

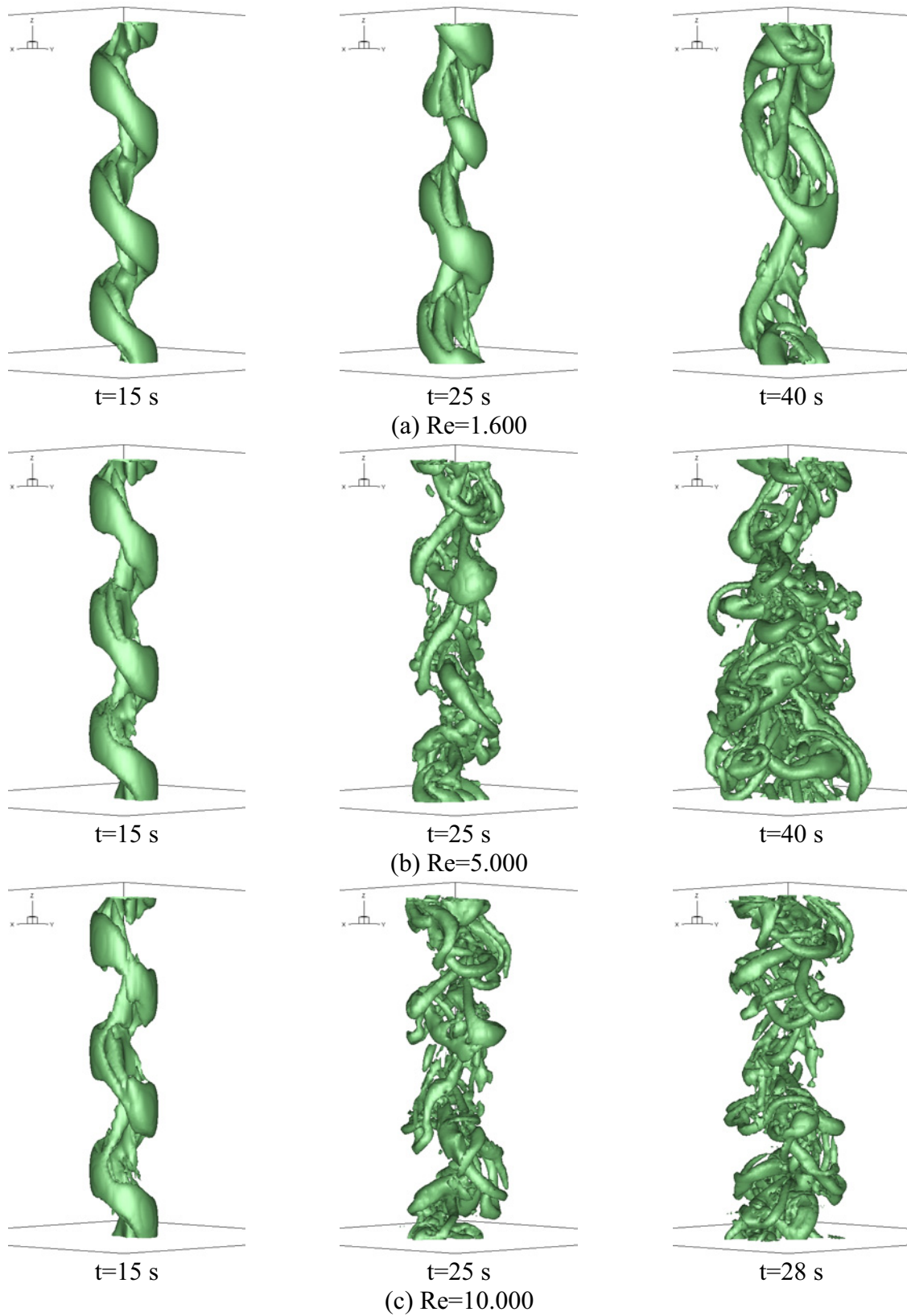


Figura 5.27 Evolução temporal do critério Q (isovalores nível $0,01 \text{ s}^{-2}$) para diferentes número de Reynolds.

Os planos xy ($z = \pi$) e xz ($y = \pi$) do módulo de vorticidade são traçados nas Figura 5.28 e Figura 5.29 respectivamente. À medida que aumenta o número de Reynolds, aumenta o número de pequenas escalas da turbulência e a desorganização do sistema. Para o caso de 10.000 pode-se verificar oscilações numéricas para os tempos de 25 e 28 s. Mais uma vez fica claro que para essa constante o modelo não foi capaz de realizar de forma eficiente a troca de energia entre as escalas turbulentas.

