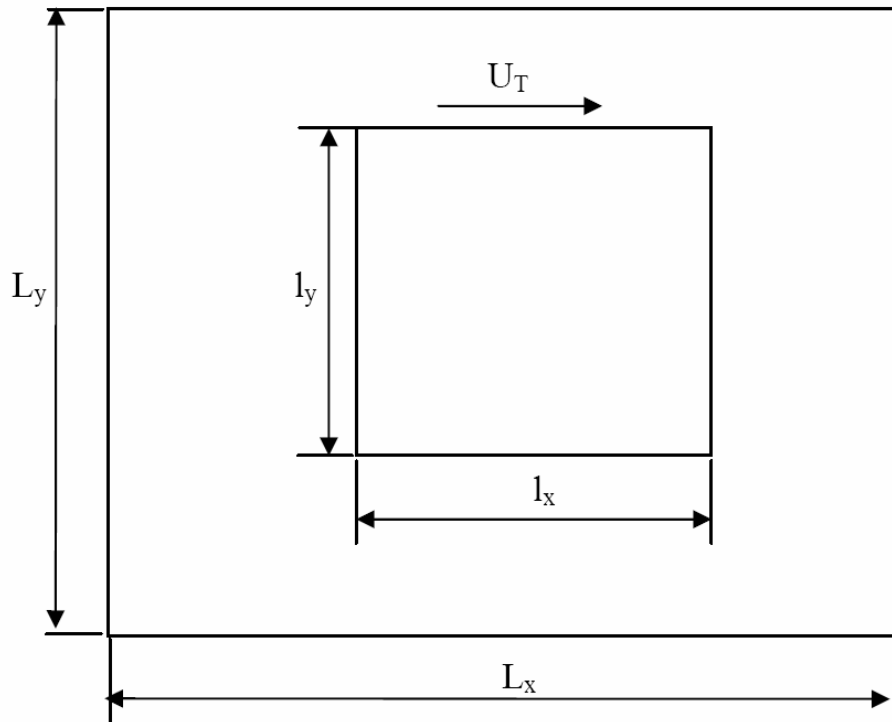


Figura 4.18: Esboço do domínio de cálculo utilizado nas simulações da cavidade com tampa deslizante.

4.3.1 Uso da função distribuição e diferentes tipos de filtragem

Conforme apresentado na formulação, o método da fronteira imersa exige um processo de distribuição da força de interação fluido-sólido, quando praticado no espaço físico. Com o presente trabalho, este método está sendo praticado no espaço de Fourier com e sem o processo de distribuição. Cabe lembrar que o processo de distribuição leva a um campo de força contínuo, enquanto que a não distribuição leva a se trabalhar com um campo de força descontínuo.

Como foi ilustrado, no caso da solução da equação de Burgers, o método pseudo-espectral, não suporta a existência de descontinuidade nas variáveis envolvidas na modelagem e na simulação. A consequência imediata é o aparecimento do fenômeno de

Gibbs, na forma de oscilações numéricas. O remédio para isto é a aplicação de um processo de filtragem.

Com isto tornou-se possível a simulação do escoamento no interior da cavidade com tampa deslizante com e sem o processo de distribuição do campo de força lagrangiano. Observa-se que isto só foi possível para a situação particular em que os pontos de colocação eulerianos e lagrangianos são coincidentes.

Para esta análise foram feitas quatro simulações com $Re=100$, uma com a função distribuição, e outras três, sem função distribuição e com diferentes tipos de filtro. Os filtros utilizados foram propostos por Kopriva (1986): filtro de Lanczos, Raised Cosine (RC) e filtro Sharpened Raised Cosine (SRC). O domínio interno tem comprimentos $l_x = l_y = \pi$ e foram utilizados 128x128 pontos de colocação. No domínio externo, $L_x = L_y = 2\pi$, utilizando 256x256 nós de colocação. Para o avanço temporal foi utilizado um $\Delta t = 10^{-4} s$.

As componentes horizontal e vertical de velocidades, às quais se sobrepõem as linhas de corrente, são mostradas nas Figuras 4.17 e 4.18. Observa-se que nas Figura 4.19 (a) e Figura 4.20 (a) foi utilizado o processo de distribuição. Por outro lado, nas Figura 4.19 (b), (c) e (d) e Figura 4.20 (b), (c) e (d) a força lagrangiana não foi distribuída mas foram utilizados três tipos de filtros.

Em todas as figuras, as linhas de corrente mostram que a cavidade foi bem estabelecida e que o escoamento no seu interior foi recuperado, de acordo com Ghia et al. (1982) e Arruda (2004). Também foi estabelecida a recirculação principal, induzida pelo movimento da tampa da cavidade, o qual ocorre da esquerda para a direita.

Observa-se ainda, que foi capturada a recirculação secundária no canto inferior à direita da cavidade. O escoamento externo à cavidade é também gerado pelo movimento da tampa e é periódico, obedecendo às condições de contorno utilizadas.

A análise dos resultados das Figuras 4.17 e 4.18 é qualitativa e não permite perceber grandes diferenças entre os quatro casos simulados. Para se buscar mais detalhes e também para comparar resultados entre si e com outro autor Ghia et al. (1982), traçou-se os perfis das componentes horizontal (Figura 4.21) e vertical (Figura 4.22) das velocidades.

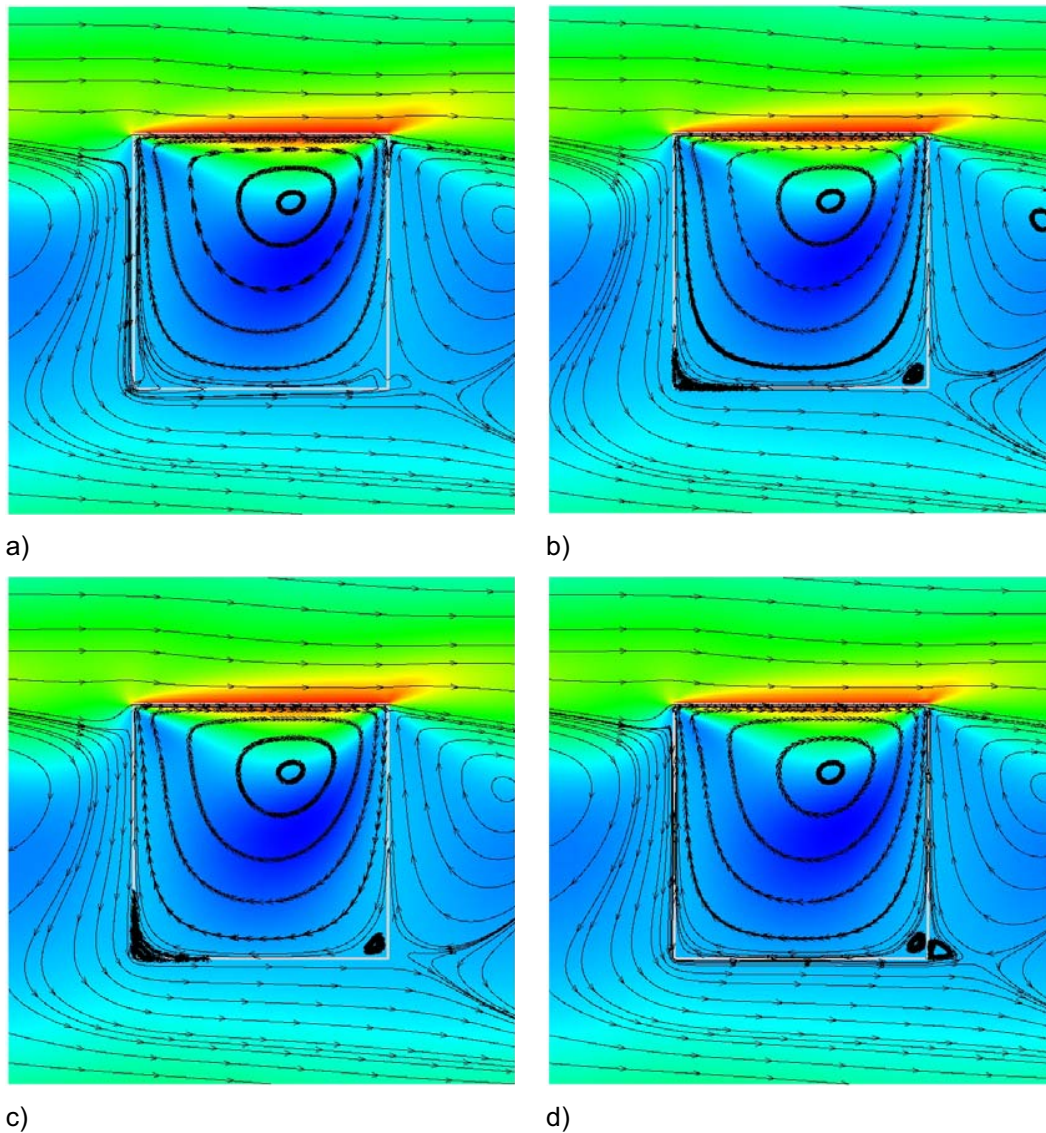


Figura 4.19: Componente horizontal de velocidade – a) com Função Distribuição; b) sem função distribuição e com Filtro de Lanczos; c) sem função distribuição e com Raised Cosine; d) sem função distribuição e com Sharpened Raised Cosine.

Todos os quatro casos apresentam um excelente acordo com a referência adotada (GHIA et al., 1982). No entanto, os resultados obtidos sem o processo de distribuição atingem valores mais próximos da referência que o caso para o qual o processo de distribuição foi utilizado. Observa-se também que a influência do tipo de filtragem é pequena. O filtro sharpened raised cosine consegue obter os valores de máximo e mínimo mais próximos da referência.

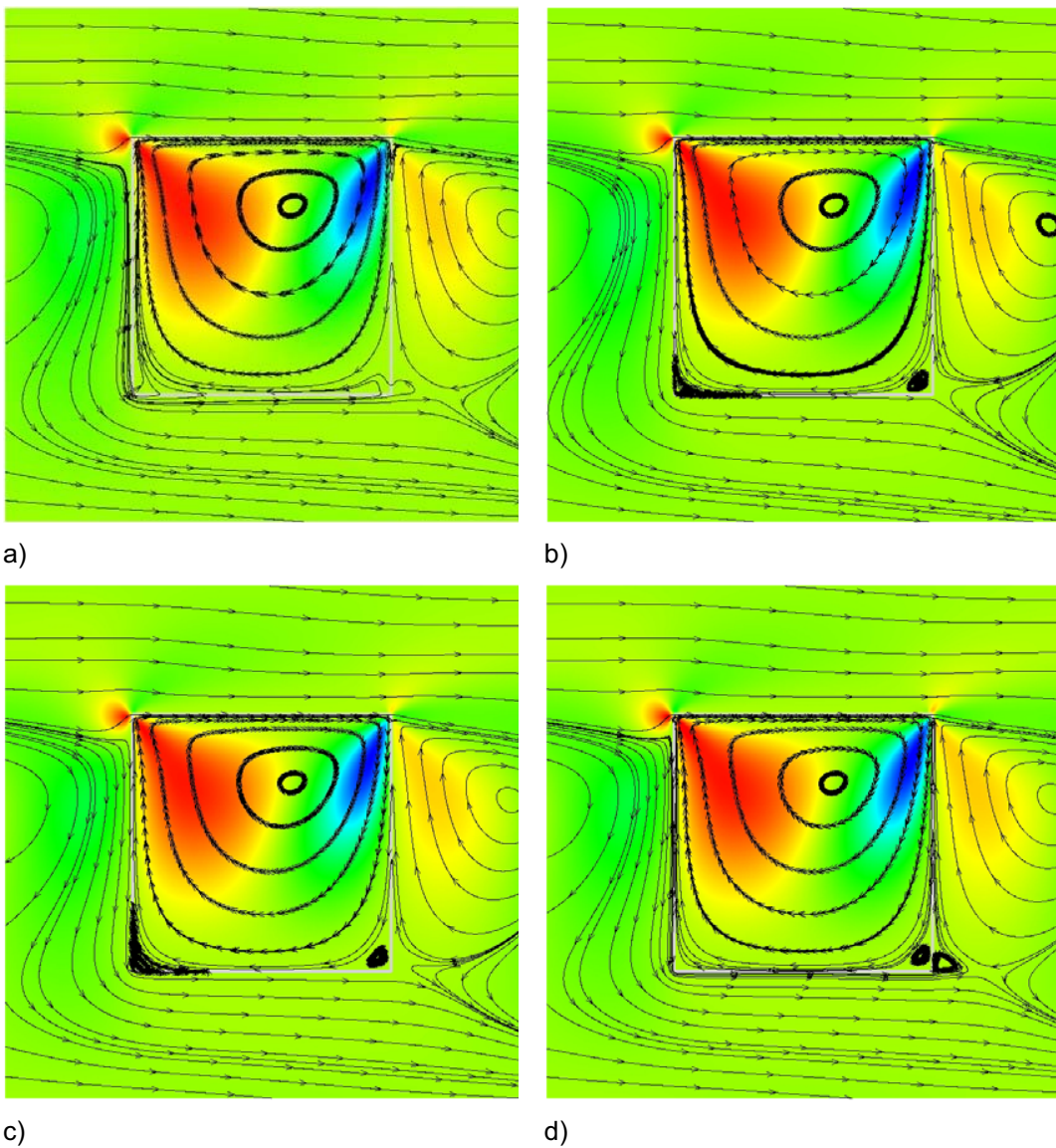


Figura 4.20: Componente vertical de velocidade – a) com Função Distribuição; b) sem função distribuição e com Filtro de Lanczos; c) sem função distribuição e com Raised Cosine; d) sem função distribuição e com Sharpened Raised Cosine.

