



MODELO DE TRABALHO PARA A 1ª MOSTRA DE IC

FORMAÇÃO DE AEROSSÓIS EM JATOS CRUZADOS

Lucas de Souza Meira¹, Douglas Hector Fontes², Francisco José de Souza³

RESUMO: O presente trabalho tem por intuito expor a importância científica e industrial do estudo da formação de aerossóis oriundos da quebra de jatos líquidos em escoamentos gasosos. Será apresentada a avaliação de modelos numéricos de escoamentos multifásicos, especificamente a quebra secundária de gotas devido ao cisalhamento e às forças fluidodinâmicas. A metodologia foi dividida em (i) levantamento de dados experimentais, (ii) definição da malha a partir da geometria das seções de ensaio e (iii) simulação numérica por meio do UNSCYFL 3D – software desenvolvido no MFLab (Laboratório de Mecânica de Fluidos). Os resultados preliminares foram comparados a valores empíricos, provenientes de PDPA (*Phase Doppler Particle Anemometry*) e apresentam boa acurácia na predição da fração mássica normalizada de gotas em função do diâmetro. O cálculo de velocidade das gotículas apresentou certa defasagem se comparado aos dados experimentais.

PALAVRAS-CHAVE: Aerossol, quebra secundária, escoamento multifásico, jato cruzado, gotículas.

SPRAY FORMATION IN CROSSFLOW

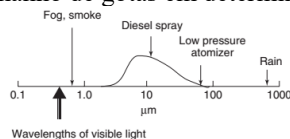
ABSTRACT: The present work has the purpose of exposing the scientific and industrial importance of spray formation studies in gaseous medium. The evaluation of multiphase flow numerical models, specifically secondary breakup of drop due shearing and aerodynamic forces, will be presented. The methodology was separate in (i) data collection of experimental data, (ii) meshing definition of test section, and (iii) numerical simulation in the UNSCYFL 3D – software developed in MFLab (Fluid Mechanics Laboratory). The results were compared to experimental values from PDPA technique. The calculated droplet normalized mass fraction presented good accuracy. On the other hand, the velocity profile shown slight discrepancy related to experimental data.

KEYWORD: Spray, secondary breakup, multiphase flow, crossflow, droplet.

INTRODUÇÃO

Fenômenos naturais ou processos industriais têm relação direta com os escoamentos multifásicos e suas características, especialmente com fases líquidas dispersas em atmosferas gasosas (*sprays*). A variação nas dimensões das partículas dispersas no meio contínuo pode diferenciar completamente um fenômeno do outro, como mostrado na Figura 1. Por exemplo, a diferença entre a formação de chuva, garoa ou neblina se dá pela diferença nas dimensões e distribuição das gotículas de água dispersas no ar. Já nos processos industriais, as dimensões, velocidades e distribuição das gotículas são fatores que aceleram ou retardam a eficiência de um processo. Como exposto por (Sousa e Oliveira, 2010), o processo de atomização de uma simples gota esférica de 2mm de diâmetro em gotículas com tamanho de 10µm, aumenta a taxa de evaporação do líquido por um fator de 200. Diversos trabalhos realizados nesta área, como os de Tanner (1999) e Reitz (1996), procuram aliar técnicas numéricas à predição de condições ideais de funcionamento. No entanto estes e outros autores tem enfoque à injeção direta em atmosferas quiescentes.

Figura 1 – Espectro do tamanho de gotas em determinados fenômenos/aplicações.



Fonte: Reitz, *et. al.* (2014).

¹ Discente, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais

² Doutorando, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais

³ Professor Doutor, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais

Os estudos relacionados à formação de aerossóis formam um campo científico bastante vasto e que envolvem fluidos em diferentes condições, finalidades e propriedades. Tal motivação levou, nos primórdios, pesquisadores como Bidone (1823), que estudou o formato de jatos causados por diferentes injetores, e Lord Rayleigh (1878), que investigou e concluiu que a formação de gotas a partir de jatos líquidos projetados no ar quiescente se dá por instabilidade axissimétricas no jato. Os estudos aqui apresentados tratam da configuração de jato cruzado (situação em que jatos de água são injetados perpendicularmente a um escoamento gasoso desenvolvido). Esta configuração é a mesma que ocorrem sistemas de injeção carburados, turbinas a gás e pós-queimadores de aeronaves. Experimentos realizados por Deepe (2006), embora não sejam contemporâneos, apresentam níveis de detalhes e aferições que se mostraram pertinentes como base comparativa das simulações numéricas deste trabalho.

