

Desenvolvimento de Modelagem Matemática para Análise de Escoamentos Bifásicos em Dispositivos Distribuidores de Líquidos e em Torres de Destilação

Aristeu da Silveira Neto, FEMEC-UFU

Coordenador

Alexandre Megiorin Roma, IME-USP

Vice-coordenador

1 – Resumo

O grupo de pesquisa em Dinâmica dos Fluidos Computacional do Laboratório de Transferência de Calor e Massa e Dinâmica dos Fluidos (LTCM), FEM-UFU, tem atuado, nos últimos 15 anos, na linha de pesquisa de Modelagem Matemática de Escoamentos Turbulentos Monofásicos e Bifásicos. As duas maiores ênfases têm sido voltadas para a modelagem da turbulência e para a modelagem detalhada de escoamentos bifásicos. Em relação à modelagem de escoamentos bifásicos o LTCM tem, de longa data, se dedicado ao desenvolvimento de “métodos de acompanhamento de interface” (*front-tracking methods*). Em sua busca por uma metodologia computacionalmente eficiente e de alta acurácia, quesitos fundamentais na análise fina de escoamentos turbulentos bifásicos, o grupo tem se dedicado, mais recentemente, ao desenvolvimento de métodos híbridos adaptativos empregando simultaneamente técnicas tipicamente utilizadas em “métodos de curva de nível” (*level set methods*) e em “refinamento adaptativo de malhas” (*Adaptive Mesh Refinement - AMR*). Em colaboração com o grupo de CFD do IME-USP, o desenvolvimento desta linha híbrida tem enorme potencial para aplicações na modelagem e na simulação numérica de escoamentos bifásicos fluido-fluido e fluido-sólido de forma refinada o que, certamente, permitirá a estimativa de informações físicas de difícil acesso experimental. Dentre as aplicações em desenvolvimento, destacam-se a modelagem e a simulação do processo de transporte, deformação e fragmentação de interfaces. Neste contexto, a modelagem matemática, a simulação numérica, a análise de estabilidade de cortinas de fluido e a formação de gotas colocam-se como possíveis aplicações. Este é um dentre três projetos na área de dinâmica de escoamentos bifásicos que estão sendo propostos prevendo execução simultânea e colaboração com o grupo de CFD do IME-USP.

2 – Equipe Executora

- Prof. Aristeu da Silveira Neto, Dr. Ing. – Coordenador, LTCM / FEM-UFU.
- Prof. Alexandre Megiorin Roma, Ph.D. – Coordenador, IME-USP.
- Márcio Pivello – Executor
- Dra. Millena Martins Villar – Executora.
- Dra. Dra. Ana Lúcia Fernandes de Lima e Silva – Executora.
- Aluno de Mestrado a ser recrutado – Participante.

3 – Objetivos

Visando a análise detalhada da dinâmica e da estabilidade de cortinas de líquido e sua quebra em gotas, será dada continuidade às investigações de modelos matemáticos, de metodologias numéricas e de técnicas computacionais necessários ao desenvolvimento de códigos computacionais para simular de maneira eficiente escoamentos incompressíveis bifásicos.

Os pontos de partida serão os códigos computacionais para tais escoamentos em duas e em três dimensões desenvolvidos conjuntamente no LTCM, FEM-UFU, e no IME-USP. Tais códigos empregam a formulação matemática baseada em variáveis primitivas (velocidade e pressão) cuja discretização espacial é realizada em malhas cartesianas bloco-estruturadas contendo refinamento adaptativo. O uso desse tipo de discretização espacial permite incrementar a acurácia da solução numérica em regiões do escoamento de especial interesse (e.g. ao redor de interfaces, em regiões de alta vorticidade e/ou turbulência).