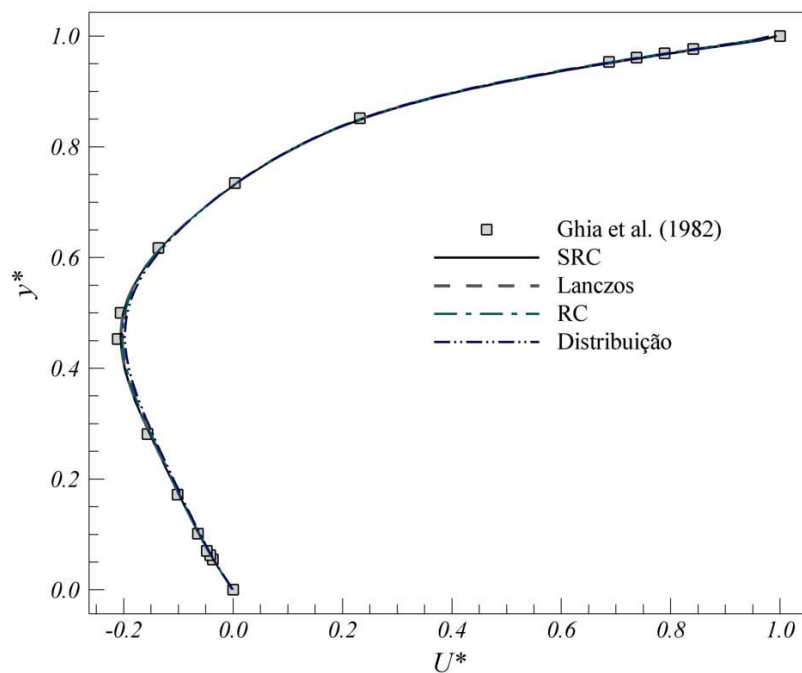


Figura 4.21: Perfil de velocidade horizontal definido por uma linha vertical no centro da cavidade, comparando os diferentes tipos de filtragem.

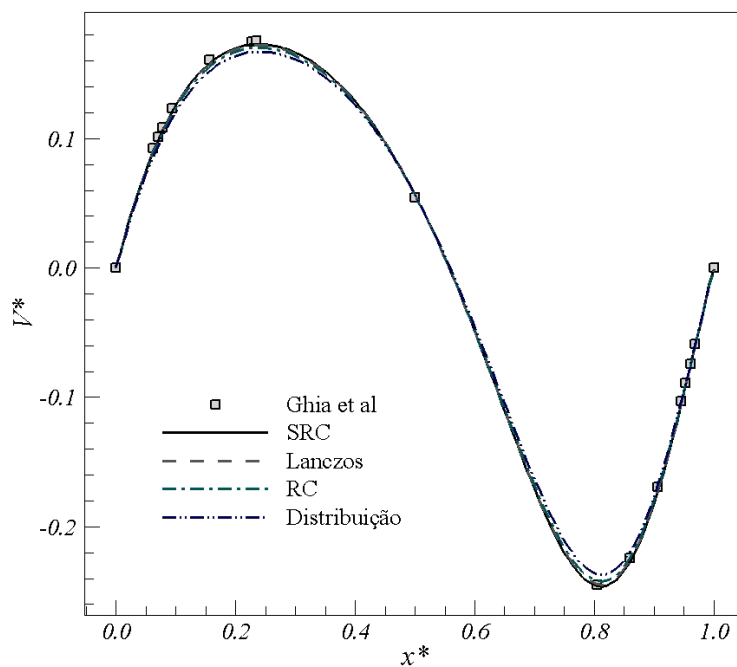


Figura 4.22: Perfil de velocidade vertical definido em uma linha horizontal no centro da cavidade, comparando os diferentes tipos de filtragem.

É importante ressaltar que nas paredes da cavidade, rigorosamente, não era para existir massa cruzando as fronteiras, porém como essas fronteiras são impostas via o campo de força existe um erro associado a esse cálculo, que é dado pela Norma L_2 , apresentada na Eq. (4.17):

$$L_2 = \sqrt{\frac{\sum (u_k - u_{fk})^2}{N}}, \quad (4.17)$$

onde N é o número de pontos da fronteira lagrangiana. Sabe-se que $u=1,0$ m/s na tampa deslizante e $u=0,0$ m/s nas demais paredes e $v=0,0$ m/s para todas as paredes da cavidade.

A norma L_2 fornece uma medida da diferença entre a velocidade do fluido na parede (u_k^F) e a velocidade da parede (u_k). A rigor, esta norma deveria ser nula, para que a condição de não deslizamento fosse satisfeita.

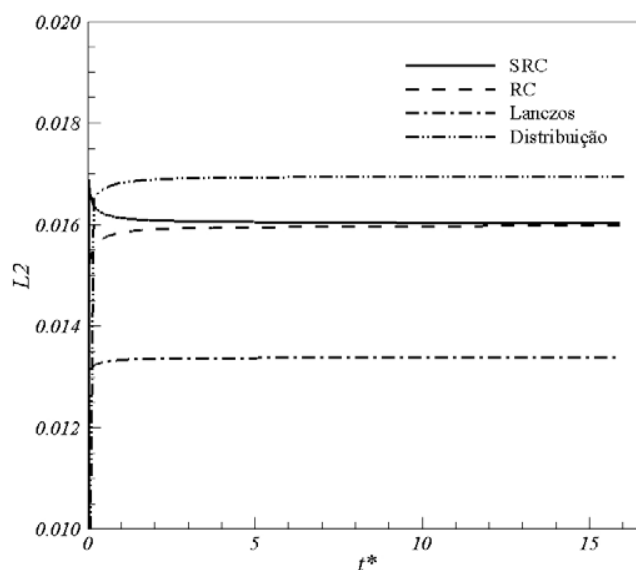


Figura 4.23: Comparação da Norma L_2 em função do tempo para os diferentes tipos de filtragem.

A norma L_2 relativa aos quatro casos é apresentada na Figura 4.23, em função do tempo. Observa-se que, para todos os casos ela tende a uma constante, mostrando um bom estabelecimento das condições de contorno virtuais. Os valores de L_2 são próximos entre si, tendo o filtro de Lanczos apresentado um valor de $L_2=1,3 \times 10^{-2}$. Este valor é menor que o valor de L_2 obtido por Arruda (2004), para uma configuração com 150×150 nós no domínio

euleriano e 400 nós no domínio lagrangiano, perfazendo uma cavidade com 100x100 nós, utilizando o método da fronteira imersa em um código de diferenças finitas de segunda ordem, no tempo e no espaço, este autor chegou a $L_2=7 \times 10^{-2}$.

4.3.2 Análise de Diferentes Níveis de Refinamento

A fim de testar a influência do número de nós de colocação foram simulados casos com 128x128, 256x256 e 512x512, em um domínio externo de $L_x = L_y = 2\pi$ e interno de $l_x = l_y = \pi$, ou seja, para o domínio interno a cavidade possui 64x64, 128x128 e 256x256 nós de colocação. As simulações foram feitas à $Re=100$ e utilizou o esquema de filtragem Sharpened Raised Cosine. Para o passo de tempo foi utilizado o mesmo que no caso anterior para as três simulações, ou seja, $\Delta t=10^{-4}$ s. Para esta seqüência de testes foi levantada a curva da norma L_2 em função do tempo para as três simulações (Figura 4.24).

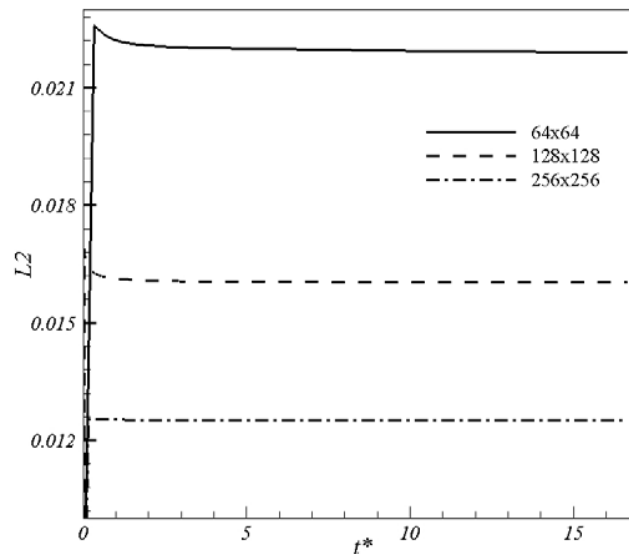
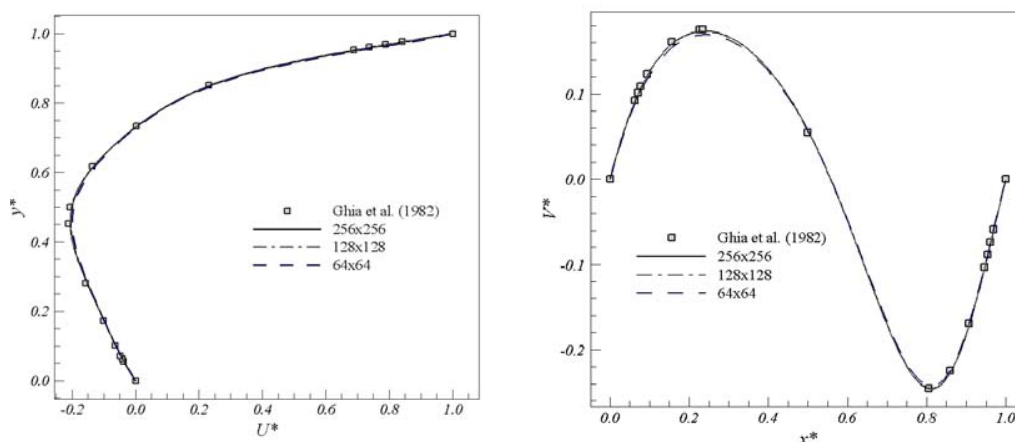


Figura 4.24: Comparação da Norma L_2 sobre a fronteira para diferentes níveis de refinamento.

Os resultados da comparação da norma L_2 estão de acordo com o que poderia ser esperado, pois mostram que a fronteira é melhor representada a medida que o refinamento aumenta.



a) b)
 Figura 4.25: Perfis de velocidade a) horizontal - obtido por uma linha vertical no centro da cavidade, b) vertical - obtido por uma linha horizontal no centro da cavidade.

A Figura 4.25 mostra os perfis das componentes de velocidade comparados com os de Ghia et al. (1982), onde é possível observar uma ligeira melhora do resultado, com o aumento do número de nós de colocação. Com a resolução de 256x256 o resultado mostra-se muito próximo ao da referência. Na Figura 4.26 é apresentada a componente de velocidade horizontal sobreposta pelas linha de corrente para o caso de 256x256 nós no domínio interno.

Os resultados estão de acordo com a referência adotada, pois mostram a recirculação principal bem formada no centro da cavidade e a recirculação secundária formada no canto inferior direito. O escoamento externo é induzido pelo movimento da tampa e, surgem bolhas de recirculação externas contra-rotativas em relação ao escoamento interno. Essas bolhas têm a função de representar a fronteira do domínio interno, proporcionando a condição de não-deslizamento.

A Figura 4.27 é um zoom da cavidade da Figura 4.26, onde mostra-se as componentes de velocidade (a) horizontal e (b) vertical, bem como, os campos de pressão (c) e de vorticidade (d), sendo possível fazer uma análise qualitativa do caso simulado.

O campo de pressão, Figura 4.27 (c), mostra que existe um centro de baixa pressão na região do interior do vórtice principal, o que está de acordo com a referência. Nos cantos superiores, devido a singularidade matemática, observa-se zonas de baixa (canto superior esquerdo) e alta pressão (canto superior direito), estas zonas também estão, qualitativamente, bem representadas quando comparadas com outros trabalhos sobre cavidade (GHIA et al., 1982; ARRUDA, 2004).

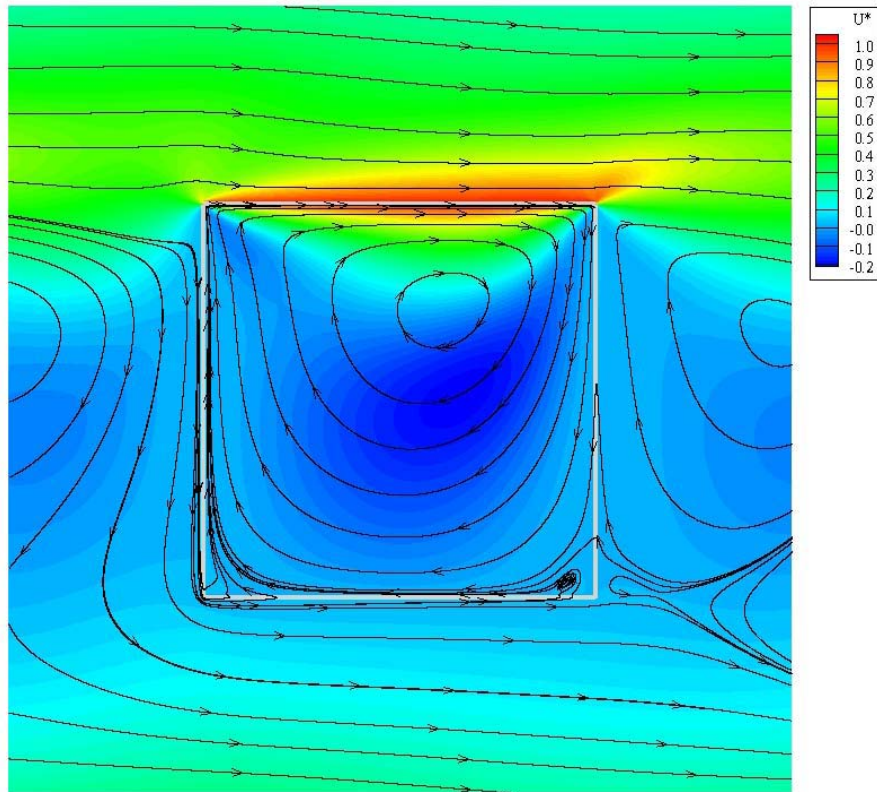


Figura 4.26: Cavity com tampa deslizante - $Re=100$ com 512 x 512 nós de colocação

O campo de vorticidade, Figura 4.27 (d) também está qualitativamente consistente, pois no centro do vórtice central é caracterizado por uma vorticidade elevada, enquanto que nas regiões próximas às paredes, apresentam camadas fortemente cisalhantes, devido aos efeitos viscosos.