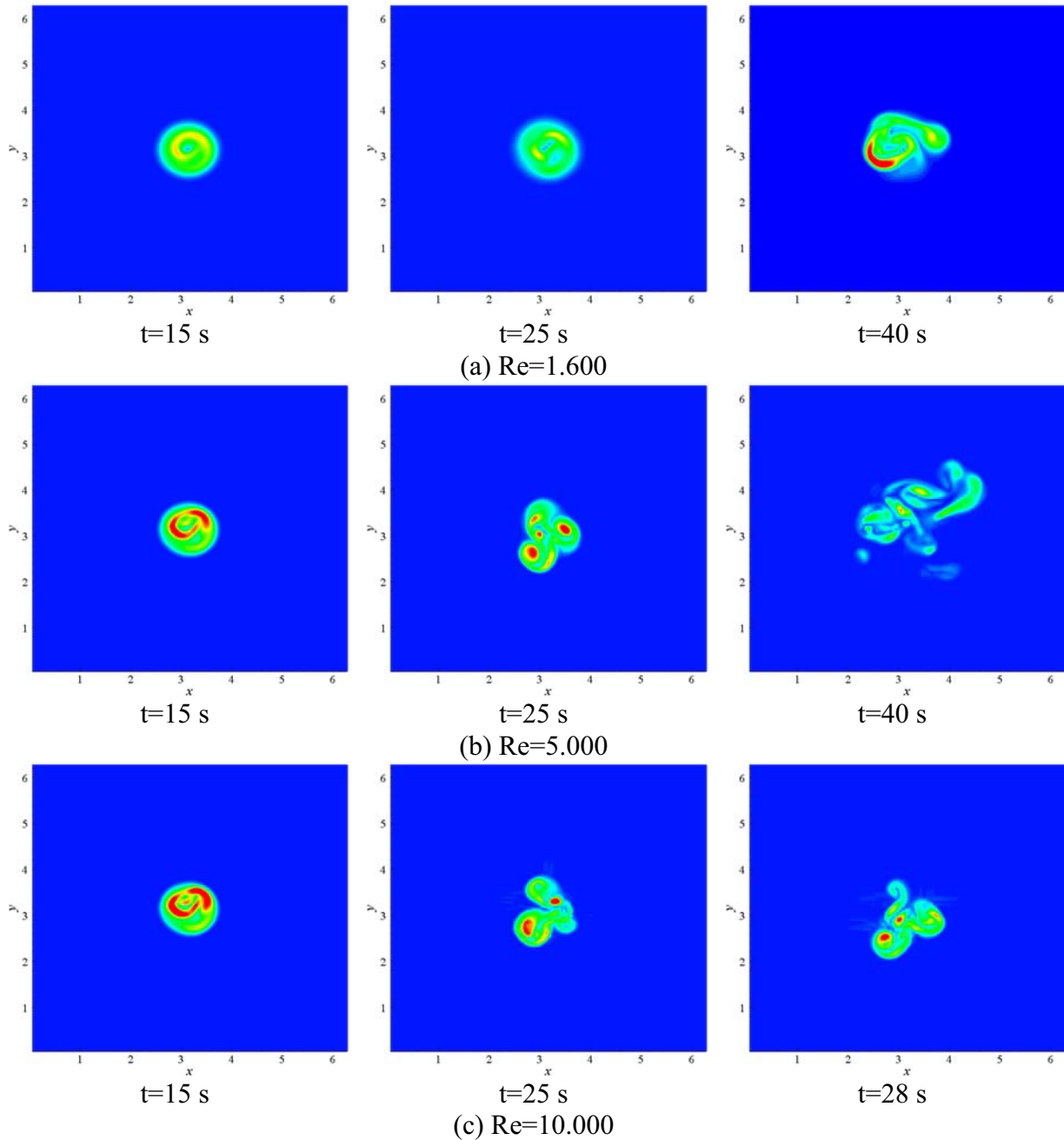


Figura 5.28 Evolução temporal do Módulo de Vorticidade $\|\vec{w}\|$ no plano xy ($z = \pi$) para diferentes número de Reynolds.

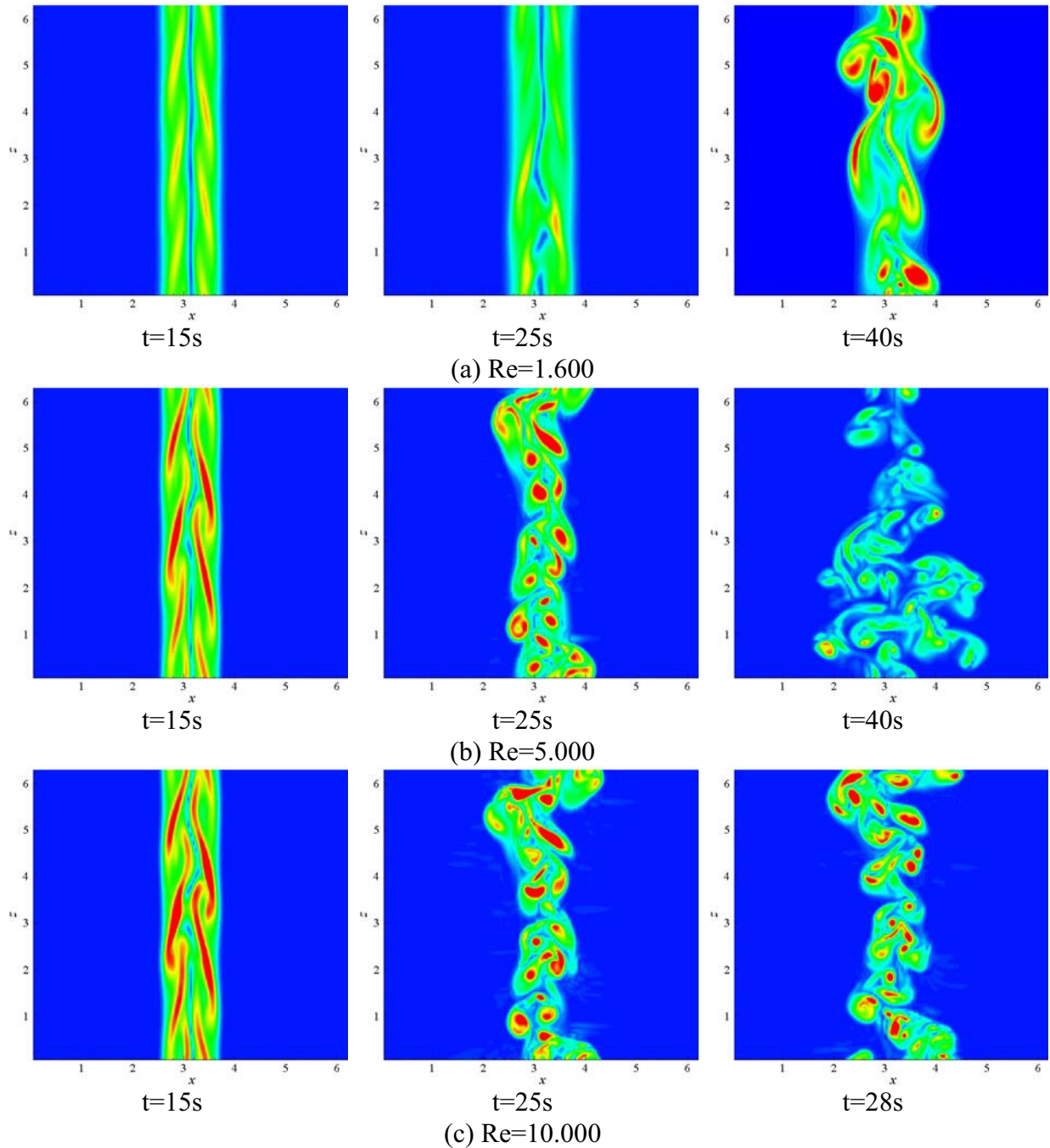


Figura 5.29 Evolução temporal do Módulo de Vorticidade $\|\vec{w}\|$ no plano xz ($y = \pi$) para diferentes número de Reynolds.