Um primeiro objetivo central é o de estender o código bidimensional serial atual de maneira a conferir-lhe características que possibilitem obter uma ferramenta numérica para analisar escoamentos do tipo cortina de líquido e estudar a dinâmica que leva à fragmentação da interface. Pretende-se comparar, quando possível, os resultados numéricos bidimensionais com resultados experimentais obtidos em laboratório e/ou com resultados encontrados na literatura.

Um segundo objetivo central é o avanço no desenvolvimento de um código tridimensional serial. Para isto, partir-se-á de códigos computacionais existentes ou em desenvolvimento no LTCM, FEM-UFU, e no IME-USP. Mais especificamente, partir-se-á de: (i) um código que resolve as equações de Navier-Stokes em malhas tridimensionais com refinamento adaptativo e (ii) de um código serial que integra as equações do movimento dos pontos lagrangianos que discretizam as interfaces de

separação entre as fases e que tem implementada uma função indicadora de fluidos, componente responsável por discernir as duas fases entre si.

Um aspecto especialmente relevante à PETROBRAS - e que merece ser destacado - é que se pretende, durante o estudo da formação de cortinas de líquido, estudar quais são as condições fluidodinâmicas que antecedem a formação de gotículas, imediatamente antes de seu desprendimento.

Tais objetivos serão alcançados por intermédio do cumprimento de várias etapas as quais estão detalhadas mais adiante.

4 – Justificativa

O processo de quebra de um jato líquido em gotas é freqüente em problemas de engenharia, tais como escoamentos em dispositivos distribuidores de líquidos e em torres de destilação que aparecem em processos na indústria de refino de petróleo.

A Figura 4.1 ilustra a colisão de um jato contra uma placa cônica, e sua fragmentação em gotas.

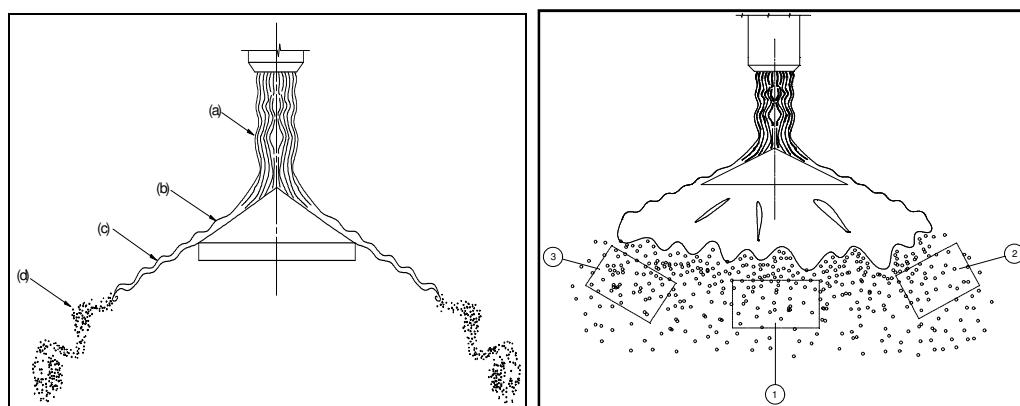


Figura 4.1: Sistema de aspersão jato-placa usado por Tarqui (1996): (a) jato de água; (b) filme líquido sobre a placa defletora; (c) filme líquido livre; (d) frente instável de gotas.

A Figura 4.2 mostra uma fotografia rápida feita por Tarqui (1996), no LTCM. Pode-se perceber a complexidade do processo físico de formação das gotas. Observa-se que no presente trabalho não se objetiva a simulação do processo completo e sim, a formação das instabilidades que dão origem às gotas.