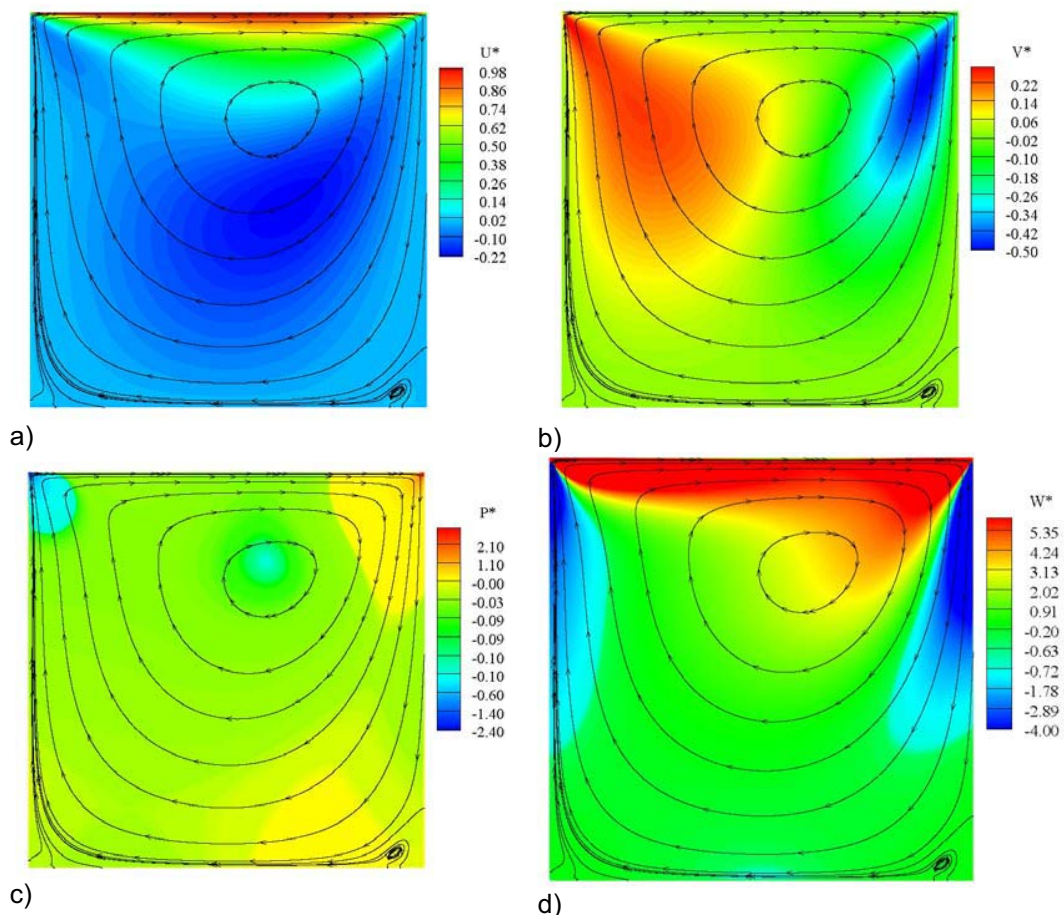


Figura 4.27: Cavity com tampa deslizante $Re=100$ com 256×256 nós de colocação a) componente horizontal de velocidade, b) componente vertical de velocidade, c) campo de pressão, d) campo de vorticidade.

Neste ponto, cabe comentar sobre o custo computacional da metodologia. Todas as simulações foram feitas em um computador Intel Pentium(R) IV com 3,2Ghz, 1.0 GByte de RAM, no sistema operacional Linux usando como compilador o Intel Fortran Compiler versão 9.1.0.036. Todas as simulações tiveram 500.000 iterações no tempo e, variando o número de nós de colocação, consegue-se fazer uma estimativa do tempo computacional gasto, como mostrado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Custo computacional em função do número de nós de colocação

Nós de colocação	Tempo de processamento para 1.000 iterações
128x128	1 min
256x256	14 min
512x512	95 min

É importante ser ressaltado que a maior parte do custo computacional do código desenvolvido está no cálculo das FFTs de precisão dupla. Outra grande parte do custo está relacionada com a subrotina de reinicialização do código, que, ao mesmo tempo que permite uma maior segurança, também consome muito tempo para salvar os valores necessários para a reinicialização do programa, pois é preciso guardar três campo de velocidade para se iniciar o cálculo do avanço temporal dado por Adams-Bashforth.

4.3.3 Variação do Domínio Interno

Outro fator estudado é a influência do tamanho do domínio interno em relação ao domínio externo. Foram feitas três simulações variando o tamanho do domínio interno mantendo o mesmo número de nós de colocação no domínio externo (256x256), a fim de manter o mesmo Δx e Δy para toda as simulações realizadas. Para simplificar a apresentação dos resultados, será definida a grandeza $H = L/l$, a qual representa a razão entre o domínio externo pelo interno. Neste conjunto de simulações foram feitos três teste variando-se H (4, 2 e 1,33) e mantendo o domínio externo fixo com $L_x = L_y = 2\pi$.

Nas Figuras 4.26 (a), (c) e (e) são mostrados os diferentes domínios internos utilizados e também é mostrada a componente horizontal de velocidade sobreposta pelas linhas de corrente. Na Figura 4.28 (b), (d) e (f) é mostrada a componente de velocidade vertical para as três simulações realizadas. Também foram comparados os perfis de velocidade horizontal e vertical para $Re=100$ com os dados de Ghia et al. (1982) estes estão ilustrados nas Figuras 4.27 e 4.28.

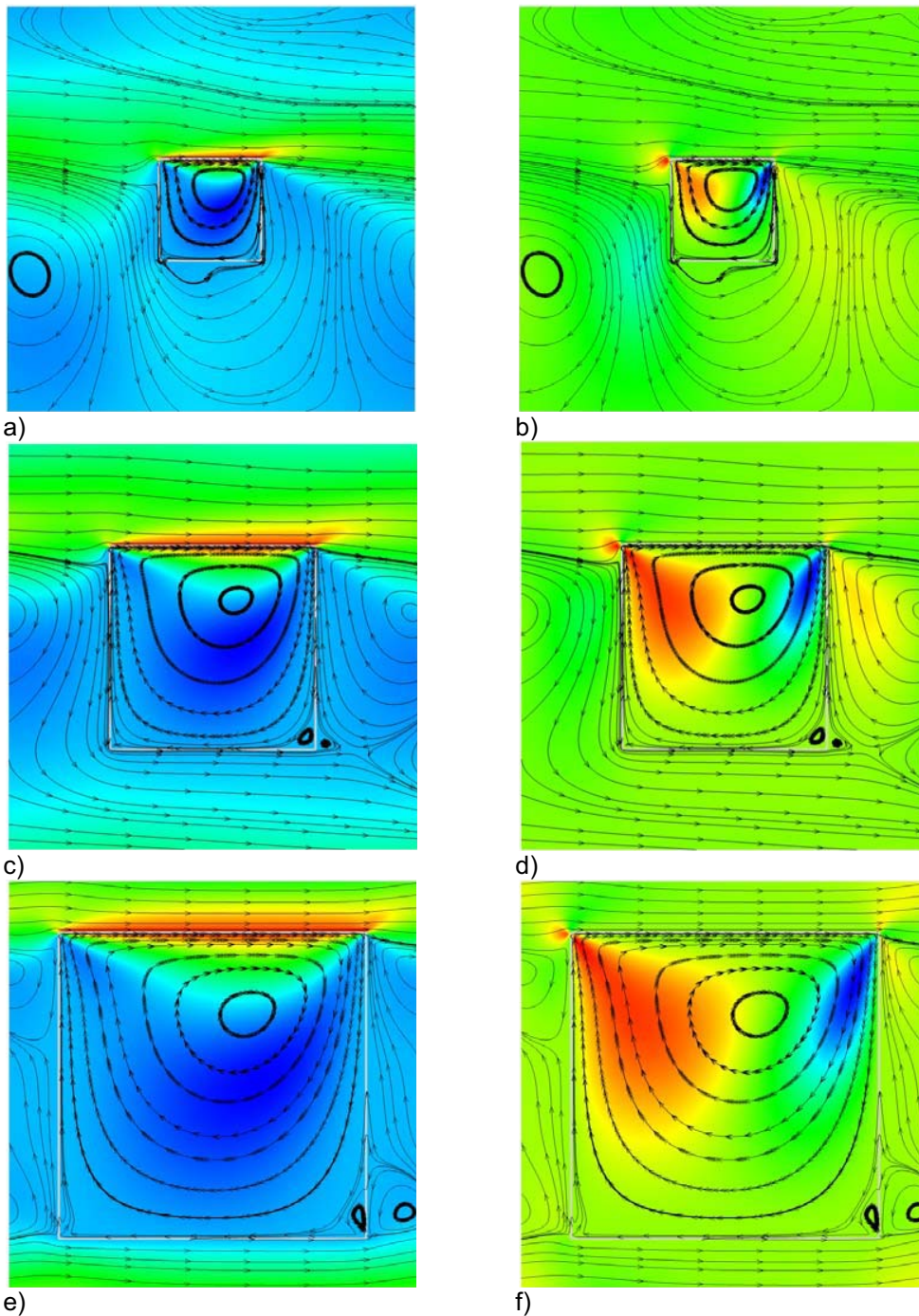


Figura 4.28: Componente horizontal (a, c e e) e vertical (b, d e f) para $H=4$, $H=2$ e $H=1,33$, respectivamente.

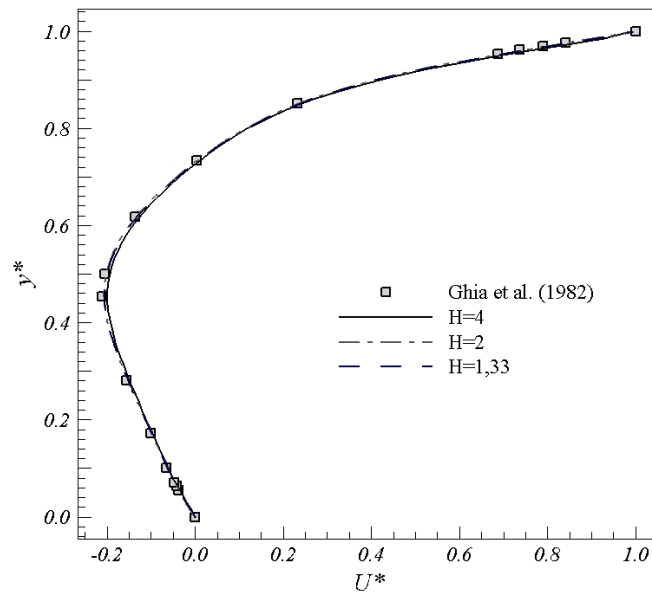


Figura 4.29: Perfil de velocidade horizontal, obtido por uma linha vertical no centro da cavidade, comparando a influência do domínio interno.

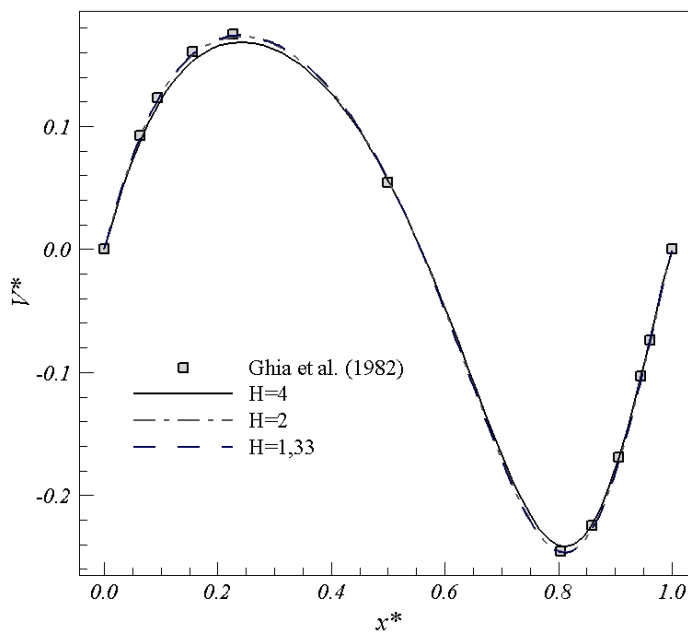


Figura 4.30: Perfil de velocidade vertical, obtido por uma linha horizontal no centro da cavidade, comparando a influência do domínio interno.

Observa-se que no caso de $H=4$, ou seja, o domínio interno menor em relação ao externo, Figura 4.28 (a) e (c), os resultados dos perfis de velocidade se afastam da

referência, enquanto que para os casos em que o domínio interno é proporcionalmente maior em relação ao externo, os perfis de velocidade se aproximam dos resultados de Ghia et al. (1982). Isto acontece devido ao fato de que o escoamento externo à cavidade, o qual também é induzido pelo movimento da tampa deslizante, tem mais liberdade para se desenvolver, produzindo vórtices no domínio exterior que perturbam o domínio interno, à medida que H cresce.

No caso de $H=4$ Figuras 4.26 (a) e (b) o escoamento externo não consegue formar vórtices nos cantos inferiores, devido a não formação das recirculações exteriores necessárias para a formação desses vórtices secundários. Então é importante que se tenha sempre espaço entre o domínio interno e as condições de contorno periódicas exigidas pelo método pseudo-espectral.

Estas características comentadas acima ficam claras ao se observar a Figura 4.31, que mostra o gráfico da norma L_2 em função do tempo. Nele pode-se observar que a fronteira do caso de $H=4$ sofre muito mais influência do escoamento externo do que as demais simulações.