Nas Figura 5.30 e Figura 5.31 são traçados os espectros de energia cinética turbulenta para diferentes números de Reynolds. Na Figura 5.30 os espectros foram traçados no tempo de 25 s. A comparação entre os espectros de energia traçados na Figura 5.30, resultantes dos jatos simulados a diferentes números de Reynolds, permite verificar que quanto maior o número Reynolds mais rápida é a transição a turbulência do escoamento. Este fato é

justificado pelo aumento do número de pequenas escalas da turbulência com o aumento do número de Reynolds. Para o caso de Reynolds igual 1.600 nota-se uma “grande” quantidade de energia nas grandes estruturas, e uma acentuada queda de energia nas escalas dissipativas, mostrando que o modelo de turbulência transferiu de forma exagerada a energia das pequenas estruturas. É importante observar um acúmulo de energia para um número Reynolds igual 10.000, este acúmulo de energia, é devido ao fato da resolução da malha (128^3 células) e a constante de smagorinsky 0,27 não serem suficiente para resolver todas as escalas do escoamento, a esse número de Reynolds. Para o caso de Reynolds igual 5.000 o jato ainda não aproxima da reta no valor de $-5/3$, pois não teve tempo suficiente para desenvolver a turbulência.

Na Figura 5.31 os espectros foram traçados nos tempos onde o jato mais se aproximou da inclinação $-5/3$, e que nos instantes seguintes entra em decaimento. Na medida em que se aumenta o número de Reynolds, mais rápida é a transição à turbulência, e mais próxima fica da inclinação $-5/3$ a região inercial do espectro.

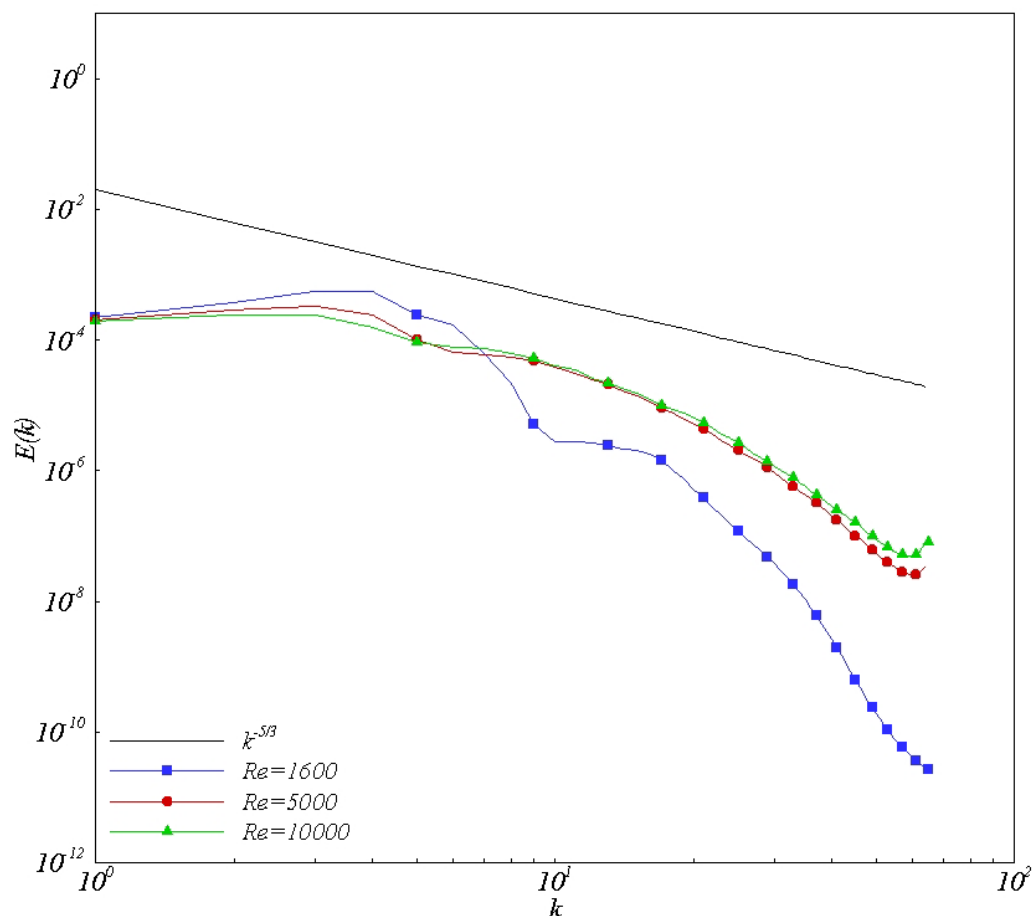


Figura 5.30 Espectro de energia cinética turbulenta para um jato no $t = 25$ s e para $Re=1.600$, $Re=5.000$ e $Re=10.000$.

