

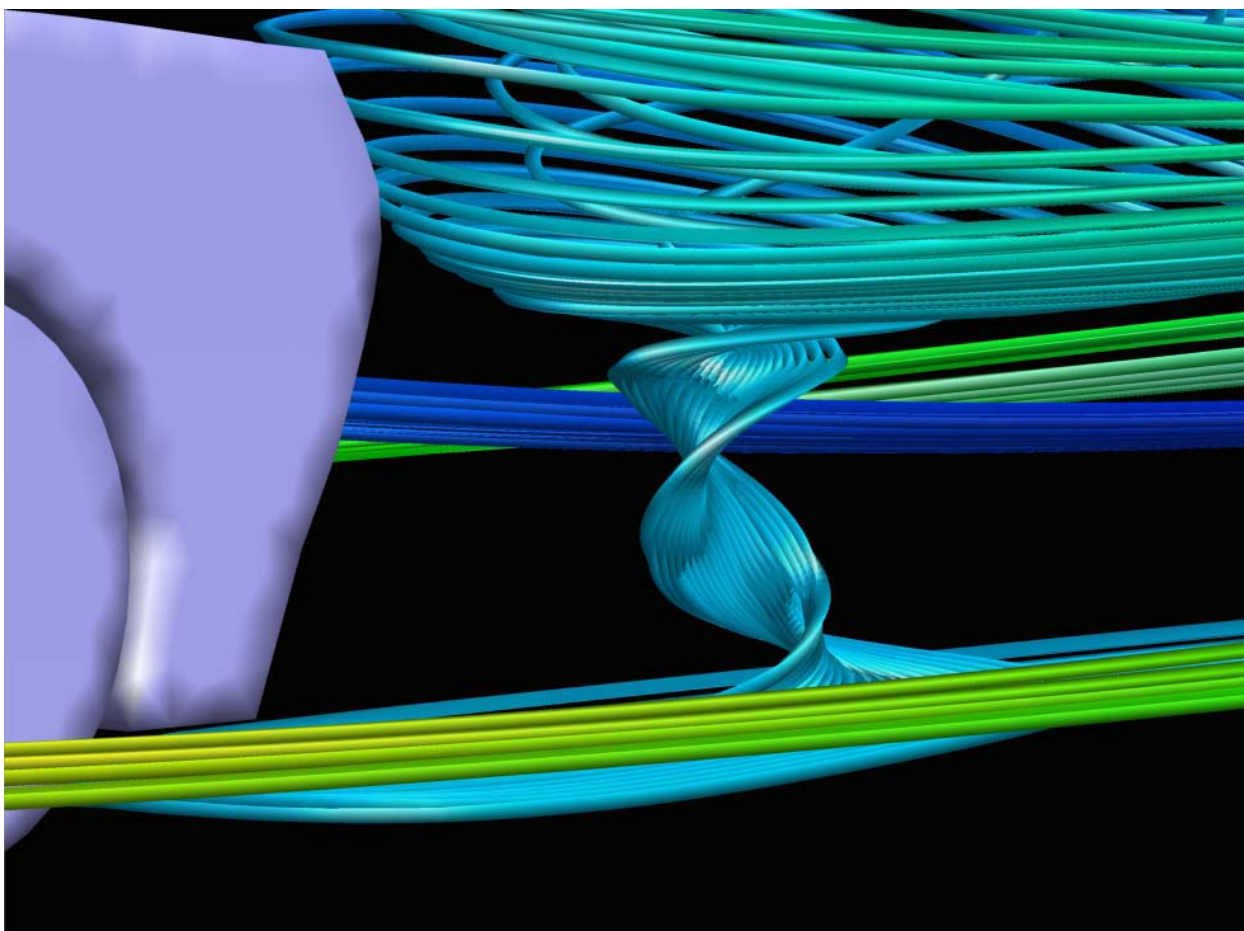
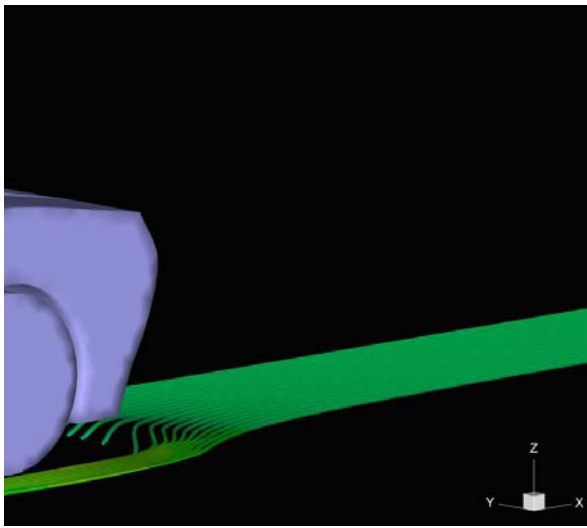
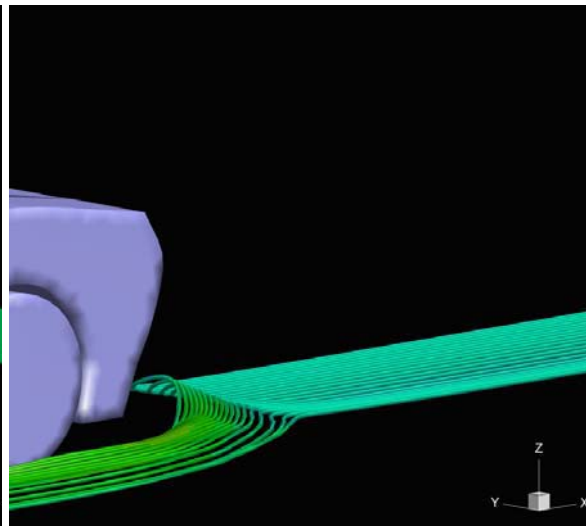


Figura 7.50 - Detalhe do início de uma estrutura helicoidal a jusante do protótipo de automóvel, $t = 2,6$ s.