MATERIAIS E MÉTODOS

As simulações numéricas foram efetuadas por meio do software UNSCYFL 3D, onde as equações de continuidade (1) e quantidade de movimento (2) são resolvidas simultaneamente para o fluido. Para descrever as trajetórias das gotículas, são resolvidas as equações do movimento e segunda lei de Newton.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + F_{st} + \rho g_i \quad (2)$$

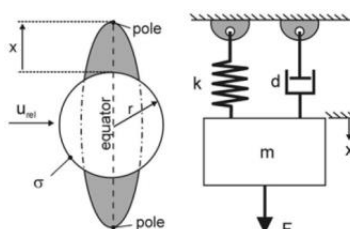
$$\frac{\partial \rho \alpha}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \alpha)}{\partial x_j} = f_d \quad (3)$$

A equação (3) é utilizada para computar a razão de fração volumétrica (α) e rastrear a interface líquido-gás, a fim de calcular o volume de líquido ocupado em cada célula. O modelo de turbulência k-epsilon foi utilizado para introduzir os efeitos da turbulência na quebra do jato líquido.

O modelo de quebra secundária TAB (*Taylor Analogy Breakup*), equação (4), foi utilizado para prever a quebra secundária das gotas em decorrência das forças fluidodinâmicas. Este modelo, introduzido por O'Rourke e Amsden (1987), compara a gota a um sistema massa-mola amortecido forçado, onde as forças dissipativas derivam da viscosidade do líquido (μ_d), as forças restaurativas derivam da tensão superficial (σ) e o termo forçado é originário do arrasto aerodinâmico.

$$\ddot{y} + \frac{5\mu_d}{\rho_d r^2} \dot{y} + \frac{8\sigma}{\rho_d r} y = 2\rho_g \|V_r\|^2 3\rho_d^2 \quad (4)$$

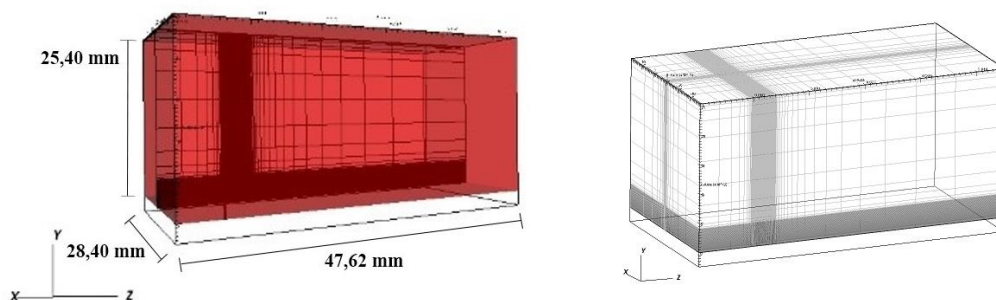
Figura 2 – Analogia da gota a um sistema massa-mola amortecido forçado.



Fonte: Baumgarten (2006).

As malhas numéricas foram confeccionadas a partir das dimensões das seções de testes e diâmetros dos injetores utilizados nos experimentos de Deepe (2006), como mostrado na figura 3. A metodologia de criação de malhas hexaédricas por blocos foi utilizada no ANSYS® ICEM CFD™.

Figura 3 – Detalhes da malha utilizada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os casos ensaiados por Deepe (2006) com injeção de líquido contínua (frequência nula) foram organizados de acordo com a Tabela 1, onde se encontram os principais dados de entrada para as

simulações, bem como os adimensionais calculados. Os casos 1 e 2 utilizaram água como fluido de trabalho.

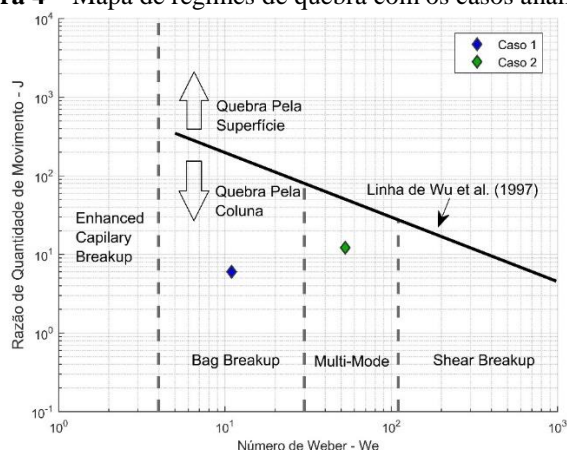
Tabela 1 – Casos simulados no UNSCYFL 3D.