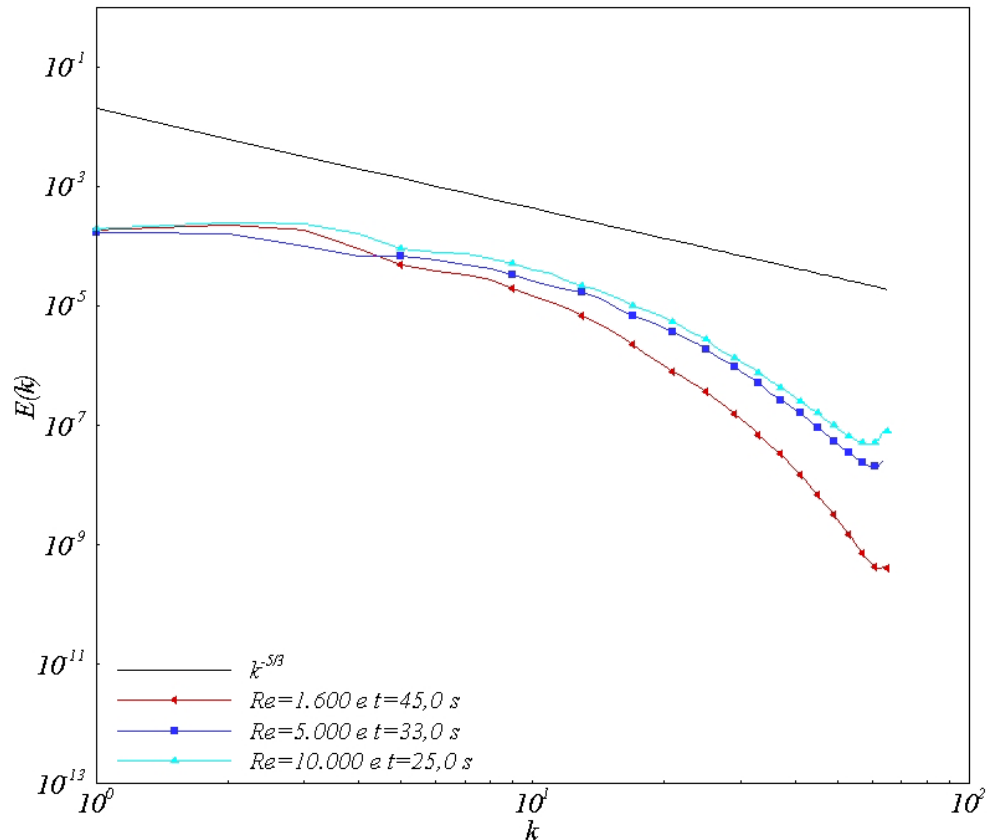


Figura 5.31 Espectro de energia cinética turbulenta para um jato em desenvolvimento temporal para $Re=1.600$, $Re=5.000$ e $Re=10.000$.

5.2.4 Comparação com outros autores

Os resultados obtidos através da simulação do jato natural foram comparados a dados experimentais obtidos via PIV. Estas medidas foram feitas para o escoamento de um jato a Reynolds 1.000 (SAKAKIBARA, 2004). Grande semelhança entre os resultados podem ser observados na Figura 5.32, que apresenta a comparação das visualizações da isosuperfície de vorticidade resultante da simulação realizada no presente trabalho, as simulações de Souza (2005) e a visualização experimental de Sakakibara (2004). Embora não se disponha das condições exatas sob as quais o experimento foi realizado, ou mesmo o valor da isosuperfície experimental apresentada, a presença de filamentos e outras estruturas típicas do jato podem ser evidenciadas nas simulações do presente trabalho, nas simulações de Souza (2005), e no experimento. Esta semelhança morfológica aumenta ainda mais a confiabilidade dos resultados numéricos do presente trabalho.

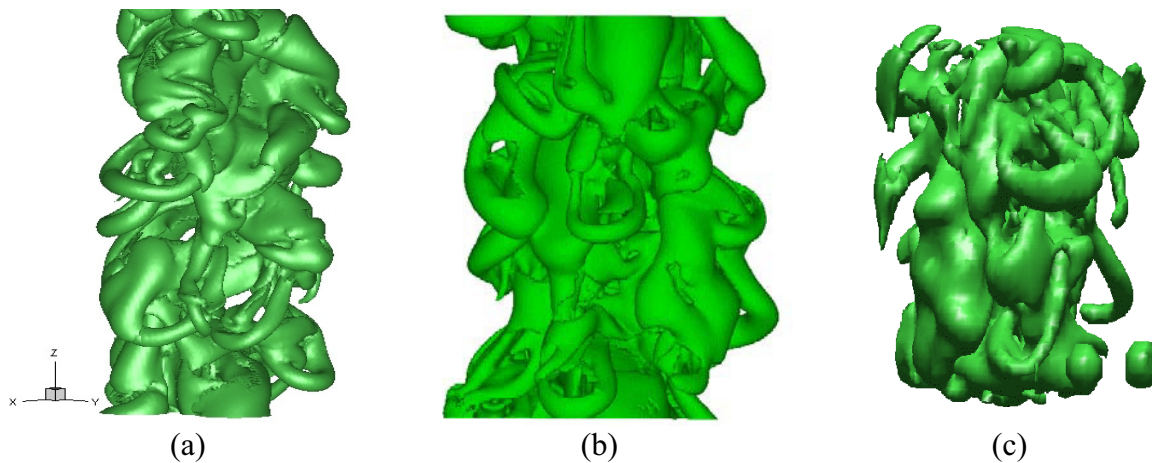
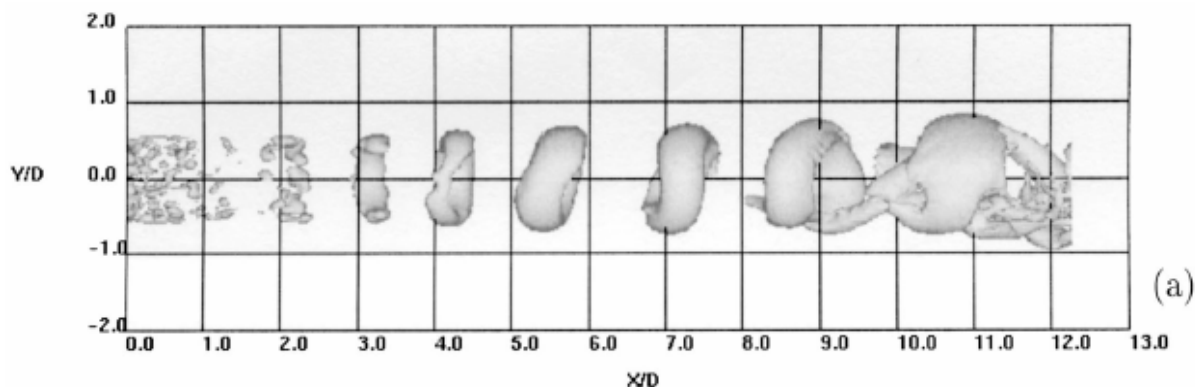
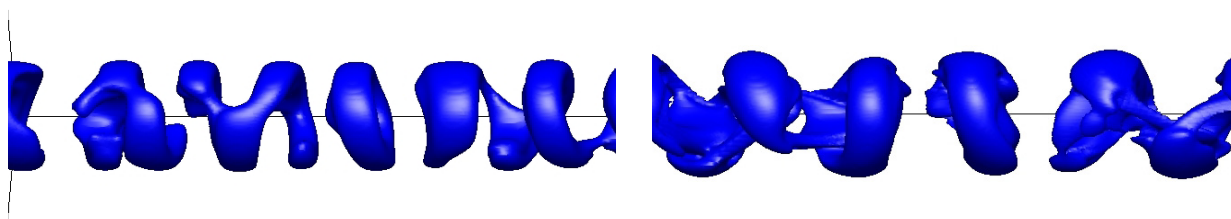