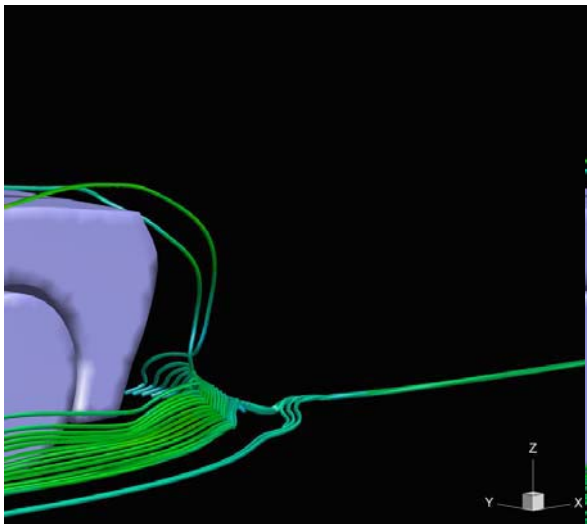
A Figura 7.51 mostra a evolução temporal do vórtice mostrado na Figura 7.50. É possível notar naquela figura, estágios como o surgimento, desenvolvimento e as estruturas turbilhonares sendo transportadas pelo escoamento.



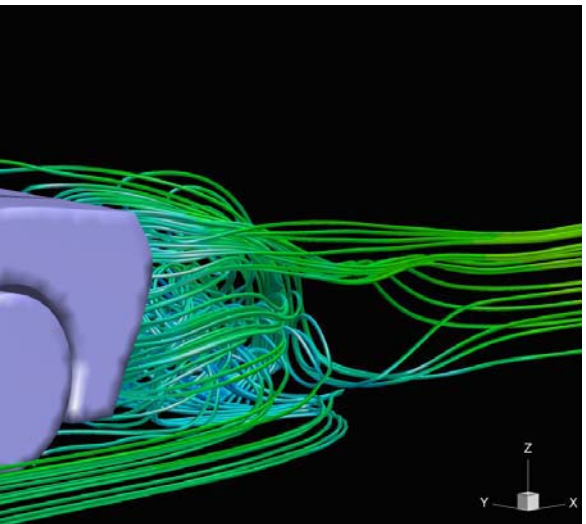
(a)



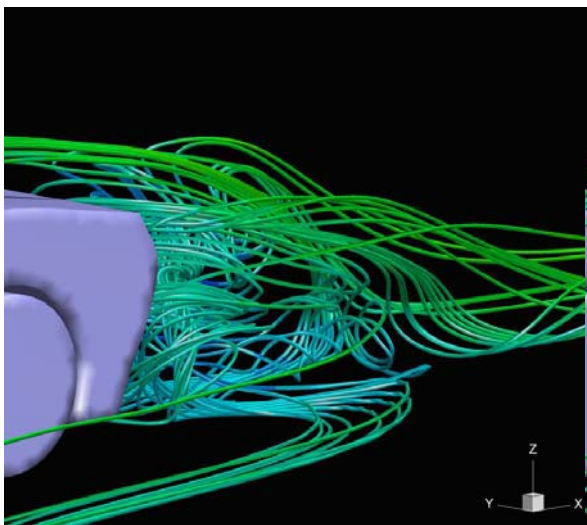
(b)



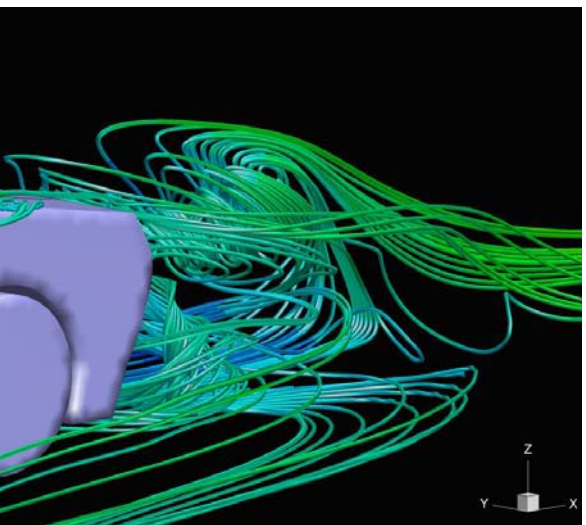
(c)



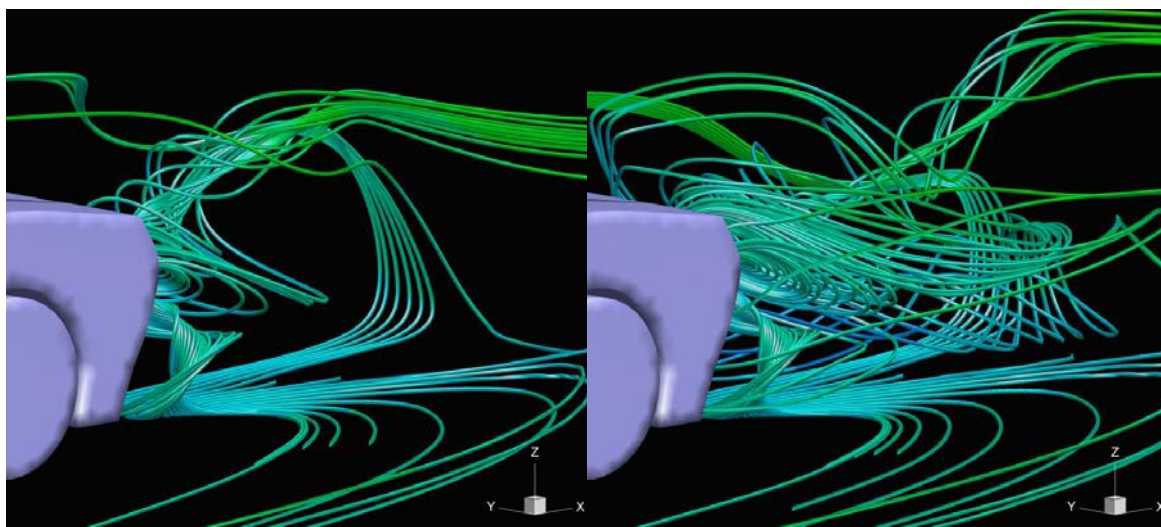
(d)