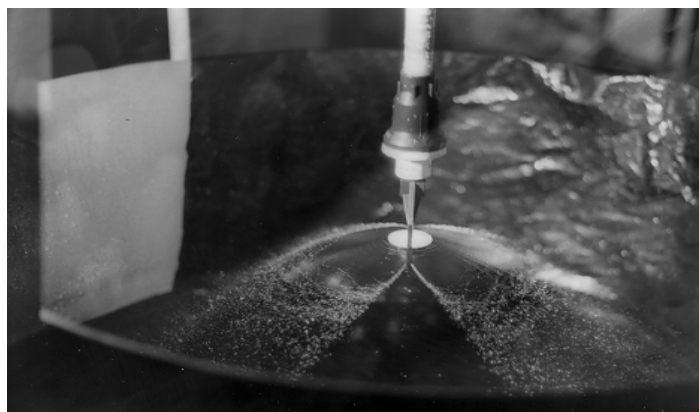


Figura 4.2. Visão global do processo de aspersão de gotas, mostrando as instabilidades e a nuvem de gotas formadas nas bordas do lençol contínuo.

Na Figura 4.3 mostra-se as instabilidades de Rayleigh-Taylor em um jato redondo de água, as quais se desenvolvem no ar.

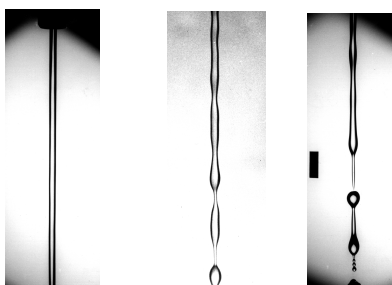


Figura 4.3. Instabilidades de Rayleigh-Taylor em um jato circular de água em ar.

A análise numérica desse problema representa um grande desafio em termos de modelagem matemática e de simulação numérica de um problema físico. Na atualidade, a metodologia de modelagem por acompanhamento de interface (*front-tracking methods*) se torna uma opção promissora. Para a solução numérica desse problema, propõe-se a discretização utilizando a técnica de refinamento adaptativo de malhas.

5 – Metodologia de desenvolvimento do projeto

Um escoamento bifásico sem mudança de fase pode ser modelado pelo seguinte sistema de equações:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = \nabla \cdot \left[\mu \left(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T \right) \right] - \nabla p + \rho \vec{g} + \vec{f} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2)$$

$$\vec{f}(\vec{x}, t) = \int_{\Omega} \vec{F}(\vec{X}, t) \delta(\vec{x} - \vec{X}) dx, \quad (3)$$

$$\vec{F}(\vec{X}, t) = \frac{\partial T}{\partial s} \vec{t} + T \left\| \frac{\partial \vec{X}}{\partial s} \right\| \vec{\kappa} n, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \vec{X}(s, t)}{\partial t} = \int_{\Omega} \vec{u}(\vec{X}, t) \delta(\vec{x} - \vec{X}) dx. \quad (5)$$

Nas equações acima, \vec{f} representa tanto o campo de força interfacial quanto o campo de força que modela paredes rígidas. A modelagem da estrutura rígida empregará o *Modelo Físico Virtual*, uma metodologia introduzida Fernandes et al., 2003. O termo forçante é nulo, exceto sobre a interface s entre dois fluidos de

propriedades físicas diferentes e numa vizinhança das estruturas rígidas; δ é a função Delta de Dirac; T é o coeficiente de tensão interfacial; \vec{n} é o vetor normal unitário e \vec{t} é o vetor tangente unitário; κ é a curvatura da interface. A equação (5) permite o transporte de uma interface com uma velocidade $\vec{u}(\vec{X}, t)$ a qual é determinada pela interpolação do campo de velocidade $\vec{u}(\vec{x}, t)$. O campo de força $\vec{f}(\vec{x}, t)$ por unidade de volume resulta da distribuição da intensidade de força da interface $\vec{F}(\vec{X}, t)$, realizada por meio da equação (3). As equações (1) e (2) resultam da simplificação das equações para escoamentos compressíveis, usando-se a hipótese de que as propriedades físicas ρ e μ são constantes sobre uma linha de corrente. Esta formulação foi apresentada inicialmente por Peskin (1977) e Unverdi e Tryggvason (1992).