Figura 5.32 Visualizações de isosuperfície de vorticidade em jato a um nível de $1,6 \text{ s}^{-1}$ (a) presente trabalho, (b) Isosuperfície de vorticidade a um nível de $1,3 \text{ s}^{-1}$ (SOUZA, 2005), (c) visualização experimental via PIV (SAKAKIBARA, 2004).

As simulações do jato em evolução temporal do presente trabalho foram utilizadas para a comparação com outros autores. Não foi possível fazer comparações quantitativas por falta de dados de referência para este tipo de escoamento. A Figura 5.33 apresenta a visualização do jato espacial simulado a número de Reynolds 1500 (SILVA e MÉTAIS, 2002) e a evolução temporal do jato natural simulado no presente trabalho também a Reynolds 1.600 sem a modelagem sub-malha.



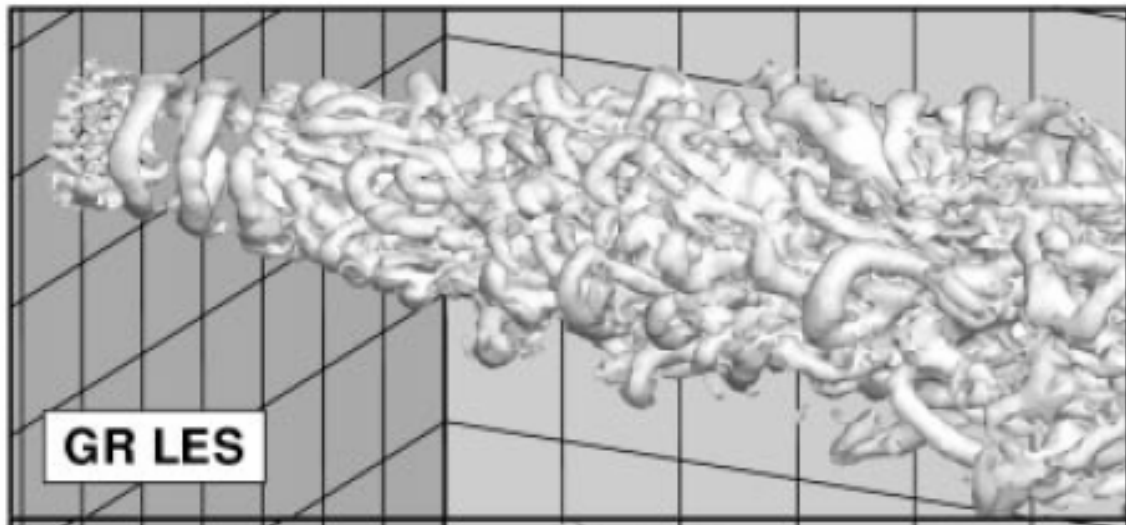
(a) Evolução Espacial do jato simulado por Silva e Métais (2002)



(b) Evolução temporal do jato simulado no presente trabalho

Figura 5.33 Isosuperfícies pelo critério Q para escoamento do jato em desenvolvimento espacial (SILVA e METAIS, 2002) e em desenvolvimento temporal (presente trabalho).

A Figura 5.33 mostra uma boa similaridade entre as estruturas apresentadas para os jatos em desenvolvimento espacial e temporal. No jato em desenvolvimento espacial, na medida em que o escoamento se desenvolve no espaço, estruturas turbulentas são formadas. No jato temporal as estruturas desenvolvem na medida em que o tempo de simulação transcorre. Desta forma as mesmas fases de evolução no desenvolvimento espacial e temporal do jato podem ser identificadas, onde as estruturas em diferentes posições do espaço (jato espacial) são semelhantes às encontradas no desenvolver do tempo (jato temporal). Este comportamento também pode ser verificado na Figura 5.34. Semelhanças podem ser identificadas em relação ao jato em desenvolvimento espacial simulado por Glaze e Frankel (2003).



(a) Evolução Espacial do jato simulado por Glaze e Frankel (2003)

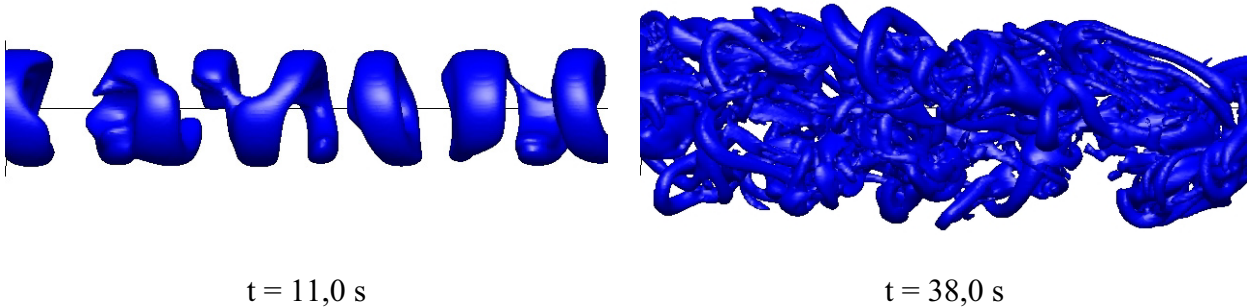


Figura 5.34 Isosuperfícies pelo critério Q para escoamento do jato em desenvolvimento espacial (GLAZE e FRANKEL, 2003) e em desenvolvimento temporal (presente trabalho).