(e)

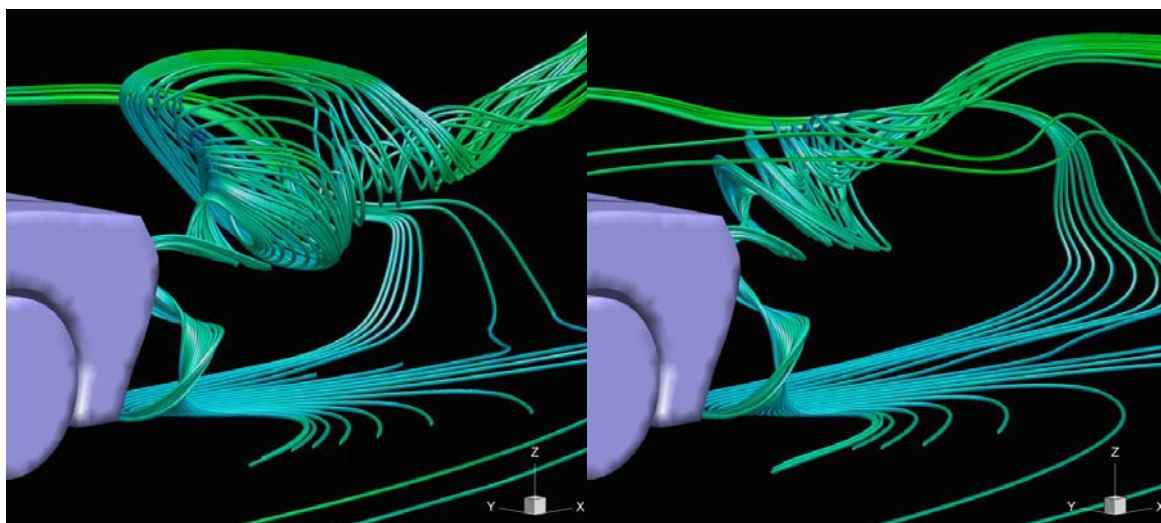


(f)



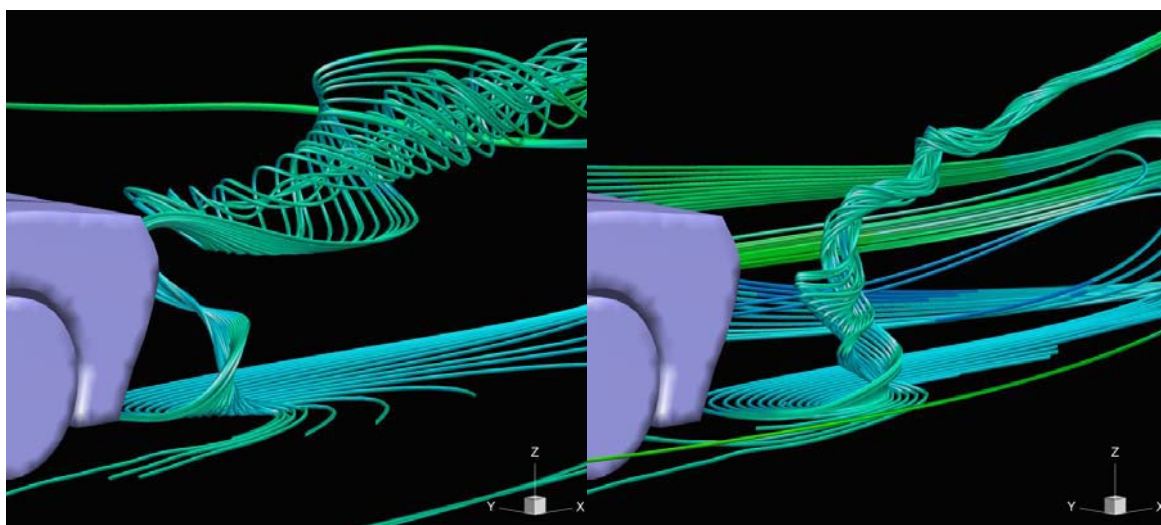
(g)

(h)



(i)

(j)



(k)

(l)