A solução das Eqs. (1) e (2) supõe o conhecimento das propriedades físicas do fluido as quais são constantes exceto sobre a interface. Para o cálculo das propriedades físicas da fase contínua e da fase dispersa e para a região de transição entre ambas as fases, utiliza-se a função indicadora proposta por Ceniceros e Roma (2005), a qual é baseada em técnicas de geometria computacional. Assim a função indicadora $\psi(\vec{X}(s, t))$ assume o valor 0 na fase contínua e 1 na fase dispersa. As propriedades físicas são então obtidas pelas relações:

$$\begin{aligned}\rho(\psi) &= \rho_c + (\rho_d - \rho_c)\psi(\vec{X}(s, t)), \\ \mu(\psi) &= \mu_c + (\mu_d - \mu_c)\psi(\vec{X}(s, t)),\end{aligned}\tag{6}$$

onde μ_d e ρ_d são as propriedades da fase dispersa (bolha) e μ_c e ρ_c são as propriedades da fase contínua.

Para a solução numéricas das Eqs. (1) e (2), a discretização temporal baseada no esquema numérico empregado por Badalassi *et al.* (2003), a qual é definida como uma discretização semi-implícita de segunda ordem, é aplicada. O método de Gear extrapolado utilizado na discretização temporal e o método de Diferenças Finitas na discretização espacial em conjunto com um arranjo co-localizado asseguram segunda ordem de precisão e um eficiente e robusto esquema modular. O método dos Passos Fracionados permite o acoplamento entre as velocidades e a pressão, desta forma as

equações de conservação da quantidade de movimento são resolvidas de forma semi-implícita. Uma equação de Poisson para a correção de pressão é obtida utilizando-se as equações de balanço da quantidade de movimento e da massa, a qual é resolvida de forma implícita pelo método multigrid-multilevel. A combinação de uma metodologia semi-implícita juntamente com o refinamento adaptativo localizado garante a robustez e a eficiência do código ao se utilizar espaçamentos estritamente pequenos e largos passos no tempo da ordem do espaçamento malha gerada.

O projeto ora proposto será desenvolvido com a colaboração do grupo de CFD do IME-USP tendo o envolvimento direto do Professor Alexandre Roma.

6 – Etapas detalhadas do projeto

1. Averiguar o “estado da arte” por intermédio de uma revisão metódica da literatura, em especial, as publicações recentes envolvendo *front-tracking* e *front-capturing methods*, novos desenvolvimentos e aplicações. Deve-se estar atento também aos progressos e às aplicações de técnicas de refinamento adaptativo de malhas (*Adaptive Mesh Refinement – AMR*) e, além disso, é necessário investigar o que de mais moderno existe no âmbito de modelos matemáticos e heurísticos para o tratamento de processos de fragmentação/coalescência de interfaces e para representar corpos rígidos imersos em fluidos.
2. Continuar o desenvolvimento do código para simular escoamentos bifásicos bidimensionais do LTCM, FEM-UFU, e do IME-USP. Mais especificamente:

- a. Estudar a metodologia numérica empregada no código computacional que simula escoamentos bifásicos bidimensionais com interfaces elásticas imersas
 - b. Rever, otimizar e documentar a implementação corrente tornando o código mais eficiente, claro e fácil de ser utilizado por outros usuários. Rodar testes iniciais para a apropriação adequada e completa desse código.
 - c. Rodar casos e obter análises preliminares sobre tendência à formação de instabilidades na interface fluido-fluido.
 - d. Implementar a estratégia do Modelo Físico Virtual para representar as paredes rígidas dos obstáculos. Rodar testes e simular casos comparando, quando possível, com resultados experimentais e com outros encontrados na literatura.
 - e. Investigar e implementar modelos de fragmentação/coalescência de interfaces. Rodar testes preliminares e comparar com resultados experimentais, se possível, e com outros encontrados na literatura.
 - f. Rodar casos de interesse prático dentro contexto de cortinas de líquido bidimensionais. Em particular, verificar as potencialidades do código para evidenciar as instabilidades de Rayleigh-Taylor no filme de líquido.
3. Avançar no desenvolvimento do código computacional para resolver as equações de Navier-Stokes em três dimensões. Para isto é necessário:
- a. Estudar a metodologia numérica empregada no código atual.
 - b. Rever e otimizar a implementação corrente tornando o código mais eficiente, claro e fácil de ser utilizado por outros usuários.
 - c. Rodar testes iniciais para a apropriação adequada e completa desse código.
 - d. Investigar e implementar uma seleção de modelos de turbulência.
 - e. Rodar testes e comparar, quando possível, com resultados experimentais e com outros encontrados na literatura.
4. Avançar no desenvolvimento do código computacional para resolver as equações do movimento dos pontos lagrangianos em três dimensões, os quais discretizam a interface de separação entre as duas fases coexistentes. Para isto é necessário:
- a. Estudar a metodologia numérica empregada no código atual.
 - b. Rever e otimizar a implementação corrente tornando o código mais eficiente, claro e fácil de ser utilizado por outros usuários.
 - c. Rodar testes iniciais para a apropriação adequada e completa desse código.
 - d. Modificar o esquema de discretização temporal para um esquema numérico de segunda ordem.

- e. Implementar o cálculo de quantidades geométricas definidas sobre a interface (normal e curvatura), necessárias ao cálculo da força lagrangiana que atua sobre a interface de separação
 - f. Implementar a operação de “espalhamento” da força lagrangiana para a malha euleriana que discretiza o fluido.
 - g. Investigar e implementar formas de se regularizar, ao longo do tempo, a malha lagrangiana para manter sua boa qualidade e as propriedades de estabilidade numérica.
 - h. Rodar testes computacionais de evolução da interface e do cálculo da função indicadora de fluidos.
5. Integrar num único código os códigos resultantes das etapas 3 e 4. O resultado será um código com capacidade de simular escoamentos tridimensionais bifásicos.
 6. Rever e ampliar os critérios empregados para determinar os instantes nos quais a malha espacial deve ser substituída (critérios baseados nos valores de vorticidade e/ou turbulência). Rodar testes e comparar, quando possível, com resultados experimentais e com outros encontrados na literatura.
 7. Implementar a estratégia do Modelo Físico Virtual em três.
 8. Rodar casos de interesse prático dentro do contexto de formação de cortinas de líquido. Em particular, realizar simulações tridimensionais de estabilidade de jatos de líquido em um meio gasoso, objetivando a simulação das instabilidades de Rayleigh-Taylor em jatos cilíndricos (há dados experimentais para essa configuração). Desenvolver estudos sobre estabilidade em cortinas de líquido em meios gasosos. Comparar com dados experimentais.
 9. Elaborar relatórios do período.

7 – CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ATIVIDADES

- Prof. Aristeu da Silveira Neto: coordenação e participação no desenvolvimento de todas as etapas.
- Prof. Alexandre Megiorin Roma: coordenação e participação no desenvolvimento de todas as etapas
- Márcio Pivello.

- Dra. Ana Lúcia Fernandes de Lima e Silva: desenvolvimento de acordo com o quadro abaixo
- Dra. Millena Martins Villar: desenvolvimento de acordo com o quadro abaixo.
- Aluno de Mestrado a ser recrutado: desenvolvimento, implementação e aplicações bidimensionais.

participante	Lima e Silva, ALF		Villar, MM		Pivello	Coordenadores
	primeiro	segundo	terceiro	quarto	quinto	sexto
1						
2	b	e	h			
3	a / c	c / e	f			
4	a - c	d - e		a / c		
5			a - d	e - h		
6				a / c		
7						
8						
9						

Referências Bibliográficas

Almgren, A. S., Bell, J B., Colella, P., Howell, L. H. e Welcome, M. L., 1998. A Conservative Adaptive Projection Method for the Variable Density Incompressible Navier-Stokes Equations. Journal of Computational Physics, vol. 142, pp 1-46.