De uma forma geral o código ESPC3D, mostrou-se eficiente para simular escoamentos do tipo jato temporal a Reynolds igual a 5.000, utilizando a modelagem sub-malha da turbulência. Embora tal código permita apenas a análise temporal do jato, foi possível verificar que as estruturas, obtidas nas simulações, são similares aos apresentados pelos jatos espaciais, conforme verificado também por outros autores (BASU e NARASHIMA, 1999; MATHEW e BASU, 2000) e jatos temporais (SOUZA, 2005). Embora não haja possibilidade de uma comparação quantitativa a dados experimentais, foi possível verificar a semelhança entre as estruturas presentes em jatos temporais e experimentais e identificar as fases de evolução do jato espacial em diferentes instantes da evolução do jato temporal.

Estruturas típicas do escoamento de jatos puderam ser evidenciadas: instabilidades primárias do tipo Kelvin-Helmholtz, vórtices toroidais, vórtices helicoidais, filamentos longitudinais, e ainda fenômenos tais como emparelhamento, transição, espalhamento em direções transversais, e transição para a turbulência desenvolvida.

CAPÍTULO VI

6 CONCLUSÕES

O trabalho apresentado teve como motivação a necessidade de capturar fenômenos 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 estudo mais amplo, focado no estudo de métodos de alta ordem de resolução em conjunto com LES para escoamentos a altos números de Reynolds.

O método pseudo-espectral de Fourier permite resolver EDPs com alta ordem de precisão. Em casos que a equação a ser resolvida é suave e têm condições de contorno periódicas a ordem de precisão do método fica limitada apenas pela precisão da máquina, como foi observado no caso da resolução dos vórtices em desenvolvimento temporal de Taylor-Green. A solução numérica, quando comparada com a solução analítica, apresentou erros da ordem de 10^{-7} , utilizando simples precisão.

Outra grande vantagem dessa metodologia é o baixo custo computacional, devido ao desacoplamento do termo da pressão, que nos casos de metodologias clássicas, é o ponto mais oneroso do algoritmo. 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.

Utilizando o método pseudo-espectral de Fourier desenvolveu-se um código computacional ESPC3D, com alta ordem de precisão para simulação de escoamentos do tipo jatos em desenvolvimento temporal em transição e/ou turbulentos. O código ESPC3D, mostrou-se eficiente para simular escoamentos do tipo jato temporal a Reynolds igual a 5.000, utilizando a modelagem sub-malha da turbulência.

Embora tal código permita apenas a análise temporal do jato, foi possível verificar que as estruturas, obtidas nas simulações utilizando o código ESPC3D, são similares aos apresentados pelos jatos espaciais, conforme verificado também por outros autores (BASU e NARASHIMA, 1999; MATHEW e BASU, 2000) e jatos temporais (Souza 2005). Embora não haja possibilidade de uma comparação quantitativa a dados experimentais, foi possível verificar a semelhança entre as estruturas presentes em jatos temporais e experimentais e identificar as fases de evolução do jato espacial em diferentes instantes da evolução do jato temporal.

Estruturas típicas do escoamento de jatos puderam ser evidenciadas: instabilidades primárias do tipo Kelvin-Helmholtz, vórtices toroidais, vórtices helicoidais, filamentos longitudinais, e ainda fenômenos tais como emparelhamento, transição, espalhamento em direções transversais, e transição para a turbulência desenvolvida.

Os espectros de energia permitiram verificar a proximidade da região inercial do jato à inclinação de $-5/3$, conforme apresentado pela literatura. A região de decaimento do jato também pôde ser identificada, apresentando acúmulo de energia nos casos em que a malha não foi suficiente para resolver todas as escalas do escoamento, ou o modelo de turbulência não foi capaz de promover, de forma eficiente, a troca de energia entre as escalas resolvidas e não resolvidas(escalas sub-malhas).

6.1 Perspectiva de trabalhos futuros

No futuro, visa-se simular escoamentos com aplicações práticas envolvendo escoamentos não periódicos. Para isso, faz-se necessária a otimização do código, implementando esquemas compactos de alta ordem na direção do escoamento, ou utilizando metodologias híbridas, como uso do método pseudo-espectral em conjunto com o método de fronteira imersa, o que permitirá a simulação de jatos em desenvolvimento espacial e a comparação mais exata com dados experimentais.

É também uma meta para trabalhos futuros a implementação de outros modelos de turbulência, bem como, a validação dos mesmos pela comparação com dados experimentais ou obtidos por DNS.

Objetiva-se ainda o uso do código desenvolvido para DNS de escoamentos homogêneos e isotrópicos, tendo em vista o desenvolvimento de modelos de turbulência. Será utilizada a técnica de testes à priori.

CAPÍTULO VII

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMOVICH, G.N. The turbulent jet in a moving fluid. **Library translation n° 28**, 1954.

ANTONIA, R.A.; BROWNE, L.W.A.; RAJAGOPALAN, S.; CHAMBERS, A. J. On the organised motion of a turbulent plane jet. **Journal of Fluid Mechanics**. 134, pp 49-66, 1983.

BARDINA et al, J.E. HUANG, P.G., COAKLEY, T.J., **Turbulence Modeling Validation, Testing and NASA Technical Memorandum 110446 Development NASA**, Ames Research Center, Moffett Field, California, 1997.

BOERSMA, B.J.; BRETHOUWER, G.; NIEUWSTADT, F.T.M. A numerical investigation on the effect of the inflow conditions on the self-similar region of a round jet. **Physics of Fluids**. 10, 4, 899-909, 1998.