Observa-se também que quanto menor for o domínio externo, menor será o esforço computacional adicional a solução do domínio interno, no qual se encontra o problema de interesse.

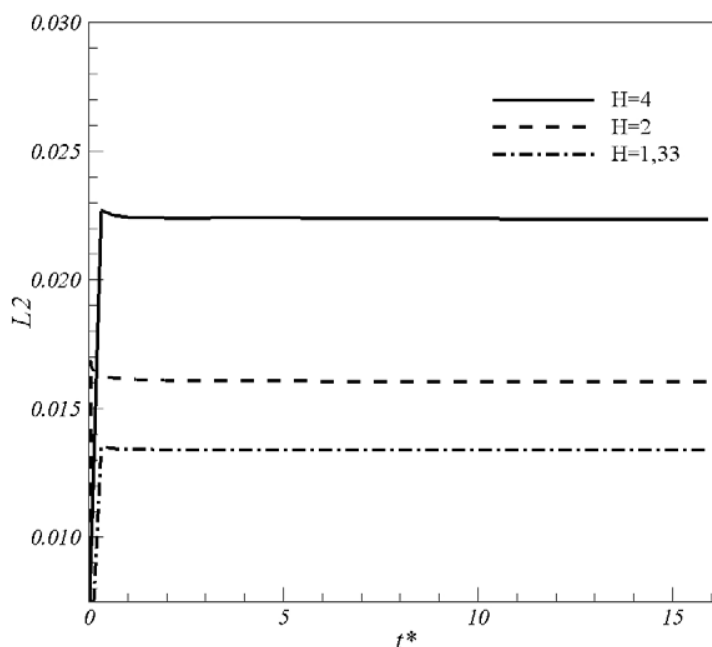


Figura 4.31: Comparação da Norma L_2 sobre a fronteira para diferentes tamanhos de domínio interno.

4.3.4 Análise das componentes da força lagrangiana

Para se observar o comportamento da fronteira imersa, foram colocadas sondas nos pontos do domínio lagrangiano as quais permitem acompanhar a evolução das componentes de força lagrangiana em função do tempo. Com esta análise, é possível checar quais as componentes do termo fonte que mais influenciam a formação do campo de força. Esta simulação foi feita à $Re=100$ com $L_x = L_y = 2\pi$ utilizando 128x128 nós de colocação no domínio externo e $H=1,33$, ou seja, $l_x = l_y = 3\pi/2$, com 96x96 nós de colocação no domínio interno da cavidade (Figura 4.32). Foi usado um $\Delta t = 10^{-4}$ s. As posições das sondas estão ilustradas na Figura 4.32.

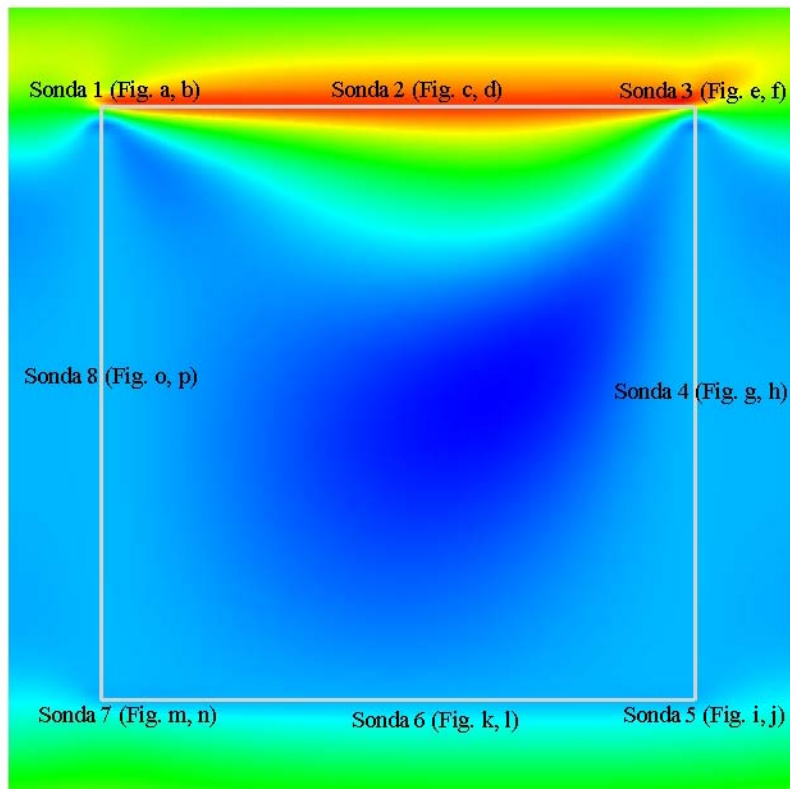
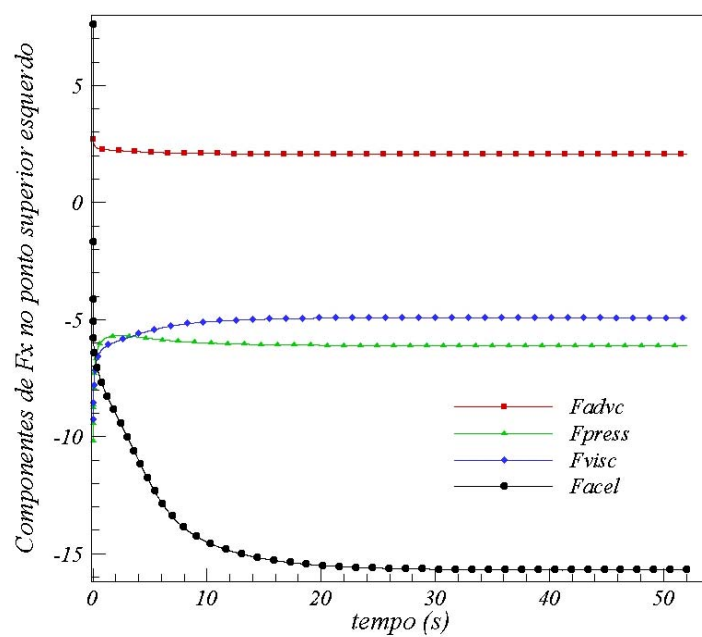
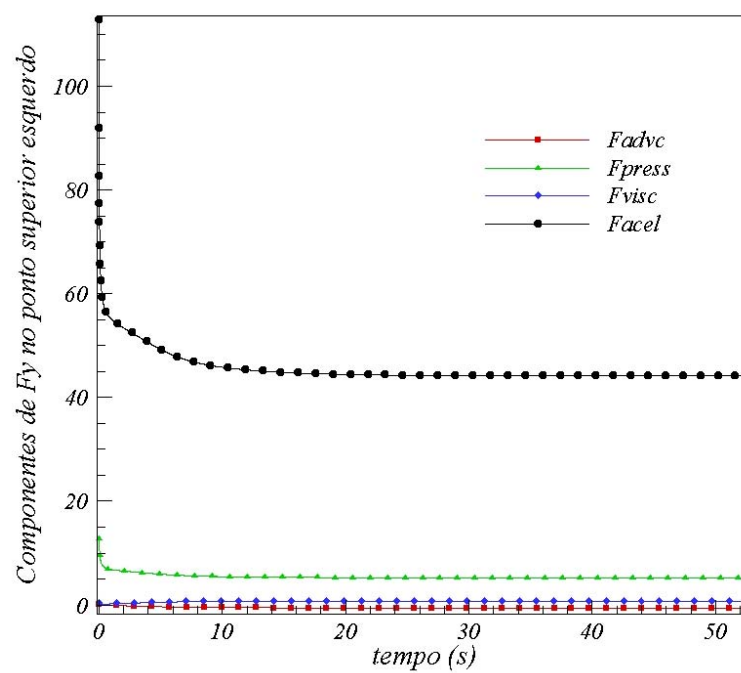


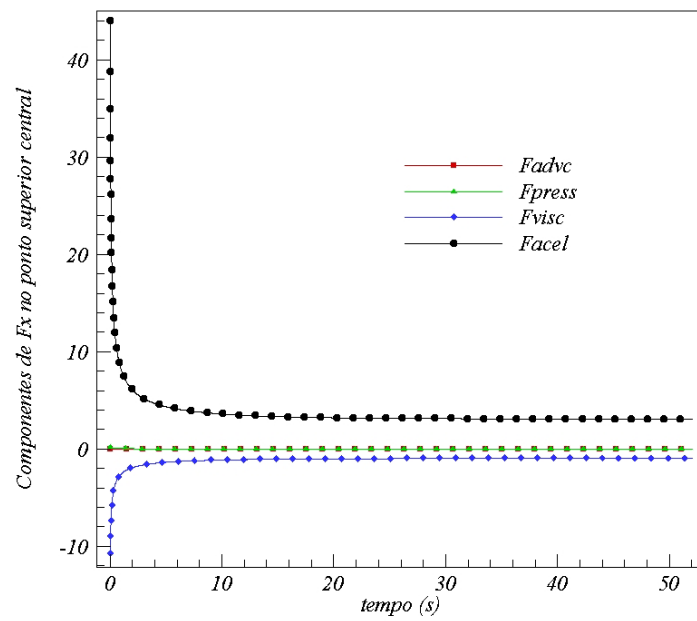
Figura 4.32: Esboço das posições das sondas utilizadas para a captura da intensidade da força lagrangiana.



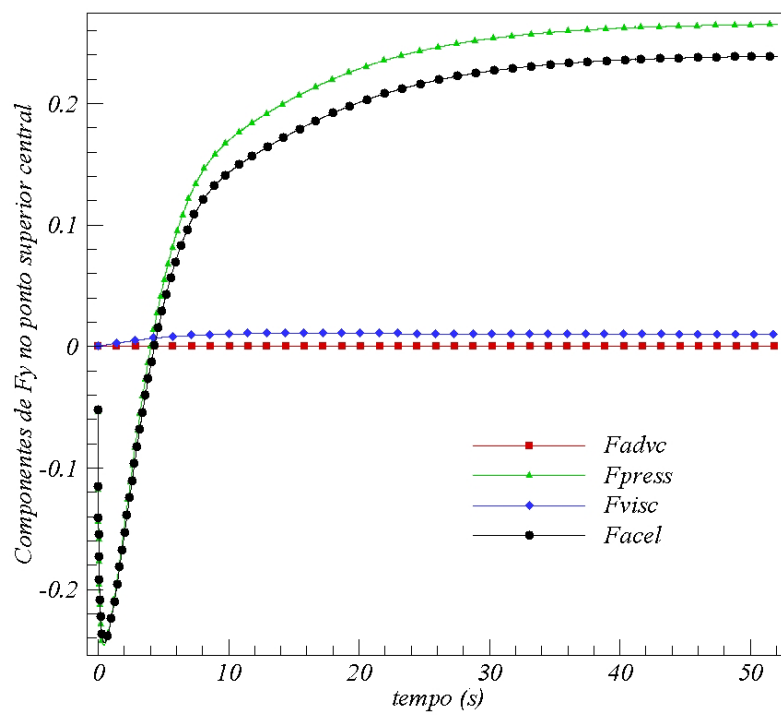
a)



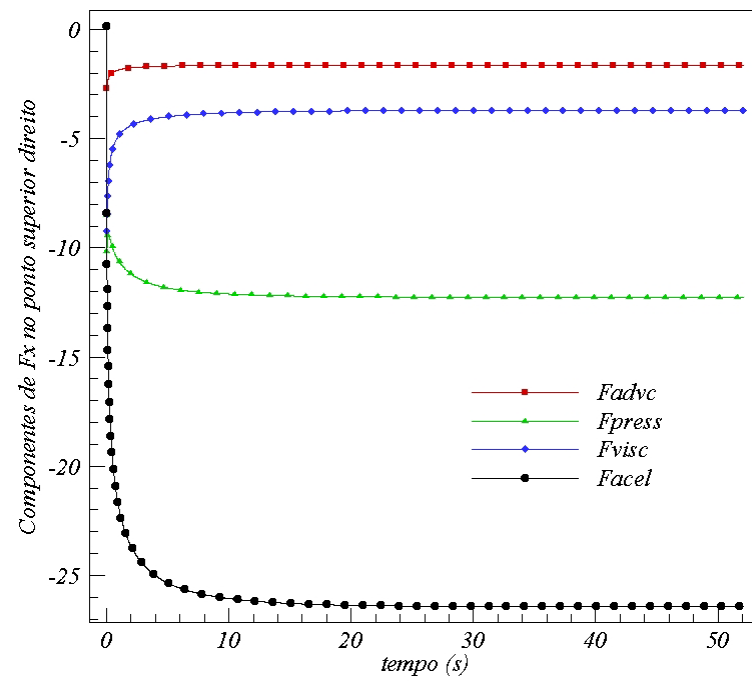
b)



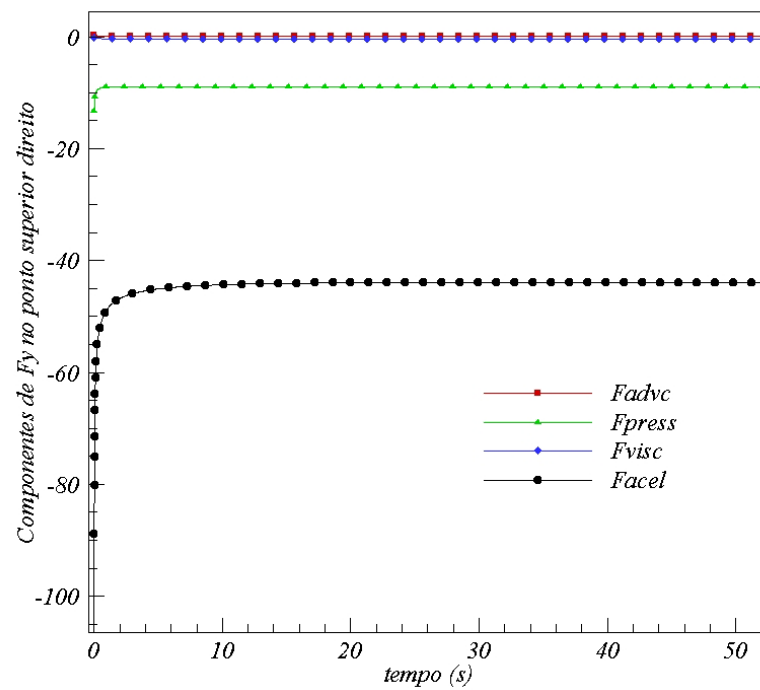
c)