Amorim, L. M., Silva, M. B. e Silveira Neto, A., 1999, "Experimental Investigation of the Flow Transition over a Spray Nozzle-Plate System", *Two-Phase Flow Modelling and Experimentation* 1999, Vol. 3, pp. 1929 – 1935.

Armfield, S. e Street, R. The Fractional-Step Method for the Navier–Stokes Equations on Staggered Grids: The Accuracy of Three Variations. *Journal Computational Physics*, vol. 153, pp. 660-665.

Badalassi, V. E., Cenicerros, H. D. and Banerjee S. *Computation of Multiphase Systems with Phase Field Models*. *Journal of Computational Physics*, Vol.190, p 371-397, 2003.

Berger, M. J. e Olinger, J. *Adaptive Mesh Refinement for Hyperbolic Partial Differential Equations*. *Journal of Computational Physics*, Vol. 53, p. 484, 1984.

Berger, M. J. e Rigoutsos, I., 1991. An Algorithm for Hyperbolic Partial Diferential Equations, *IEE Trans. Systems Man and Cybernet*, vol. 21 pp 1278-1286.

Bonometti, T. e Magnaudet, J. *An Interface-Capturing Method for Incompressible Two-Phase Flows. Validation and Application to Bubble Dynamics*. *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 33 , p. 109–133, 2007.

Bunner, B. e Tryggvason, G. *Dynamics of Homogeneous Bubble Flows. Part 1. Rise Velocity and Microstructure of the Bubbles*. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 466, p. 17-52, 2002.

Bunner, B. e Tryggvason, G. *Dynamics of Homogeneous Bubble Flows. Part 2. Rise Velocity Fluctuantions*. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 466, p. 53-84, 2002.

Bunner, B. e Tryggvason, G. *Effect of Bubble Deformation on the Properties of Bubbly Flows*. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 495, p. 77-118, 2003.

Geniceros, H. D. *The effects of surfactants on the formation and evolution of capillary waves*, Physics of Fluids, Vol. 15, p. 245-256, 2003.

Geniceros, H. D. and Roma, A. M. *A Multi-Phase Flow Method with a Fast, Geometry-Based Fluid Indicator*. Journal of Computational Physics, Vol. 205, p. 391-400, 2004.

Charles, M.E., Govier, G.W., Hodgson, G.W., 1961. The horizontal pipeline flow of equal density oil – water mixtures. Canadian Journal of Chemical Engineering, vol. 39 (1), pp. 27– 36.

Chin et al., 1991, “Droplet Distribution from the Breakup of a Cylindrical Liquid Jet”, Physical of Fluids A, 3, pp. 1897 – 1906.

Chorin A. J., 1968, Numerical solution of the Navier-Stokes equations. Math. Comput., vol. 22, pp. 745-762.

Clift, R., Grace, J. R. and Weber, M. E., 1978, “Bubbles, Drops and Particles”, Academic Press, New York, 380 páginas, ISBN: 0-12-176950-X.

Dombrovski, N. and Jones, W. R., 1963, “The Aerodynamic Instability and Disintegration of Viscous Liquid Sheets”, Chem. Eng. Science, 18, pp. 203 – 214.

Douglas, C. C., Thorne, D. T., Hu, J., Ray, J. e Tuminaro, R. S., 2004. Cache Aware Multigrid on Two Dimensional Adaptively Refined Meshes', European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS 2004.

Esmaelli, A. e Tryggvason, G. *An Inverse Energy Cascade in Two-Dimensional, Low Reynolds Number Bubbly Flows*. Journal of Fluid Mechanics, vol. 242, p. 655-700, 1996.