BRANCHER, P. **Etude numérique des instabilités secondaires de jets**, 1996. Thèse de l'École polytechnique, Paris, France.

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

BROWN, B.G. On vortex motion in gaseous jets and the origin of their sensitivity to sound. **Physical Society**. 47, part 4, p. 703-733, 1935.

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).

COMTE, P.; LESIEUR, M.; LAMBALLAIS, E. Large-eddy and small-scale stirring of vorticity and passive scalar in a 3-D temporal mixing layer. **Physics in Fluids**. A, 4 (12), 2761-2778, 1992.

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.

CROW, S.C.; CHAMPAGNE, F.H. Orderly structure in jet turbulence. **Journal Fluid Mechanics**. 48, 547, 1971.

DANAILA, I.; BOERSMA, J. Direct numerical simulation of bifurcating jets. **Physics of Fluids**. vol.12, 1255, 2000.

DANAILA, I.; BOERSMA, J., Mode interaction in a forced homogeneous jet at low Reynolds numbers, Center for Turbulent Research, **Proceedings of the Summer Program** 1998, Stanford University.

DJERIDANTE, T., AMIELH, M.; FULACHIER, L., Velocity turbulence properties in the near-field region of axisymmetric variable density jets. **Physics of Fluids**. 8 (6): 1614-1630, 1996.

FERZIGER, J. H., 2001. **Numerical Simulation of Turbulence**. Colloquium of IAM-PIMS. Pacific Institute for the Mathematical Sciences, 2001.

FREUND, J.B. Noise sources in a low-Reynolds-number turbulent jet at Mach 0.9. **Journal of Fluid Mechanics**. vol. 438, pp 277-305, 2001.

GAMET, L.; ESTIVÉLEZES, J.L., Simulation numérique de jets isothermes et chauffés en régime transonique. Société française des thermiciens. **Journée d'études du 15 mars**, 1995.

GERMANO, M. A proposal for a redefinition of the turbulent stresses in filtered Navier-Stokes equations. **Physics of Fluids**. vol. 29 (7), p. 2323-2324, 1986.

GLAZE, D.J.; FRANKEL, S.H. Stochastic inlet conditions for large-eddy simulation of a fully turbulent jet. **AIAA Journal**. 41 (6), p.164-1073, 2003.

HENSHAW W. D. A fourth-order Accurate Method for the incompressible Navier-Stokes Equation on Overlapping Grids. **Journal of Computational Physics**. New York. v. 113, p. 13-25, 1993.

HILGERS, A. ;BOERSMA, B. Optimization of turbulent jet mixing. **Fluid Dyn. Research**. 29, 345, 2001.

HILGERS, A., Parameter optimizations in jet flow control, **Annual Research Briefs** -Center for Turbulence Research, Stanford University, Stanford,1999.

DANAILA, I.; BOERSMA, J., Mode interaction in a forced homogeneous jet at low Reynolds numbers, Center for Turbulent Research, **Proceedings of the Summer Program** 1998, Stanford University.

HUNT, J.C.R., WRAY, A.A., MOIN, P., 1988. Eddies, stream, and convergence zones in turbulent flows, **Annual Research Briefs** - Center for Turbulence Research, Stanford University, Stanford.

HUSSEIN, H.J., CAPP, S.P.; George, W.K. Velocity measurements in a high-Reynolds-number, momentum-conserving, axisymmetric, turbulent jet. **Journal of Fluid Mechanics**. 258, 31, 1994.

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**, Amsterdan. v. 5, p.177-208, 1989.

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

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

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

KOLMOGOROV, A. N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. **Dokl. Akad. Nauk. SSSR** 30, p. 741-773, 1941.

KOUMOUTSAKOS, P., FREUND, J.; Parekh, D., 1998, Evolution strategies for parameter optimization in jet flow control, **Center for Turbulent Research**, Proceedings of the Summer Program. Stanford University, Stanford.

KRAICHNAN, R. H., Eddy viscosity in two and three-dimensions, **Journal of the Atmospheric Sciences**, vol.33, p. 1521-1536, 1976.

LASHERAS, J.C., LECUONA, A., MEIBURG, E., MARTIN, J.E. ; RODRIGUEZ-AUMENTET, P. Vorticity Dynamics in the Near Field of Three-Dimensional Co flowing Forced Jets, *Bull. Am. Phys. Soc.* **36**, p. 2717, 1991.

LEE, M. ; REYNOLDS, W.C., 1985, Bifurcating and blooming jets at high Reynolds number, **5th Symposium on Turbulent Shear Flows**, New York, 1992.

LESIEUR, M., METAIS, O.; Comte, P. **Large-Eddy Simulations of Turbulence**. Cambridge University Press. First Published 2005.

LESIEUR, M. **Turbulence in Fluids**, Springer; 3rd rev p. 548,1997.

LESIER, M.; MÉTAIS, O. New trends in large-eddy simulations of turbulence. **Annual Review of Fluids Mechanics**, 28, p.45-82, 1996.

LIEPMANN, D.; M. GHARIB, (1992) The role of streamwise vorticity in the near-field entrainment of round jets, **Journal of Fluid Mechanics**, vol. 245, pp. 643-668.

LIGHTHILL, M.J. On sound generated aerodynamically. **Proc. R. Soc. Of London Ser. A**. 211, 564-587, 1952.

LILLY, D. K. **In lecture notes on turbulence**, edited bu J. R. Herring and J. C. McWilliams, p. 171-218, Worild Scientific, USA, 1987.

LING, W.; CHUNG, J.N., TROUTT, T.R.; CROWE, C.T. Direct numerical simulation of a three-dimensional temporal mixing layer with particle dispersion. **Journal of Fluid Mechanics**. 358, p. 61-85, 1998.

LIST, E.J. **Mixing in Inland and Coastal Waters**, Chap 9 (ed. H.B. Fisher et al). Academic Press, 1979.

LO, S.H., VOKE, P.R. ; ROCKLIFF, N.J. Three-Dimensional Vortices of a Spatially Developing Plane Jet, **International Journal of Fluid Dynamics**, Vol.4, Article 1, 2000.