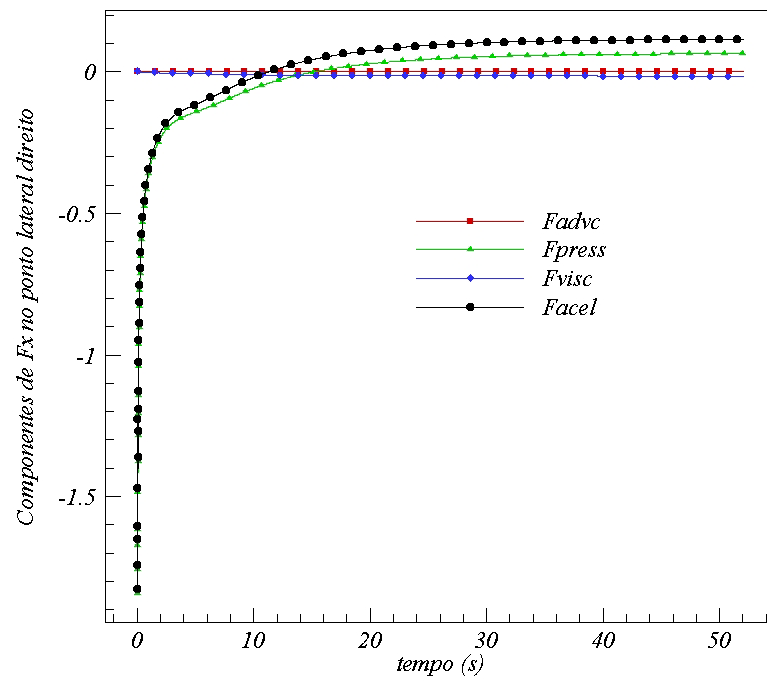
d)



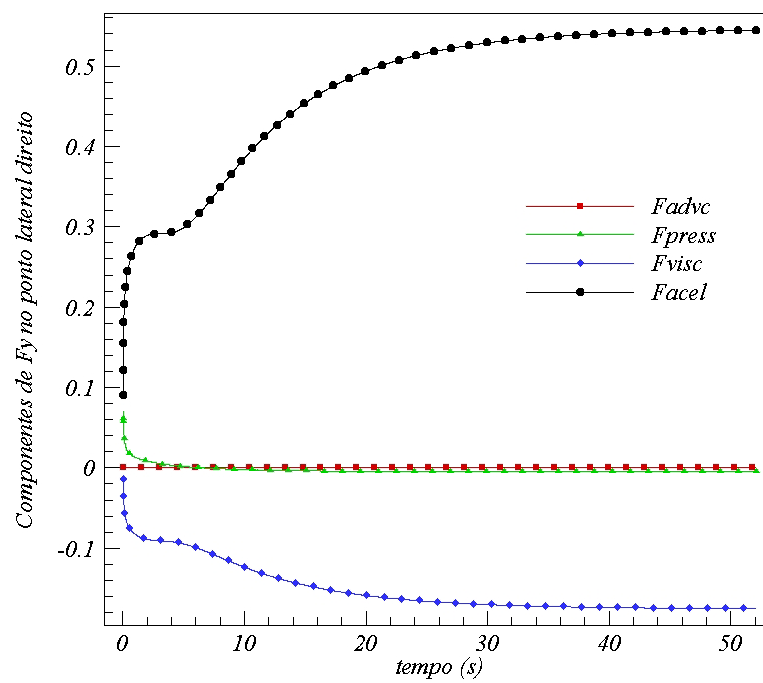
e)



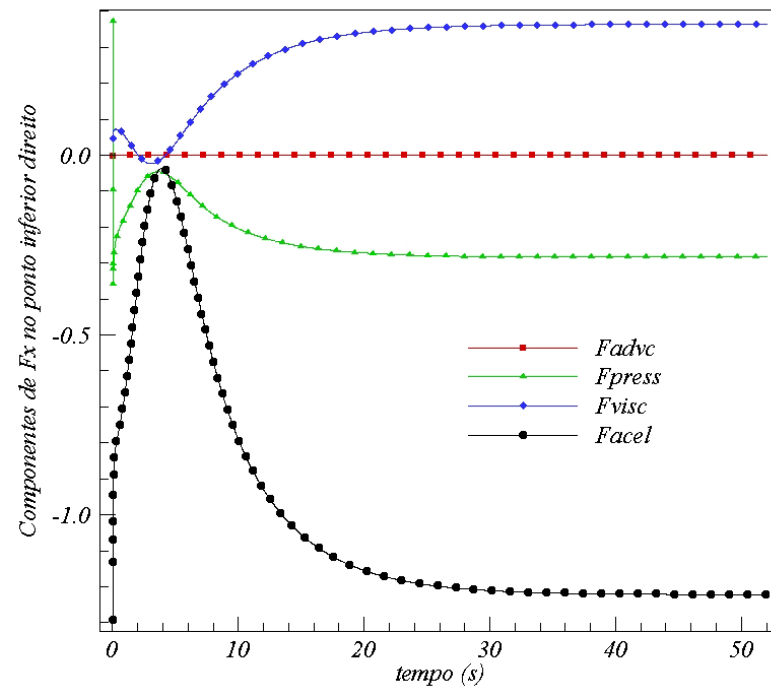
f)



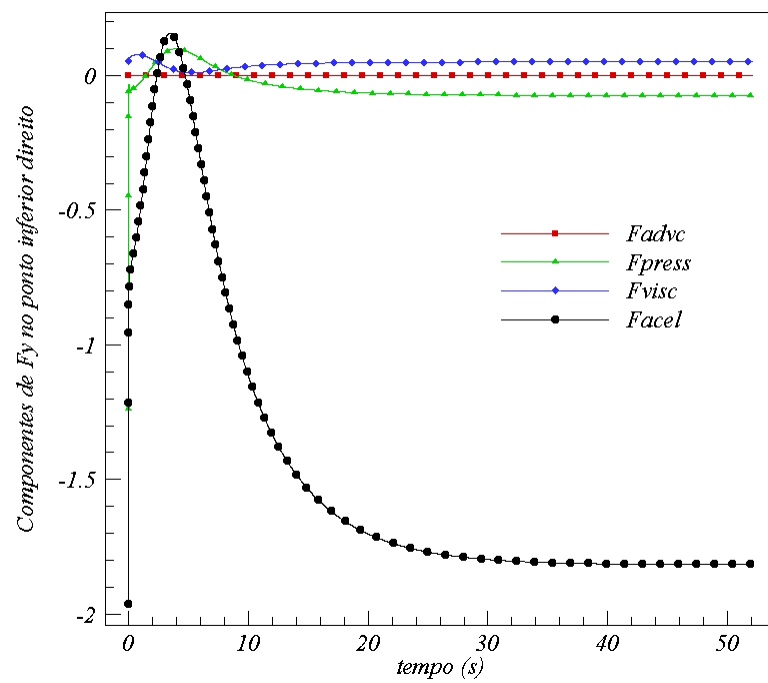
g)



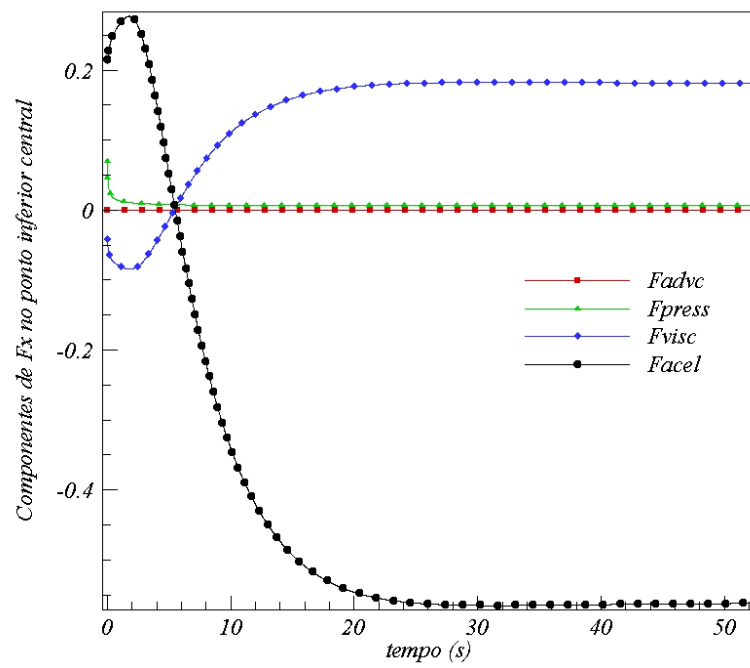
h)



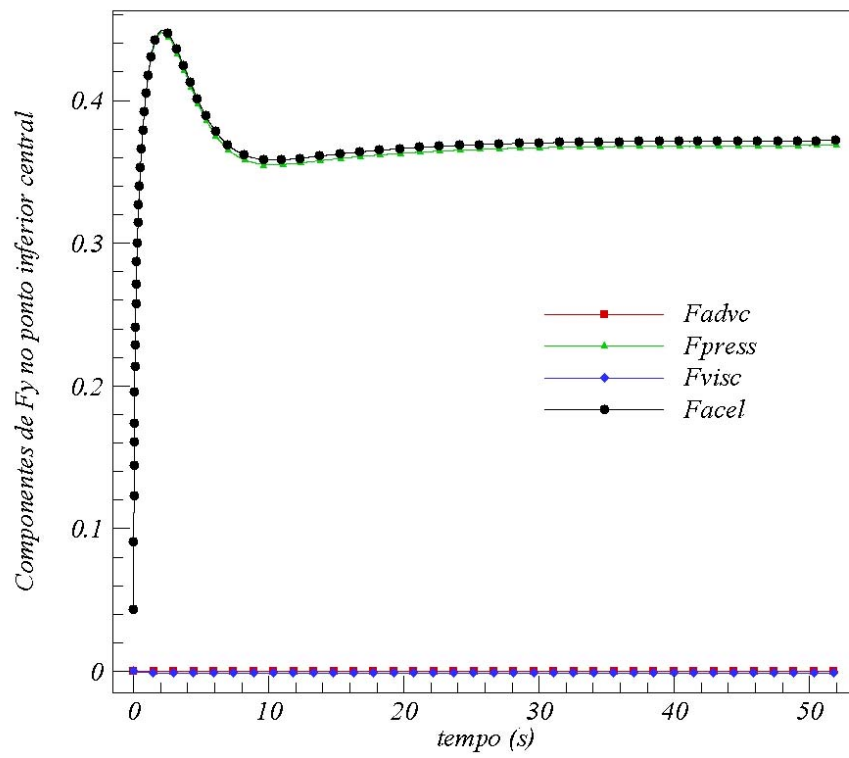
i)



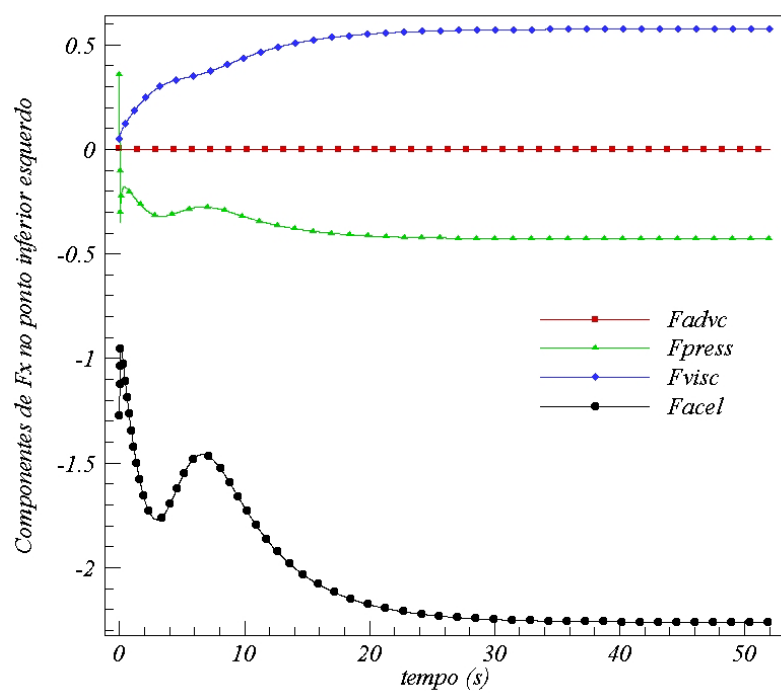
j)



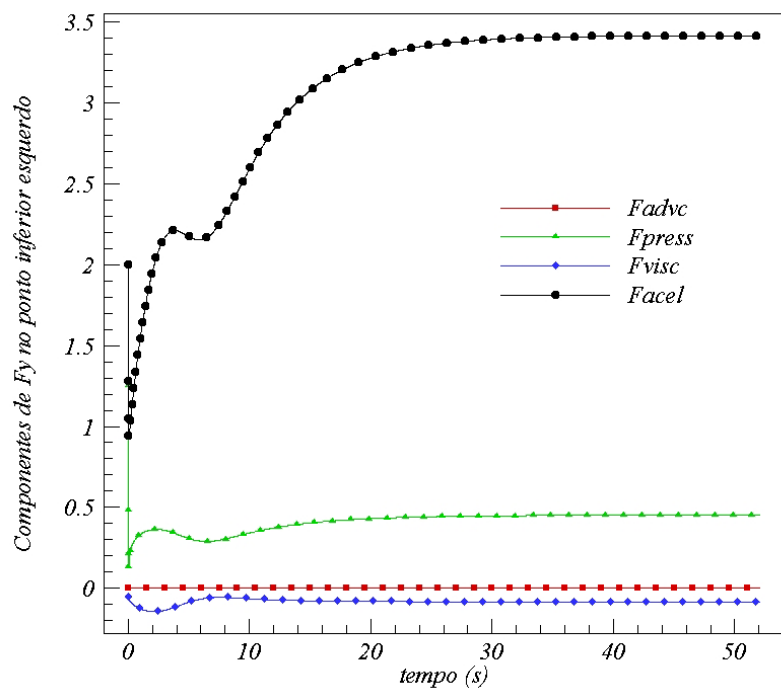
k)



l)



m)



n)