Esmaelli, A. e Tryggvason, G. *Direct Numerical Simulations of Bubbly Flows Part 1. Low Reynolds Number Arrays*. Journal of Fluid Mechanics, vol. 377, p. 313- 345, 1998.

Esmaelli, A. e Tryggvason, G. *Direct Numerical Simulations of Bubbly Flows Part 2. Moderate Reynolds Number Arrays*. Journal of Fluid Mechanics, vol. 385, p. 325-358, 1999.

Fernandes, A. L. ; Silveira-Neto, A. ; Damasceno, J. J. R. . *Numerical Simulation of Two Dimensional Flows over a Circular Cylinder using the Immersed Boundary Method* . Journal of Computational Physics, Estados Unidos, v. Em Pub, p. 351-370, 2003.

Harlow F. e Welch E., 1965, Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface. Physics of Fluids, vol 8, pp. 2182-2189.

Labourasse, E., Lacanette, D., Toutant, A., Lubin, P., Vincent, S., Lebaigue, O., Caltagirone, J-P, Sagaut, P., 2007, *Towards Large Eddy Simulation of Isothermal Two-Phase Flows: Governing Equations and a Priori Tests*. International Journal of Multiphase Flow, vol. 33 p. 1–39.

Kolev, N., 1993, "Fragmentation and Coalescence Dynamics in Multiphase Flows", Experimental Thermal and Fluids Science, 6, pp. 211 – 251.

Krzeczkowski, S. A., 1980, "Measurement of Liquid Droplet Disintegration Mechanisms", Int. J. Multiphase Flow, 6, pp. 227 – 239.

Lance, M. and Bataille, J., 1991, "Turbulence in The Liquid Phase of a Uniform Bubbly Air – Water Flow", J. Fluid Mech., 222, pp. 95 – 118.

Lefebvre, A. H., 1989, Atomization and Sprays, Hemisphere, Washington, D. C.

Lum, J.Y.-L., Lovick, J., Angeli, P., 2004. Low inclination oil–water flows. *Canad. J. Chem. Eng.*, vol. 82, pp. 303–315.

Mansour, A. and Chigier, N., 1994, “Turbulence Characteristics of Cylindrical Liquid Jets”, *Physics of Fluids*, 6, pp. 3380 – 3391.

Mao, C. P., Oechsle, V. and Chigier, N., 1987, “Drop Size Distribution and Air Velocity Measurements in Air Assist Swirl Atomizer Sprays”, *ASME*, Vol. 109, pp. 64 – 69, march.

Martin, D. e Cartwright, K., 1996. Solving Poisson's Equation Using Adaptive Mesh Refinement.

Martin D. F. e Colella P., 2000. A Cell-Centered Adaptive Projection Method for the Incompressible Euler Equations. *Journal of Computational Physics*, vol. 163, pp. 271-312.

McCreery, G. E. and Stoots, C. M., 1996, “Droplet Formation Mechanisms and Size Distributions for Spray Plate Nozzles”, *Int. J. Multiphase Flow*, 22, pp. 431 – 452

Myers, R. H., 1976, “Response Surface Methodology”,

Ooms, G., 1972 The hydrodynamic stability of core annular flow of two ideal liquids, *Applied Science Reserch*, vol. 26, pp. 147-158 .

Peskin, C. S. *Numerical Analysis of Blood flow in the Heart*. *Journal of Computatinal Physics*, vol. 25, p. 220, 1977.

Reis, W. e Silveira Neto, A., 1993, “Comportamento Dinâmico de um Jato Incidente Sobre Placas Aspersoras – Cenário da Transição à Turbulência”, *Anais do XII Congresso Brasileiro de Eng. Mecânica*, 2, pp. 1033 – 1036.

Roma, A. M., Peskin C. S., e Berger, M. J., 1999. *An Adaptive Version of the Immersed Boundary Method*. *Journal of Computational Physics*, Vol. 153, p. 509-534.