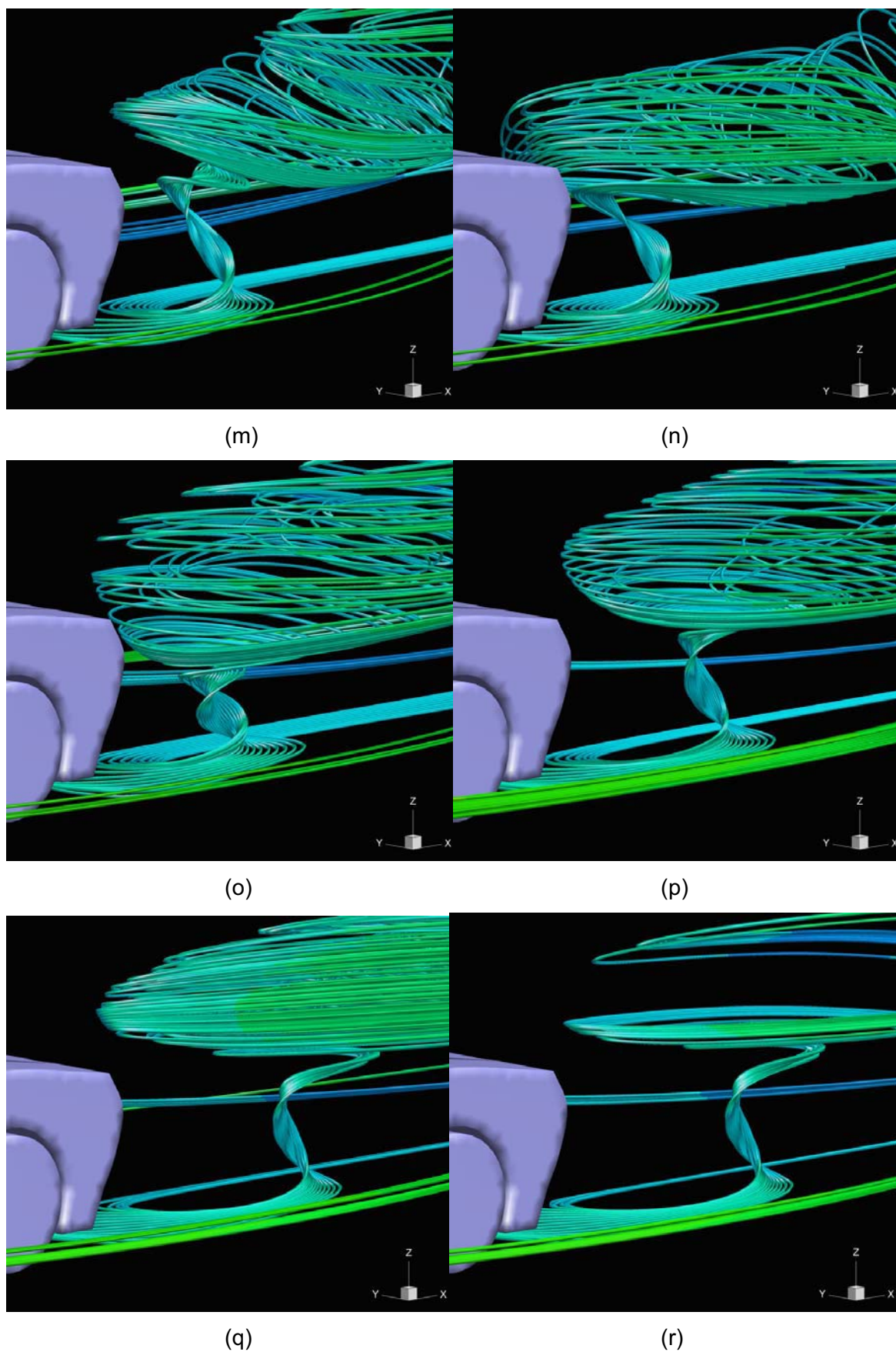


Figura 7.51 – Evolução de uma estrutura turbilhonar a jusante do protótipo de automóvel.

Os estágios de evolução das linhas de corrente da Figura 7.51, são para os seguintes tempos físicos (de cima para baixo): (a) $t=0,02s$, (b) $t=0,075s$, (c) $t=0,1s$, (d) $t=0,2s$, (e) $t=0,3s$, (f) $t=0,6s$, (g) $t=0,7s$, (h) $t=0,8s$, (i) $t=1,0s$, (j) $t=1,25s$, (k) $t=1,5s$, (l) $t=1,75s$, (m) $t=2,0s$, (n) $t=2,75s$, (o) $t=3,25s$, (p) $t=3,75s$, (q) $t=4,5s$, (r) $t=4,75s$.

7.2.5 Escoamento sobre um protótipo de aeronave

Nesta seção serão apresentados resultados qualitativos para o escoamento sobre um protótipo de aeronave. O protótipo teve suas características gerais baseadas no jato executivo Legacy, de fabricação da Embraer, assim como o protótipo da seção anterior. Mais detalhes sobre a geração do protótipo da aeronave pode ser encontrada em Oliveira (2007). A malha de elementos triangulares que representam o protótipo pode ser visualizada na Figura 7.52.