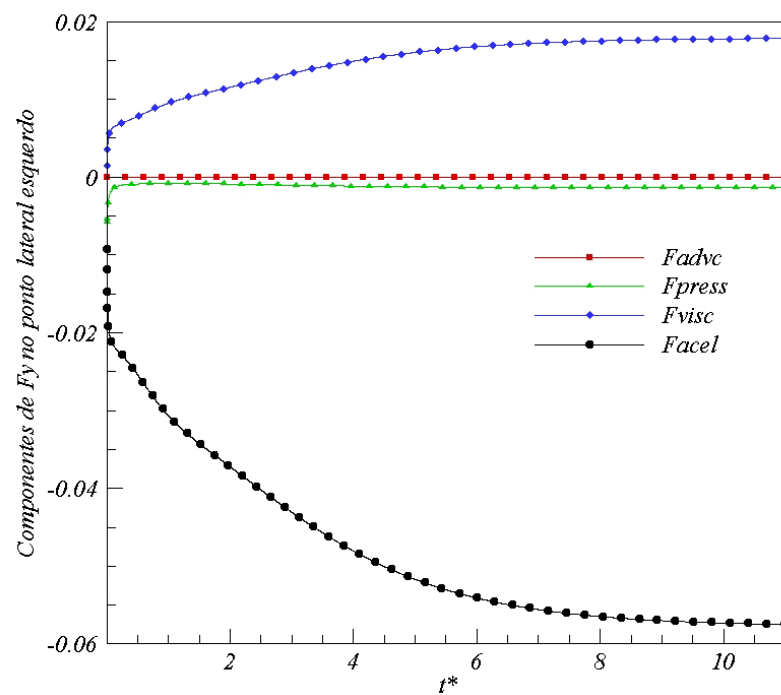
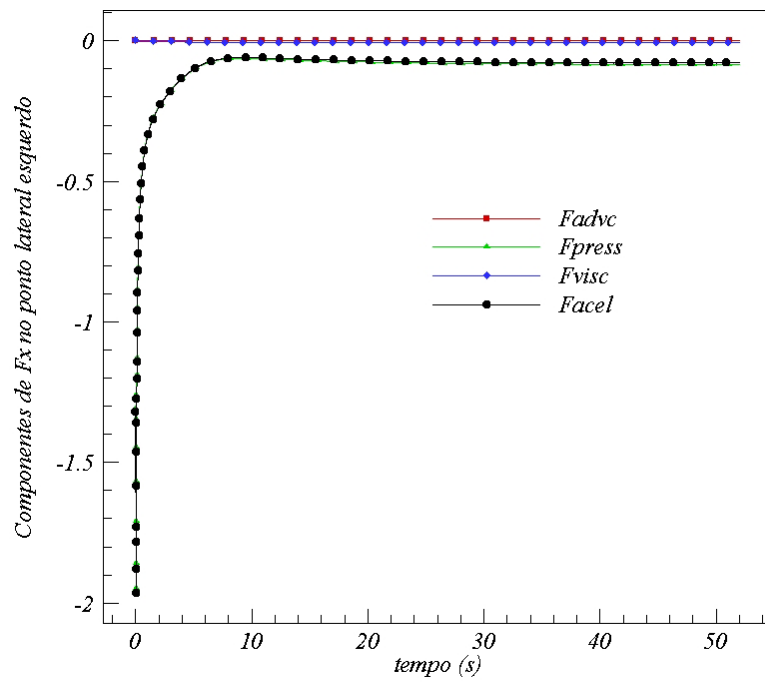


Figura 4.33: Componentes da força lagrangiana em diferentes pontos da cavidade. Os posicionamentos das sondas podem ser visto na Figura 4.32.

Numa análise geral dos gráficos da Figura 4.33 observa-se que o termo de força de aceleração (*Facel*) é o que mais contribui para a geração da força lagrangiana. Nos gráficos (d), (g), (l) e (o), observa-se que o termo de pressão possui a mesma magnitude do termo de aceleração forçante, mostrando que ele é igualmente importante na geração da força para nessas posições.

Cabe também destacar que a componente gerada pela parcela de força advectiva (*Fadvec*) possui um peso insignificante na geração da força na maior parte das posições analisadas, o que já era esperado devido ao baixo número de Reynolds da simulação feita. Esta é uma constatação importante, pois o cálculo deste termo é o mais caro dentre todos, computacionalmente falando, já que ele é calculado de forma pseudo-espectral. Porém seu cálculo não pode ser desprezado quando observa-se os gráficos (a) e (e). Além disso, espera-se que esse termo passe a ter um valor importante à medida que o número de Reynolds do escoamento aumente.

4.3.5 Influência do número de Reynolds

A fim de observar a influência do número de Reynolds nas simulações da cavidade com tampa deslizante, utilizando a metodologia proposta de união entre a metodologia pseudo-espectral e a metodologia da fronteira imersa, fez-se seis simulações para diferentes números de Reynolds: $Re=25$, $Re=50$, $Re=75$, $Re=100$, $Re=400$, e $Re=1.000$. Os casos de $Re=400$ e $Re=1.000$ serão mostrados nas próximas sessões, pois apresentam particularidades que devem ser exploradas com mais detalhes.

Os demais casos são mostrados na Figura 4.36, a qual traz os perfis de velocidade horizontal sobrepostos por linhas de corrente. Para todos os casos foi utilizado $L_x = L_y = 2\pi$ no domínio externo, com 128×128 nós de colocação e $l_x = l_y = 3\pi/2$ no domínio interno, com 96×96 nós de colocação. Para o caso de $Re=100$ foi utilizado $\Delta t = 10^{-4}$ s como passo de tempo. Nos casos para $Re < 100$, devido a alta viscosidade, foi necessário utilizar $\Delta t = 5 \times 10^{-5}$ s para que houvesse convergência.

Todos os casos foram simulados até estabelecer o regime permanente, como pode ser visto nas Figuras 4.34 e 4.35, as quais mostram o histórico da velocidade horizontal e vertical, respectivamente, no centro da cavidade, para diferentes valores do número de Reynolds.

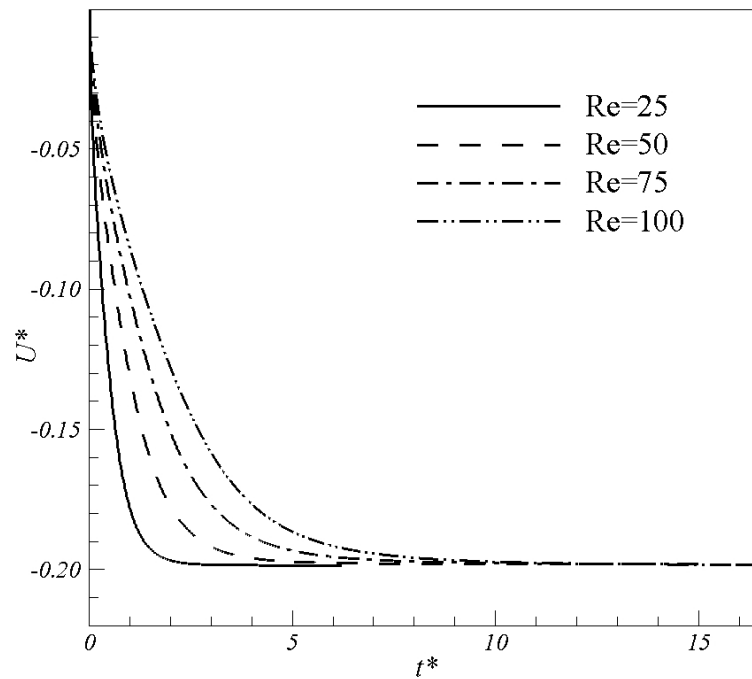


Figura 4.34: Componente horizontal da velocidade no centro da cavidade em função do tempo, para diferentes números de Reynolds.

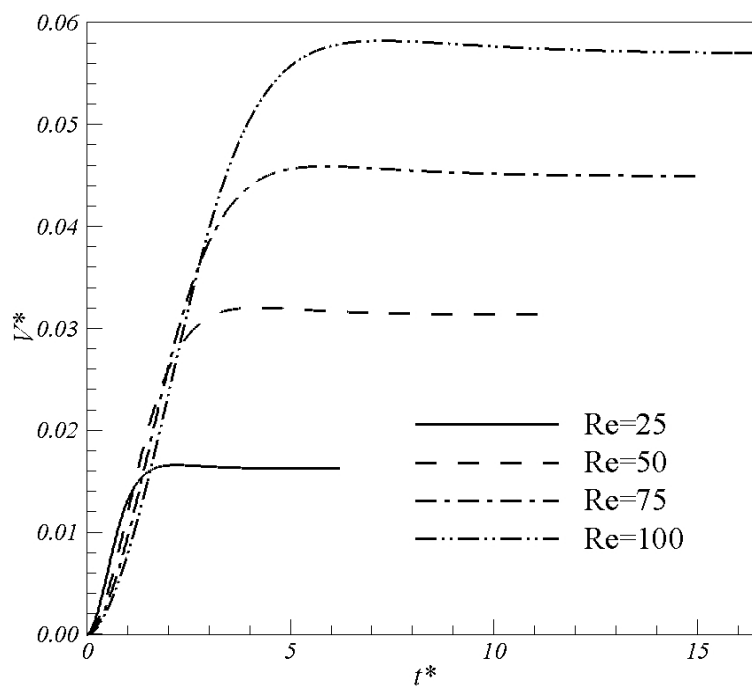


Figura 4.35: Componente vertical da velocidade no centro da cavidade em função do tempo, para diferentes números de Reynolds.

A análise qualitativa da Figura 4.36 (a), (b), (c) e (d) mostra o vórtice principal no interior da cavidade se deslocando para a direita conforme aumenta-se o número de Reynolds isto ocorre devido à influência do movimento da tampa. No caso de $Re=25$ a recirculação principal é, praticamente, simétrica à linha central da cavidade.

As recirculações secundárias são formadas simetricamente nos cantos inferiores da cavidade. Nestas simulações o esperado era que as recirculações secundárias estivessem posicionadas nos cantos inferiores da cavidade, mas elas se apresentam deslocadas um pouco acima da posição esperada. No caso de $Re=100$ a recirculação secundária induzida pelo vórtice primário apresenta-se maior no canto inferior direito.

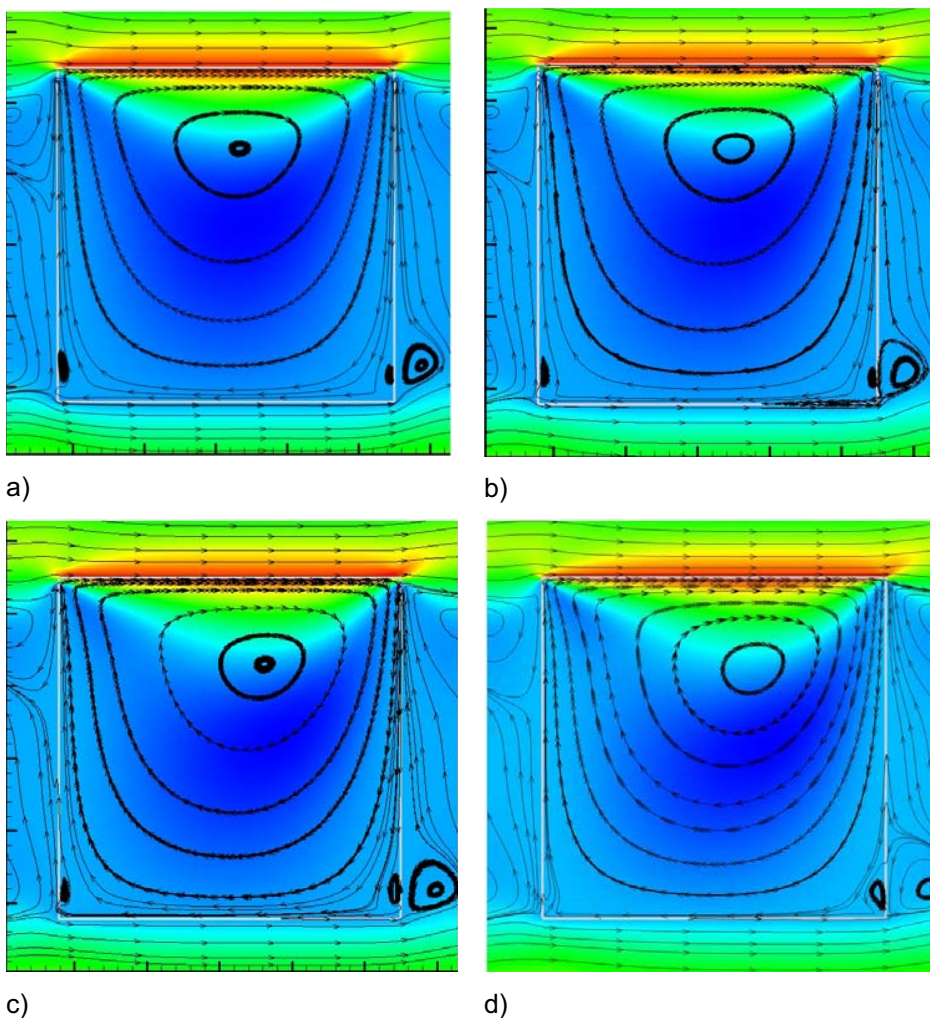


Figura 4.36: Cavidade com tampa deslizante – perfil de velocidade horizontal: a) $Re=25$, b) $Re=50$, c) $Re=75$ e d) $Re=100$.