Roma, A. M., 1996. A multilevel Self Adaptive Version of the Immersed Boundary Method. Tese de doutorado, New York University.

Russel, T. W. F. e Charles, M. E., 1959, The effect of the less viscous liquid in the laminar flow of two-immiscible liquids, Canadian Journal of Chemical Engineering, vol. 37, pp.18-24.

Rutland, D. F. and Jameson, G. I., 1970, "Theoretical Prediction of The Sizes of Drops Formed in the Breakup of Capillary Jets", Chem. Eng. Sci. 25, pp. 1689 –

Silva, M. B., Amorim, L. M. e Silveira Neto, A., 1998, "Investigation Experimental da Transição de Escoamentos Num Sistema Pulverizador Jato-Placa", Anais da I Escola de Primavera Transição e Turbulência, Vol. I, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 123 – 129.

Simmons, H. C., 1977, "The Correlation of Drop-Size Distributions in Fuel Nozzle Sprays – Part I: The Drop-Size/Volume-Fraction Distribution", Journal of Engineering for Power – July, pp. 309 – 314.

Sousa, F. S., Mangiavacchi, N., Nonato, L. G., Castelo, A., Tomé, M. F., Ferreira, V. G., Cuminato, J. A. e Mckee, S. *A Front-Tracking/Front-Capturing Method for the Simulation of 3D Multi-Fluid Flows with Free Surfaces*. Journal of Computational Physics, vol. 198, p. 469-499, 2006.

Unverdi, S. O. e Tryggvason, G, 1992. *A Front-Tracking Method for Viscous, Incompressible,*

Multi-Fluid Flows. Journal Computational Physics, Vol. 100 p. 25.

Villar, M. M. *Análise Numérica Detalhada de Escoamentos Multifásicos Bidimensionais*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil, 2007.

Silveira-Neto, A. e Mansur, S. S. *Turbulência*. Universidade Federal de Uberlândia, Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2003.

Spielbauer, T. M. and Aidun, C. K., 1994, "The Wave Thinning and Brekup of Liquid Sheets", ASME Physics of Fluids Engineering, 116, pp. 728 – 734.

Squire, H. B., 1953, "Investigation of the Instability of a Moving Liquid Film", Brit. J. App. Physics, 4, pp. 167 – 169.

Tarqui, J. L. Z., 1996, "Desenvolvimento de um Método de Fotografia para o Estudo de Fenômenos de Altas Frequências em Aspersores Jato-Placa", Dissertação de Mestrado, UFU.

Sugioka, K.-I., Komori, S. *Drag and Lift Forces Acting on a Spherical Water Droplet in Homogeneous Linear Shear Air Flow*. Journal of Fluid Mechanics, vol. 570, p. 155-175, 2007.

Sussman, M., Almgren, A., Bell, J., Colella, P., Howell, L. e Welcome, M. *An Adaptive Level-Set Approach for Incompressible Two-Phase Flows*. J. Comput. Phys., vol. 148, p. 81-124, 1999.

Van der Geld, C. W. M. and Vermer, H., 1994, "Prediction of Drop Size Distributions in Sprays Using The Maximum Entropy Formalism: The Effect of Satellite Formation", Int. J. Multiphase Flow, 20, pp. 363 – 381.

Yarin, A. L., 1993, "Free Liquid Jets and Films: Hydrodynamics and Rheology", John Wiley, New York.

Wierba, A.& Takayama, K., 1988, "Experimental Investigation of the Aerodynamic Breakup of Liquid Drops, AIAA JL 26, pp. 1329 – 1335.

Zheng, X., Lowengrub, J., Anderson, A. e Crsitini, V. *Adaptive Unstructured Volume Remeshing – II: Application to Two- and Three-Dimensional Level-Set Simulations of Multiphase Flow*. Journal of Computational Physics, vol. 208, p. 626-650, 2005.