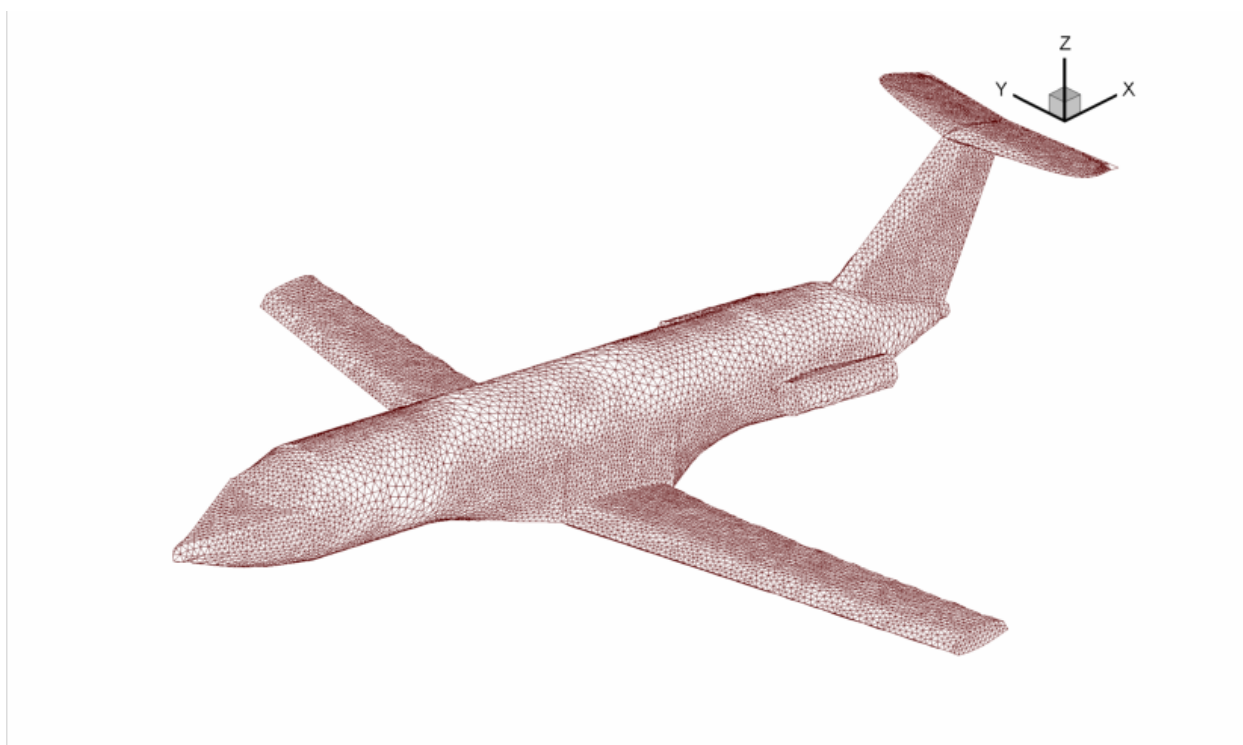


Figura 7.52 - Malha de elementos triangulares do protótipo de aeronave (OLIVEIRA, 2007).

A malha mostrada na Figura 7.52, possui 21.854 nós e 43.702 elementos. O domínio euleriano possui dimensões tais que na direção x, a montante tem-se 1,5 vezes o comprimento

da aeronave, e a jusante, 5 vezes o comprimento. Na direção y , em ambas as laterais, tem-se 1,5 vezes a largura do protótipo e na direção z , tem-se uma altura 2,5 vezes a altura do protótipo. A malha euleriana é composta por $227 \times 150 \times 74$ volumes, totalizando aproximadamente 2.420.000 volumes, subdivididos em quatro processadores. Como condições de contorno do domínio euleriano têm-se superfícies livres em $z=0$, $z=z_{\max}$, $y=0$ e $y=y_{\max}$. O perfil de velocidades na entrada é uniforme com $u=U_{\infty}$, $v=w=0$. O número de Reynolds foi de 500, baseado na envergadura (distância entre as pontas das asas) do objeto imerso.

Uma vez que um dos objetivos deste trabalho é verificar a capacidade de importação de geometrias complexas, não houve ainda uma preocupação de se simular o protótipo da aeronave à altíssimos números de Reynolds, ou realizar a simulação em domínios com razões de aspecto muito grandes. Desta forma os resultados mostrados nesta seção são apenas qualitativos. Como já comentado anteriormente, é necessário que o tamanho característico de cada malha lagrangiana seja aproximadamente igual ao tamanho da malha euleriana na região, isto porque se a disparidade entre os tamanhos característicos das malhas lagrangiana e euleriana forem muito altas, podem ocorrer problemas como perfuração de linhas de corrente (indicando que a densidade de força gerada pela fronteira imersa não foi o suficiente para “afastar” o fluido da região da fronteira). Pode haver um aumento no coeficiente de arrasto, por exemplo, devido ao fato de a fronteira imersa ter gerado uma força maior que a força fisicamente correta.

A Figura 7.53 mostra algumas linhas de corrente posicionadas sobre o protótipo da aeronave. Nota-se que apesar do domínio escolhido não ser totalmente adequado (o tamanho característico da malha euleriana na região da fronteira imersa é duas vezes maior que o tamanho característico da malha lagrangiana), o código convergiu e mostrou resultados fisicamente consistentes.