A fim de se comparar quantitativamente os resultados, simulou-se os mesmos casos em um código desenvolvido por Padilla (2006) e levantou-se os perfis de velocidade, horizontal e vertical, no centro da cavidade comparando-os. Este código resolve o problema da cavidade com tampa deslizante utilizando o método de volumes finitos de segunda ordem no tempo e no espaço. Para a simulação à $Re=100$, os resultados também foram comparados com os perfis de Ghia et al. (1982). Essas comparações podem ser vistas na Figuras 4.35, 4.36, 4.37, 4.38, 4.39, 4.40, 4.41 e 4.42.

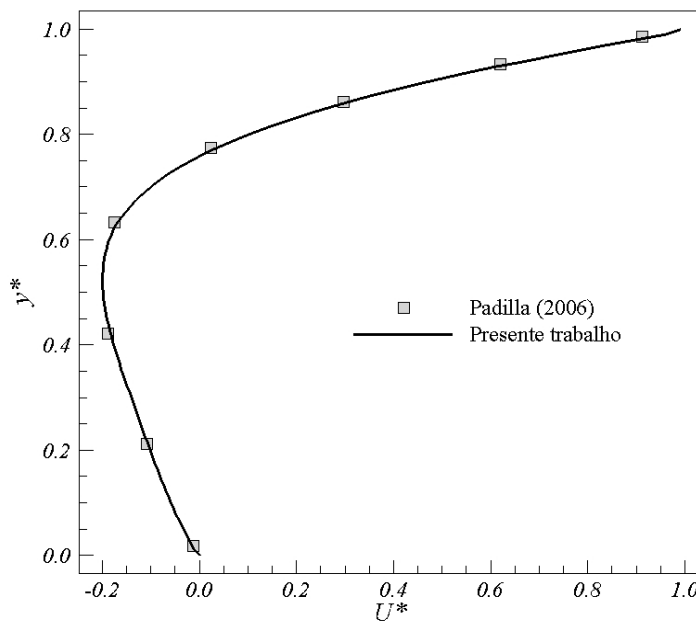


Figura 4.37: Perfis de velocidade horizontal para $Re=25$.

Os perfis da componente horizontal (Figuras 4.35, 4.36, 4.37 e 4.38) e os perfis da componente vertical (Figuras 4.39, 4.40, 4.41 e 4.42) apresentam uma boa concordância com os perfis das referências (PADILLA, 2006 e GHIA et al., 1982). Estes resultados mostram muita consistência entre os resultados obtidos com a metodologia proposta no presente trabalho e os resultados obtidos com uma metodologia convencional.

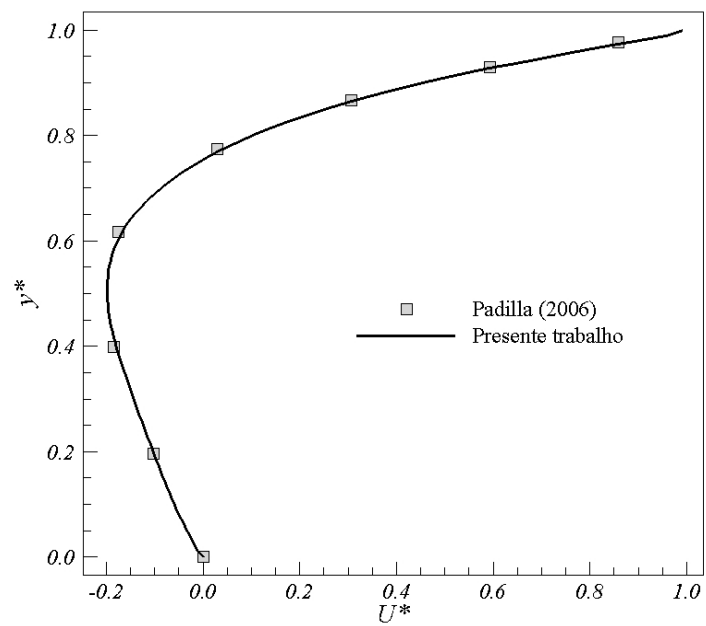


Figura 4.38: Perfis de velocidade horizontal para $Re=50$.

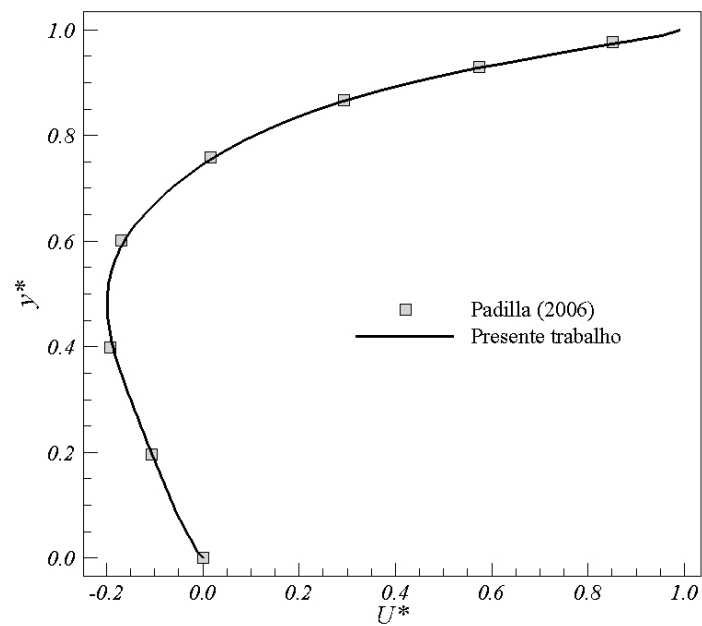


Figura 4.39: Perfis de velocidade horizontal para $Re=75$.

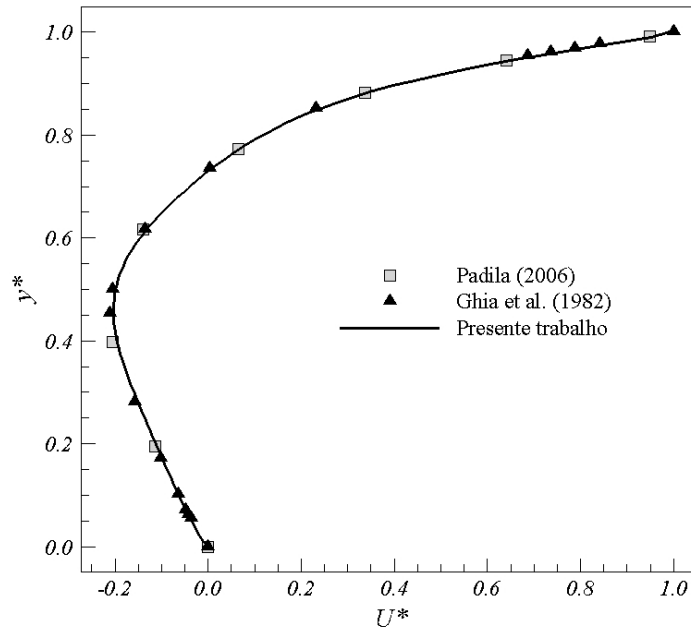


Figura 4.40: Perfis de velocidade horizontal para $Re=100$.

Para comparar o custo computacional entre o código de Padilla (2006) e o desenvolvido no presente trabalho foi feita uma análise do custo computacional entre as simulações realizadas para $Re=25$. O código de Padilla (2006) gastou aproximadamente 5 horas de cálculo para atingir o regime permanente à esse número de Reynolds. O código pseudo-espectral gastou 7 horas aproximadamente para atingir o mesmo resultado. Essa diferença, apesar de ser grande, é importante lembrar que o código de Padilla (2006) é de segunda ordem no espaço e no tempo, enquanto que o código pseudo-espectral é um código de alta ordem. Espera-se também que esta diferença seja invertida para cálculos 3D a alta resolução, uma vez que o custo para métodos não-espectrais é de N^2 enquanto que o custo para métodos espectrais é de $N \log N$, onde N é o número de pontos.

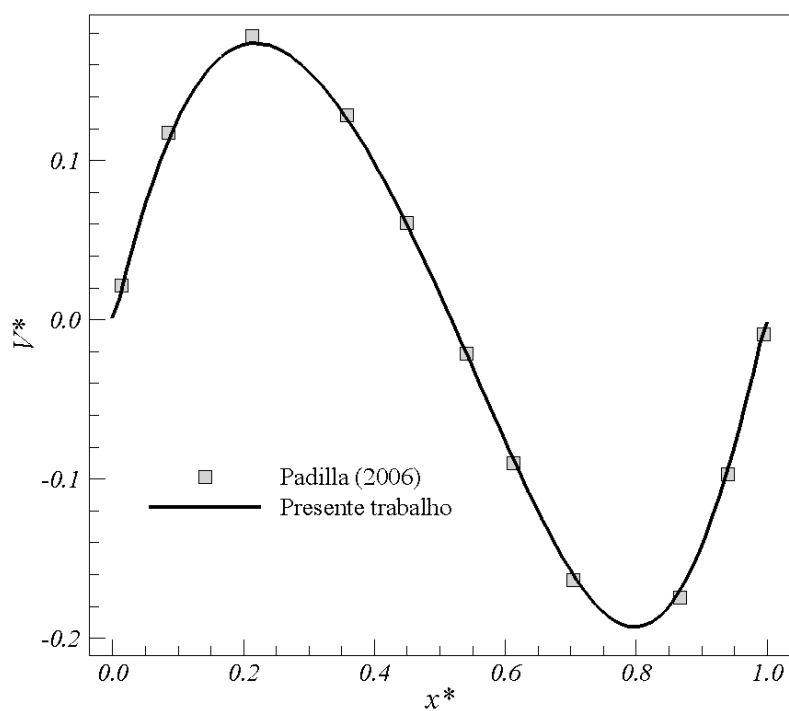


Figura 4.41: Perfis de velocidade vertical para $Re=25$.

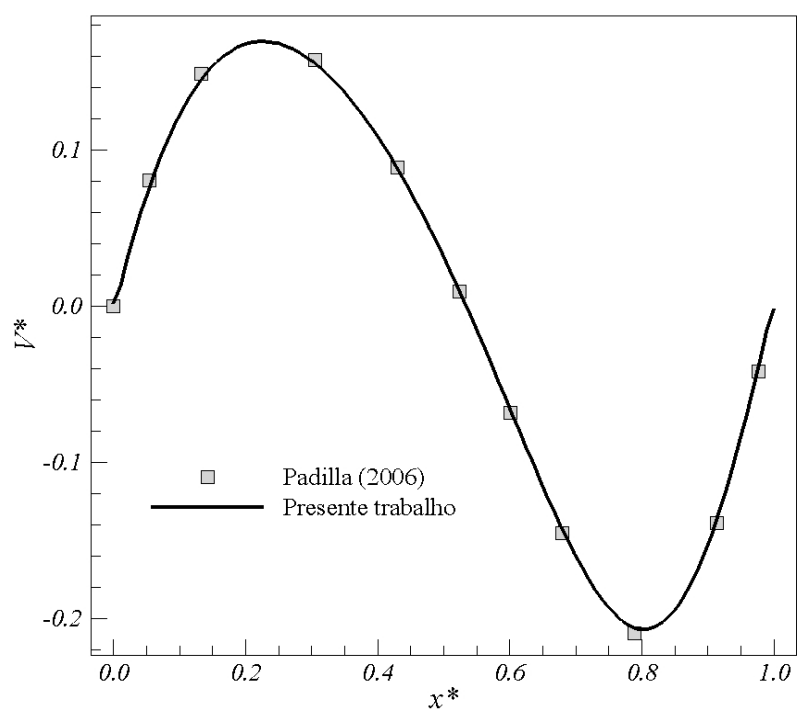


Figura 4.42: Perfis de velocidade vertical para $Re=50$.

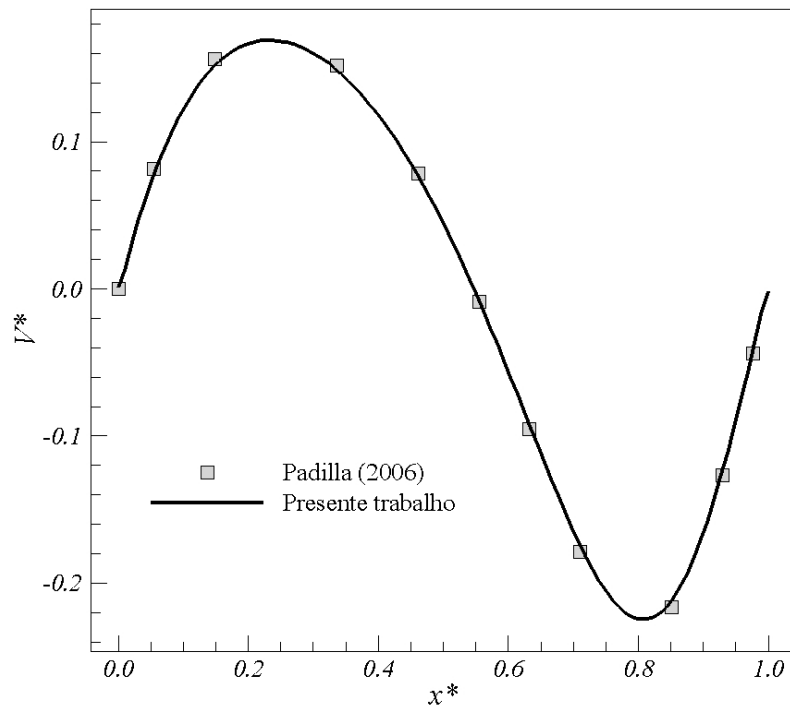


Figura 4.43: Perfis de velocidade vertical para $Re=75$.