	V_{ar} (m/s)	V_{jato} (m/s)	Re_{ar}	Re_{liq}	J	We_{ar}
Case 1	50,00	4,26	90420	1098	6,003	10,961
Case 2	110,00	13,30	198925	3428	12,090	53,052

Fonte: Elaborado pelo autor.

Um diagrama de razão de quantidade de movimento ($J = \frac{\rho_{liq} U_{liq}^2}{\rho_{ar} U_{ar}^2}$) por número de Weber ($We = \frac{\rho_{ar} U_{ar}^2 d_0}{\sigma}$, sendo d_0 o diâmetro do injetor e σ a tensão superficial do líquido) foi adaptado, segundo Arienti (2007), de forma a situar os casos em seus possíveis regimes de quebra predominantes – Figura 4.

Figura 4 – Mapa de regimes de quebra com os casos analisados.

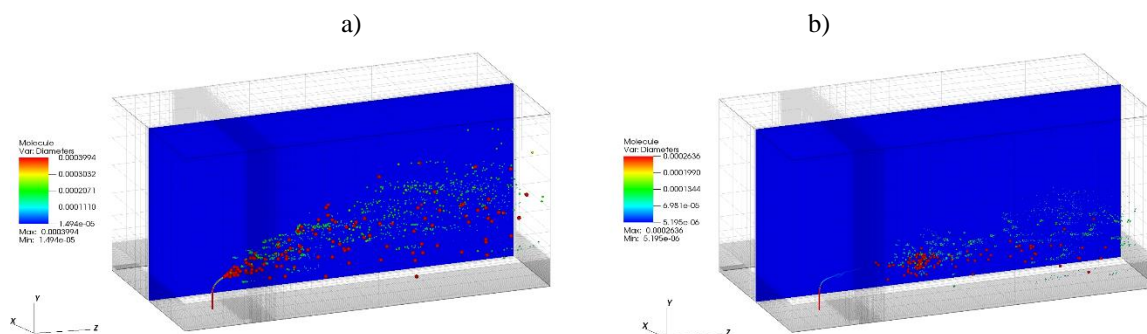


Fonte: Elaborado pelo autor.

RESULTADOS FINAIS

As Figuras 5 a) e b) mostram as visualizações geradas para os casos 1 e 2, respectivamente. É perceptível que, para o caso 1, a geração de gotas por meio da quebra da coluna líquida se dá de maneira contínua enquanto que, para o caso 2, o jato líquido apresenta oscilações e atinge a altura de quebra de maneira intermitente.

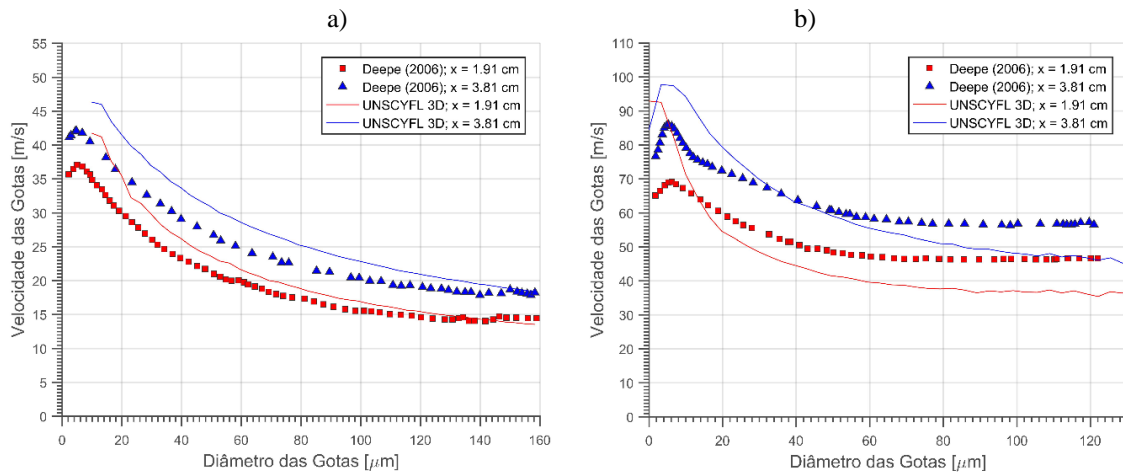
Figura 5 – Distribuição das gotículas no domínio .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a aferição estocástica da simulação numérica, foram definidos dois planos de amostragem dispostos a 75 diâmetros ($Z=1,91$ cm) e 150 diâmetros ($Z=3,81$ cm) de distância à jusante do injetor. Os perfis de velocidade das gotículas em função do diâmetro foram obtidos nos mesmos plano de amostragem adotados no PDDA de Deepe (2006), de acordo com a Figura 6.