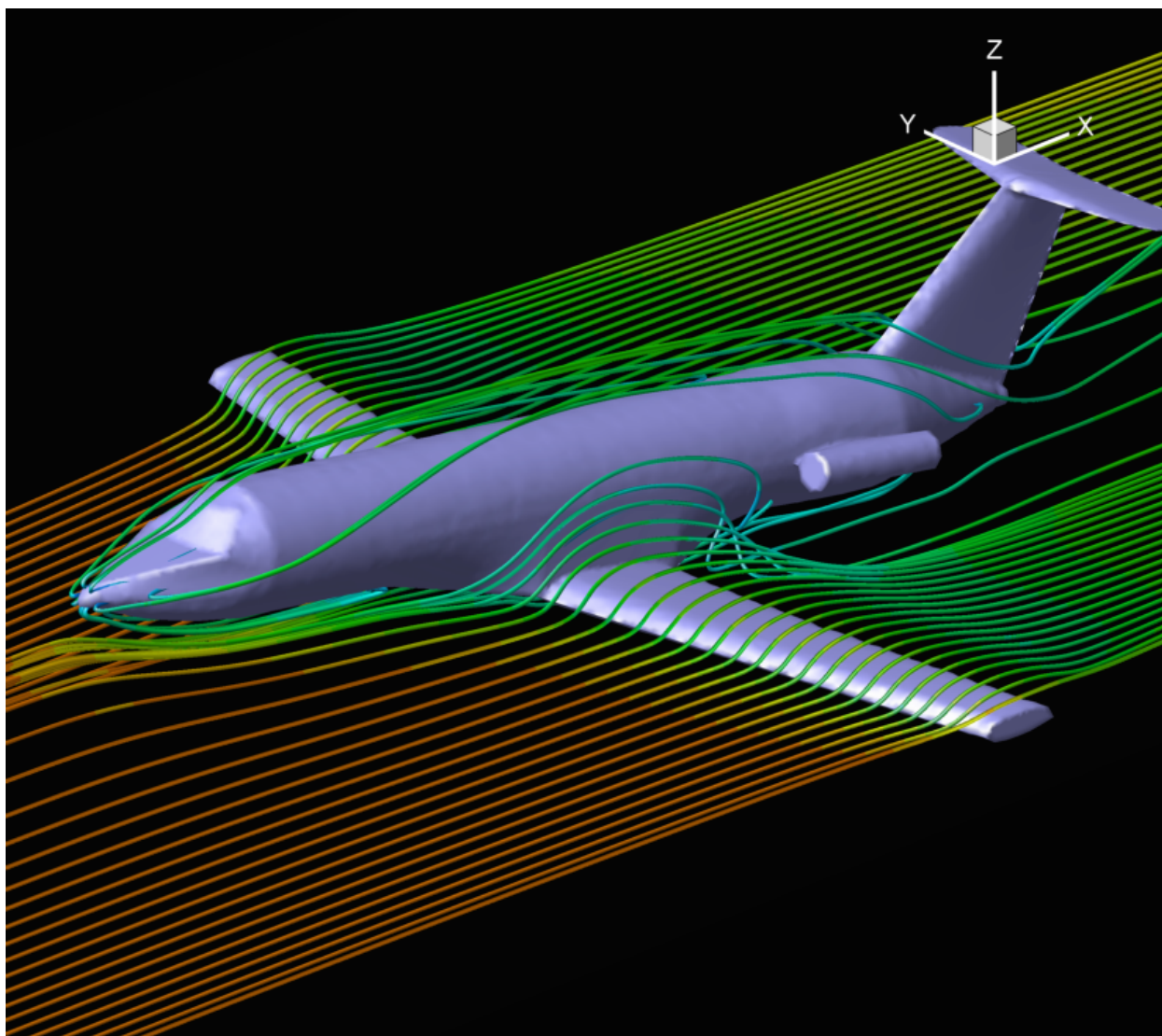


Figura 7.53 - Linhas de corrente indicando padrão de escoamento sobre o protótipo de aeronave, para $t = 0,6$ s.

A Figura 7.54 mostra uma visão lateral do escoamento mostrado na Figura 7.53.