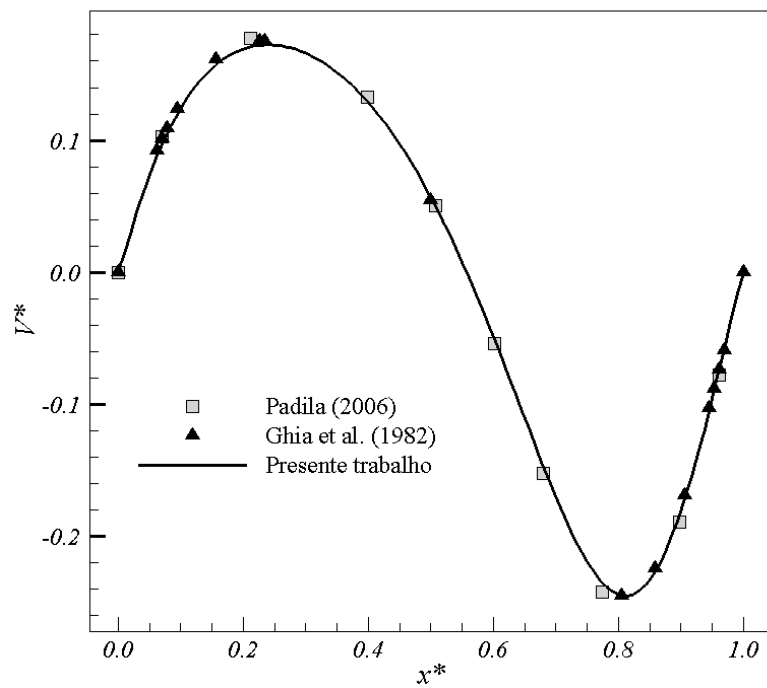


Figura 4.44: Perfis de velocidade vertical para $Re=100$.

Analisando a Figura 4.45, a qual mostra a norma L_2 em função do tempo para as quatro simulações apresentadas na Figura 4.40, nota-se uma ligeira perda de precisão deste parâmetro conforme o número de Reynolds diminuí.

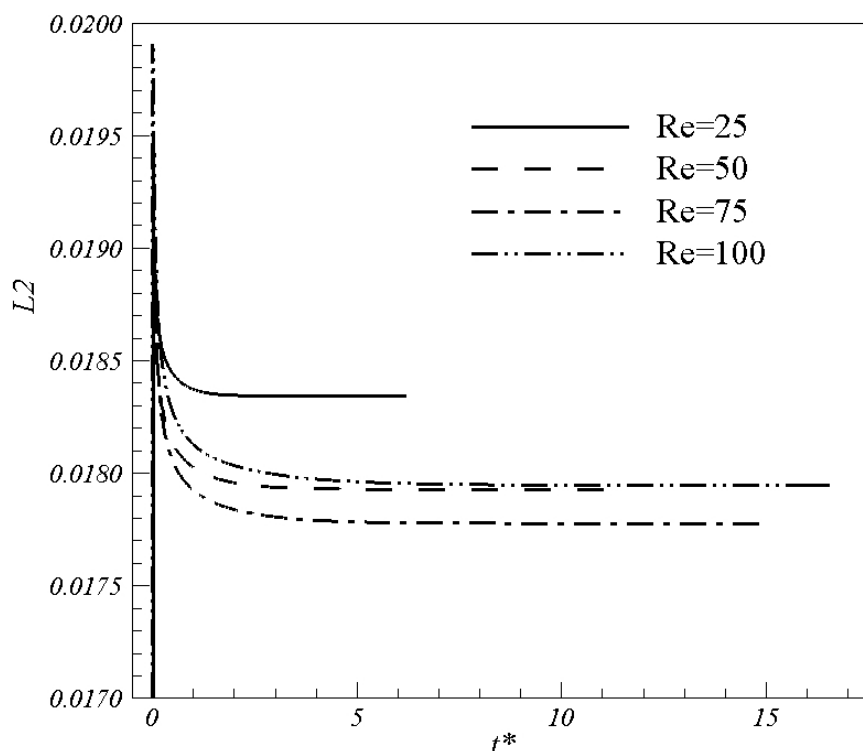


Figura 4.45: Comparação da Norma L_2 sobre a fronteira para diferentes números de Reynolds.

4.3.6 Variação do domínio externo

Foram feitas simulações com número de Reynolds mais altos ($Re=400$ e $Re=1.000$) para a cavidade com tampa deslizante. Foi observado que, para essa faixa de número de Reynolds, o escoamento não atingiu o regime permanente, pois os efeitos não-lineares tornam-se muito intensos, aumentando as perturbações nos campos de velocidade e dificultando a convergência do código.

Buscando estabilizar o cálculo para $Re=400$ foram feitas duas simulações com $\Delta t=5 \times 10^{-4}$ s, utilizando o método de integração temporal de Adams-Bashforth de terceira ordem, com filtro do tipo *Sharpened Raised Cosine*, e variou-se a relação do domínio

externo com $L_x = L_y = 2\pi$ (domínio quadrado) tendo 256x256 nós de colocação e $L_x = 4\pi$ e $L_y = 2\pi$ (domínio retangular) com 512x256 nós de colocação. Para o domínio interno foi utilizado $l_x = l_y = \pi$ onde se manteve 128x128 nós de colocação.

As Figuras 4.44 (a) e (b) mostram a evolução das componentes horizontal e vertical da velocidade, respectivamente, em um ponto no centro da cavidade em função do tempo, para os dois domínios externos simulados, um com geometria quadrada e outro com uma geometria retangular. Observa-se que os resultados são muito semelhantes.

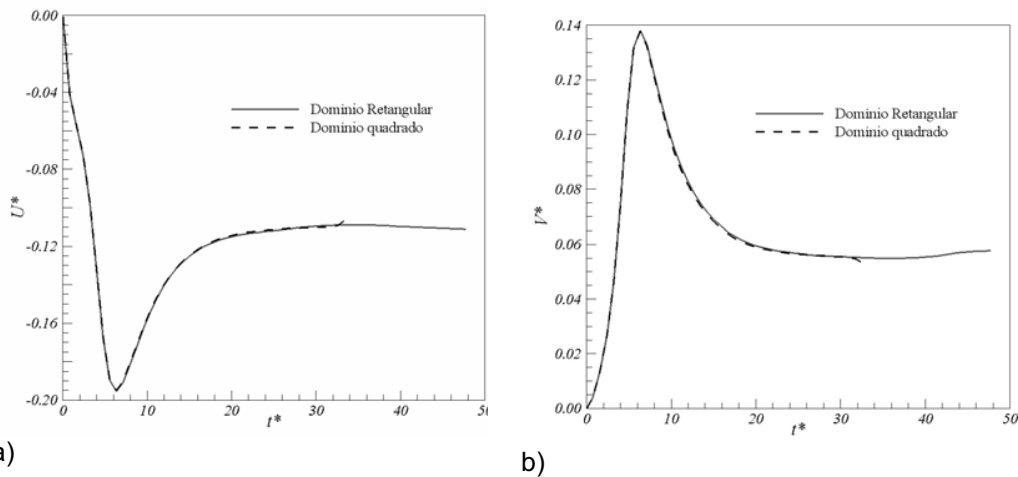


Figura 4.46: Componentes da velocidade no centro da cavidade a $Re=400$ em função do tempo, para domínio externos diferentes: a) componente horizontal no centro da cavidade, b) componente vertical no centro da cavidade.

É possível verificar que ambos os casos simulados atingem o patamar de regime permanente, o que fica evidente quando se compara os perfis de velocidade nas Figura 4.48 (a) e (b). Observa-se ainda que os perfis de ambas as simulações ficam praticamente sobrepostos. No entanto, o cálculo para a geometria quadrada diverge ao final de $t=105$ s, para a geometria retangular, o cálculo prossegue até $t=150$ s. Isto mostra que o tipo de geometria do domínio externo influencia a estabilidade do cálculo.

É necessário lembrar que estes cálculos são bidimensionais e que a ausência dos efeitos tridimensionais também pode ter forte influência no resultado obtido. Imagina-se que a energia cinética turbulenta começa a se acumular no número de onda de corte, definido pela malha, o que provoca instabilidades numéricas. Moreira, (2007)¹, simulando jatos

¹ Comunicação interna: MOREIRA, L., Q., Laboratório de Transferência de Calor e Massa da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

temporais utilizando o método pseudo-espectral de Fourier, observou que, para um jato bidimensional, o cálculo diverge ao final de um dado tempo, e para jatos tridimensionais esse problema foi superado.

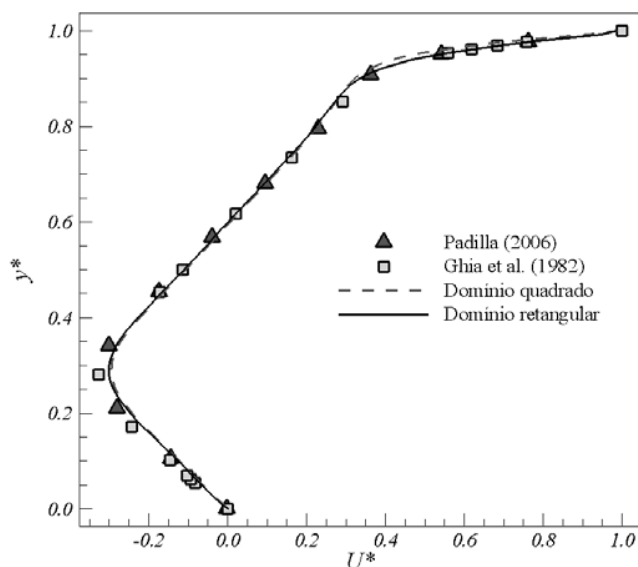


Figura 4.47: Perfil da componente da velocidade horizontal, obtido por uma linha vertical no centro da cavidade, verificando a influência do domínio externo.

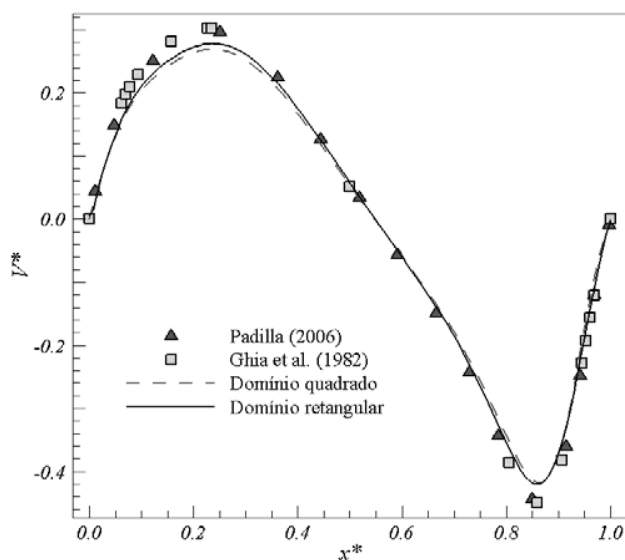


Figura 4.48: Perfil da componente da velocidade vertical, obtido por uma linha horizontal no centro da cavidade verificando a influência do domínio externo.

Observa-se que os perfis de velocidade mostrados nas Figuras 4.46 e 4.47 aproximam-se das referências (GHIA et al. 1982 e PADILLA, 2006). Porém, ainda apresenta-se subestimado. É possível que com o refinamento da malha e com uma relação de domínio externo pelo interno (H) menor essa diferença diminua. Nas Figura 4.49 e Figura 4.50 mostra-se a componente de velocidade horizontal e as linhas de corrente para os dois casos simulados.

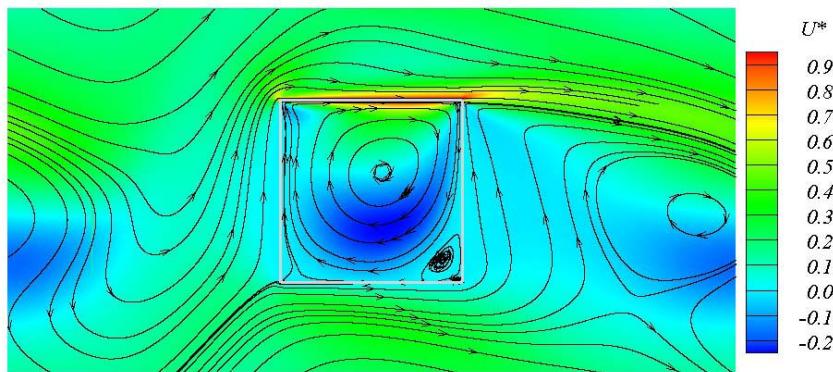


Figura 4.49: Componente horizontal de velocidade e linhas de corrente para $Re=400$ no domínio externo retangular.

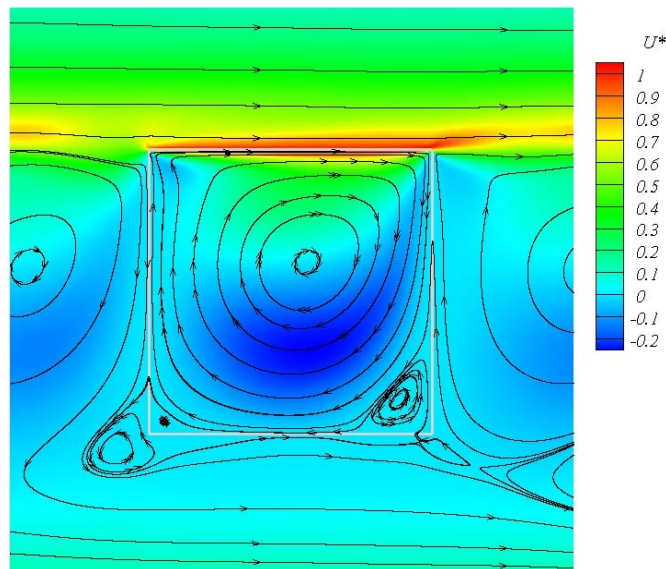


Figura 4.50: Componente horizontal de velocidade e linhas de corrente para $Re=400$ no domínio externo quadrangular.