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

MARTIN, J.E. ; MEIBURG, E. Numerical investigation of three-dimensionally evolving jets subject to axisymmetric and azimuthal perturbations. **Journal of Fluid Mechanics**. 230, p. 271-318, 1991.

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.

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.

MATHEW, J.; BASU, A.J. An economical method for direct numerical simulation studies of transitional round jets. **Computers & Fluids.** 543-554, 2001.

MELANDER, M.V., HUSSAIN, F.; BASU, A.J. Breakdown of a circular jet into turbulence. **In Proc. Eight Symp. On Turbulent Shear Flows**, p. 15-51, 1991.

MICHALKE, A. ; HERMANN, G., On the inviscid instability of a circular jet with external flow, **Journal of Fluid Mechanics**, 114, 343-359, 1982.

MONIN, A.S.; YAGLOM, A.M. **Statistical Fluid Mechanics**, Mechanics of Turbulence, vol.1, MIT Press, Cambridge, MA, 1971

MONKEWITZ, P.A.; PFIZENMAIER, E. Mixing by 'side jets' in strongly forced and self-excited round jets. **Physics of Fluids.** 3, 2, p. 1356-1361, 1991.

MORRIS, P. The spatial viscous instability of axisymmetric jets, **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 77, p. 511-529, 1976.

MUCHALKE, A.; HERMANN, G. On the inviscid instability of a circular jet with external flow. **Journal of Fluid Mechanics.** Vol. 114, p. 343-359, 1982.

OLER, J.W. & GOLDSCHMIDT, V.W. A vortex-street model of the flow in the similarity region of a two-dimensional, free turbulent jet. **Journal of Fluid Mechanics.** 118, 241-268, 1982.

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

PANCHAPAKESAN, N.R. ; LUMLEY, J.L., Turbulence measurements in axisymmetric jets of air and helium. Part2. Helium jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 246, p. 225-247, 1993.

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

POPE, S. B. **Turbulent Flows**. 1st ed. New York: Cambridge University Press, 2000, 771p.

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.

REYNOLDS, O., 1894, On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion, **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, Vol. 186, Part I, p.122-164.

RIBAUT, C. L. Large Eddy Simulation of plane jet. **Physics of Fluids**. Vol. 11, n. 10, p. 3069-3083, 1999.

RODI, W., 1975, A new method of analyzing hot-wire signals in highly turbulent flow and its evaluation in a round jet. DISA Information 17, Feb, 1975.

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

SAKAKIBARA, J., HISHIDA, K.; PHILLIPS, W.R.C. On the vortical structure in a impinging jet. *Journal of Fluid Mechanics*. 434, p.273-300, 2000.

SMAGORINSKY, J. General Circulation Experiments with Primitive Equations, *Monthly Weather Rev.*, vol. 91, p. 99-164, 1963.

SILVA, C.B., A. **The role of coherent structures in the control and interscale interactions of round, plane e coaxial jet**. 2001. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Intitut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France.

SILVA, C.B.; MÉTAIS, O, Vortex control of bifurcating jets: A numerical study. **Physics of Fluids**, Vol. 14. , n. 11, p. 3798-3818, 2002.

SILVA, C.B.; Pereira J. C. F. The effect of subgrid-scale models on the vortices computed from large-eddy simulations. **Physics of Fluids**, Vol. 16. , n. 12, p. 4506-4534, 2004.

SILVEIRA NETO, A. ; MANSUR, S. S. ; SILVESTRINI, J. H. Equações da turbulência: média versus filtragem In III Escola Brasileira de Transição e Turbulência - ETT, 2002, Florianópolis. **Anais da III Escola Brasileira de Transição e Turbulência**. p. 1-7.

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.

SILVEIRA-NETO, A., Grand, D., Métais, O. and Lesier, M. A numerical investigation of the coherent structures of turbulence behind a backward-facing step. **Int. Journal of Fluid Mechanics**, 256, p. 1-25, 1993.

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 MG, Brasil.

SPODE, C., 2006. **Simulação de Grandes Escalas e Simulação Híbrida RANS/LES do escoamento sobre o degrau com condições de contorno turbulentas**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

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

TAKAHASHI, D. A Fast Fourier Transform Package. 2005 disponível em <<http://www.ffte.jp/>> Acesso em: 2 agosto.2005.

TAULBEE, D.B. **Engineering turbulence models**. In Advances in Turbulence (ed. W.K. George ; R.E.A. Arndt).Hemisphere, 1988.

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

TOLLMIEEN, W. Berechnung Turbulenter Ausbreitungsvorgänge, Z. angew Math Mech. 6, 1926.

TOWNSEND, A.A. **The Structure of Turbulent Shear Flow** Cambridge University Press, 1926.

URBIN, G.; MÉTAIS, O. 1997, Large-eddy simulations of three-dimensional spatially-developing round jets, in **Direct and Large-Eddy Simulations II**, edited by Chollet, J.P.; Voke, P.R.; and Kleiser, L. (Kluwer Academic, New York).

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, MG, Brasil.

VERZICCO, R.; ORLANDI, P. A Finite-Difference Scheme for Three-Dimensional Incompressible Flows in Cylindrical Coordinates. **Journal of Computational Physics**. Vol. 123, p. 402-414, 1996.

VILLERMAUX, E., HOPFINGER, E. 1994, **Self-sustained oscillations on a confined jet: a case study for the non-linear delayed saturation model**, Physical D, 72.

ZAMAN, K.B.M.Q.; HUSSAIN, A.K.M.F. Vortex pairing in circular jet under controlled excitation. Part 1. General jet response, **Journal of Fluid Mechanics** 101, 449, 1980.

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.

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.

WILCOX, D. C. **Turbulence Modeling for CFD**, DCW Industries, California, 2000.

WIGNANSKI, I.; FIDLER, H.E. **The Structure of Turbulent Shear Flows**, 2nd ed. Cambridge University Press, 1969.

WHITE, F.M. **Viscous Fluid Flow**. McGraw-Hill, 1991.