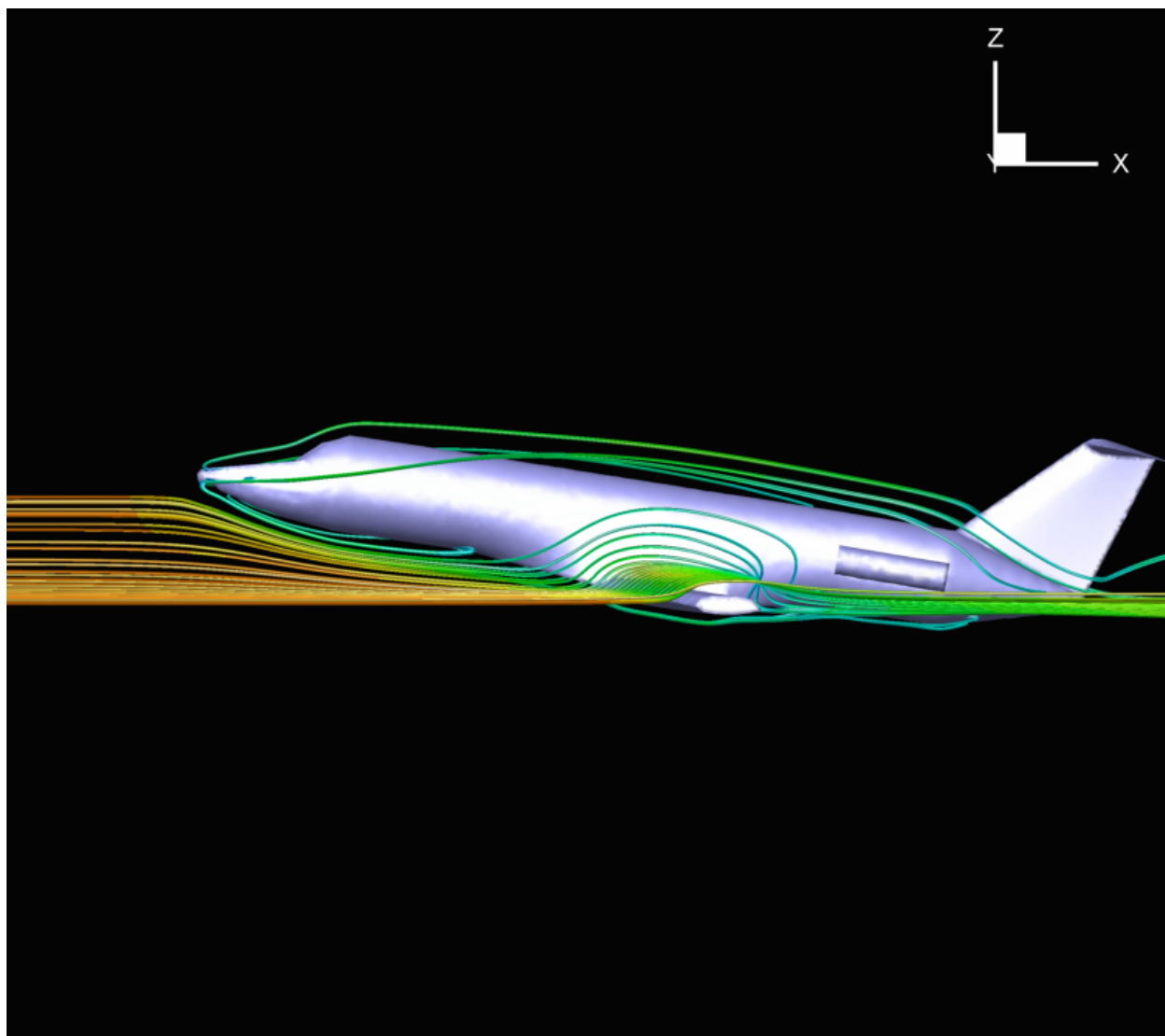


Figura 7.54 - Vista lateral da Figura 7.53.

CAPÍTULO VIII

8 Conclusões e Perspectivas

No presente trabalho, foram apresentadas as mudanças realizadas no código Fluids-3D, desenvolvido no LTCM, de forma a torná-lo uma ferramenta numérica capaz de, sem grandes dificuldades, simular o escoamento sobre qualquer tipo de geometria complexa, em números de Reynolds baixos a moderados. O método da fronteira imersa, baseado no Modelo físico virtual, possibilitaram resultados consistentes. Mostraram-se robustos e confiáveis o bastante nas diversas simulações, nos diversos tipos de geometrias simuladas. Além disto a facilidade da geração de malhas (tanto as malhas eulerianas quanto lagrangianas) foi significativa. O *set-up* de uma simulação, considerando uma geometria como a do protótipo de automóvel, ou do protótipo de aeronave, seria computacionalmente bem mais caro e complicado se fossem utilizadas malhas não-estruturadas. Mesmo a implementação do *solver* seria muito mais complicada.

Com o intuito de facilitar o *set-up* de novas simulações, várias mudanças foram feitas no código fonte do programa Fluids-3D. Estas mudanças foram feitas de tal forma que não fossem necessárias re-compilações para cada nova simulação. Isto é particularmente importante, pois desta maneira, o código está apto a receber uma interface gráfica de usuário, além de minimizar a probabilidade de inserção de erros no código – fonte do programa. Uma outra realização importante foi a implementação de uma sub-rotina de leitura e importação de arquivos **.stl*. A importação deste tipo de arquivo significa uma liberdade maior, por parte do usuário, de criação de novas geometrias a serem simuladas, isto porque, estão disponíveis na Internet diversos softwares livres para criação e modificação deste tipo de arquivo (Oliveira, 2007).

Nas várias simulações realizadas, detalhes físicos dos escoamentos puderam ser vistos, mostrando que o código Fluids-3D, pode ser considerado uma ferramenta confiável de simulação de escoamentos sobre geometrias e com um custo computacional competitivo se comparado com códigos comerciais.

Como perspectivas para novos trabalhos, pode-se citar:

- Continuar o trabalho de implementação da modelagem da turbulência aplicada a escoamentos ao redor de geometrias imersas, a Reynolds elevados. Três modelos de

turbulência já estão implementados no código Fluids-3D, mas carecem de testes de validação;

- Estender a metodologia de paralelização também ao domínio lagrangiano, de forma a se ganhar maior autonomia no uso do *cluster*;
- Avaliar a possibilidade de implementar malhas adaptativas e particionamento do domínio de forma a otimizar o balanceamento de carga no *cluster*;
- Avaliar a possibilidade e necessidade do uso da topologia tridimensional de paralelização em simulações de casos que exijam uma razão de aspecto alta;
- Promover mudanças no código, de forma a este possuir a capacidade de simulação de escoamentos com densidade variável - escoamentos compressíveis.

CAPÍTULO IX

9 Referências Bibliográficas

Arruda, J., 2004, “Modelagem Matemática de Escoamentos Internos Forçados utilizando o Método da fronteira imersa e o Modelo físico virtual”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia.

Arruda, J., Lima e Silva, A., Roma, A. e Silveira-Neto., A., 2004, “Simulação Numérica de Escoamentos sobre Cavidades Abertas Rasas utilizando o Método da fronteira imersa”, In Proceedings of the 12th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering – ENCIT.

Campregher, R., 2005, “Modelagem Matemática Tridimensional Para Problemas de Iteração Fluido-Estrutura”. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia.

Craft, T.J.; Gerasimov, A.V.; Launder, B.E.; Robinson C.M.E., 2006; “A computational study of the near-field generation and decay of wingtip vortices”. International Journal of Heat and Fluid Flow.

Ferziger, J. e Peric, M, 2002, Computational Methods for Fluid Dynamics 3rd Ed. Springer Verlag, New York, USA.

Fortuna, A.O., 2000, “Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos”, Edusp.

Flynn, M.J., 1966, “Very high-speed computing systems”, Proc. IEEE 54 (12), 1901-1909.

Glowinski, R., Pan, T. e Périaux, J., 1998, « Distributed Lagrange multiplier methods for incompressible viscous flow around moving rigid bodies”, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 151, 181-194.

Griffith, B. e Peskin, C., 2005, “On the order of accuracy of the immersed boundary method: Higher order convergence rates for sufficiently smooth problems.”, Journal of Computational Physics 208, 75-105.

Gropp, W., Lusk, E., Thakur, R., 1999, "Using MPI-2 - Advanced Features of the Message-Passing Interface", Massachusetts Institute of Technology.

Gustafson, J., 1988, "Reevaluating Amdahl's Law", Communications of ACM, May, 1988, Volume 31, No 5.

Hwang, J., Yang, K., 2004, "Numerical study of vertical structures around a wall-mounted cubic obstacle in channel flow", Physics of Fluids, Vol. 16, No. 7, 2382-2394.

Jeong, J. e Hussain, F., 1995, "On the identification of a vortex", Journal of Fluid Mechanics 285,69-94.

Kim, J., Kim, D. e Choi, H., 2001, "An immersed-boundary Finite-Volume method for simulations of flow in complex geometries", Journal of Computational Physics 171, 132-150.

Lai, M., 1998, "Simulations of the flow past an array of circular cylinders as a test of the Immersed Boundary Method", PhD Dissertation, New York University.

Lima e Silva, A. L. F., 2002, "Desenvolvimento e implementação de uma nova metodologia para modelagem de escoamentos sobre geometrias complexas: método da fronteira imersa como Modelo físico virtual", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

Lima e Silva, A. L. F., Silveira-Neto, A. e Damasceno, J., 2003, "Numerical simulation of twodimensional flows over a circular cylinder using the immersed boundary method", Journal of Computational Physics 189, 351-370.

Lima e Silva, A. L. F., Silva, A. R. e Silveira-Neto, A., 2005, "Numerical simulation of twodimensional complex flows over bluff bodies using the immersed boundary method", Aceito para publicação no Journal of Fluid and Structures.

Mariano, F. P., 2007, "Simulação de escoamentos não periódicos utilizando a metodologia pseudo-espectral de Fourier acoplado com o método da fronteira imersa", Dissertação em redação, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Mariano, F. P., Moreira, L. Q. e Silveira Neto, A., 2006, "Resolução de escoamentos não periódicos utilizando métodos pseudo-espectrais e o método da fronteira imersa", 16° Posmec.

Marinho, W., Campregher, R., e Silveira-Neto, A., 2004, "Three-dimensional heat transfer simulation as a benchmark for an in-house Beowulf-class cluster", In Proceedings of the 10th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering – ENCIT.

Mohd-Yusof, J., 1997, "Combined immersed boundaries/B-splines methods for simulations of flows in complex geometries", In CTR Annual Research Briefs, NASA Ames/Stanford University.

Muzaferija, S., Peric, M., 1997, "Computational of free-surface flows using the Finite-Volume method and moving grids", Numerical Heat Transfer, Part B 32, 369-384.

Padilla, E. L.M., 2007, "Aplicações de simulação numérica para análise de escoamentos transicionais em canais cilíndrico-anulares com excentricidade variável", Relatório técnico de convênio FEMEC – PETROBRAS. (Projeto No: 005000007895.04.3)

Patankar, S., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Publishing Corporation, New York, USA.

Peskin, C., 1972, "Flow patterns around heart valves: A numerical method", Journal of Computational Physics 10, 252-271

Peskin, C., 1977, "Numerical analysis of blood flow in the heart", Journal of Computational Physics 25, 220-252.

Pitanga, M, 2002, "Construindo supercomputadores com Linux", Brasport.

Oliveira, J. E. S., 2006, "Método de Fronteira Imersa Aplicado à Modelagem Matemática e Simulação Numérica de Escoamentos Turbulentos sobre Geometrias Móveis e Deformáveis", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia.

Oliveira, G. P., 2007, "Desenvolvimento de interface gráfica para o solver de dinâmica dos fluids computacional Fluids-3D", Dissertação em redação, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Oliveira, J., Lima e Silva, A., Guimarães, G. e Silveira-Neto, A., 2004, "Simulação numérica do escoamento a baixo Reynolds sobre o cilindro de diâmetro variável usando MFI/MFV", In Proceedings of the 10th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering.

Oliveira, J., Lima e Silva, A., Souza, F., Guimarães, G. e Silveira-Neto, A., 2004, "Comparative analysis between different methodologies of turbulence modeling: URANS, DES e LES", In 4º Escola de Primavera de Transição e Turbulência.

Rhie, C e Chow, W., 1983, "Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation", AIAA Journal, 21(11), 1525-1532.

Roma, A., Peskin, C. e Berger, M., 1999, "An adaptive version of the immersed boundary method", Journal of Computational Physics 153, 509-534.

Saha, A. K., 2004, "Three-dimensional numerical simulation of the transition of flow past a cube", Physics of Fluids, Vol. 16, No. 5, 1630-1646.

Silva, A. R., 2004, "Simulação Numérica de Escoamentos em Transição sobre Cilindros Imersos", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

Van Doormal, J. e Raithby, G., 1984, "Enhancements of the simple method for predicting incompressible fluid flows", Numerical Heat Transfer 7, 147-163.

Vedovoto, J.M., Campregheer, R, Silveira Neto, A., 2006, "Mathematical modeling and numerical simulation of a three-dimensional flow over complex geometries using the immersed boundary method", In proceedings of 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering – ENCIT.

Versteeg, H. e Malalasekera, W., 1995, "An introduction to computational fluid dynamics", Prentice Hall.

Vilaça, A., Oliveira, O., Lima e Silva, A. e Silveira-Neto, A., 2004, "Modelagem matemática e simulação numérica do escoamento sobre uma partícula em queda livre", Submetido ao XXXI ENEMP – Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados.

Unverdi, S. e Tryggvason, G., 1992, "A front-tracking method for viscous, incompressible, multifluid flows", *Journal of Computational Physics* 100, 25-37.

Winkelmann, R., Hauser, J., Williams, R., 1999, "Strategies for parallel and numerical scalability of CFD codes", *Computational. Methods Applied. Mechanical. Engineering*, 174, 433 456.

Yu, Z., 2005, "A DLM/FD method for fluid/flexible-body interactions", *Journal of Computational Physics* 207, 1-27.