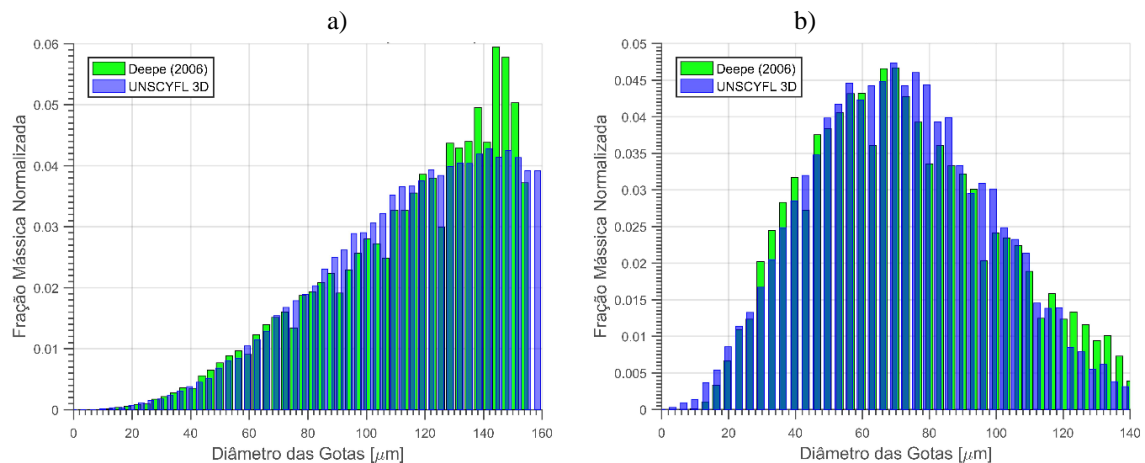
Figura 6 – Distribuição de velocidade das gotículas a) caso 1 e b) caso 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 7 mostra a fração mássica normalizada de gotículas em função do diâmetro, em que é observada uma maior predominância de gotículas menores para o caso 2. Isto ocorre pelo fato do aumento das instabilidades na superfície e na coluna do jato, como apresentado pelos experimentos de Wu et al. (1997b)

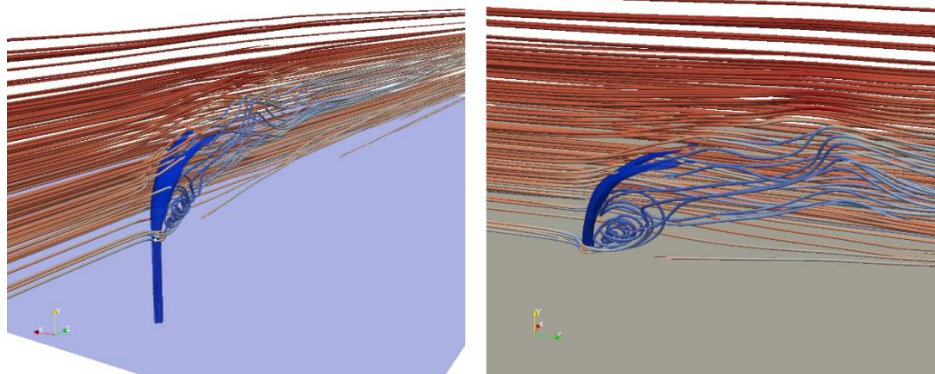
Figura 7 – Fração mássica normalizada das gotículas a) caso 1 e b) caso 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por meio da observação na variação de sentido e módulo das velocidades médias axiais e verticais no domínio, percebe-se que há uma forte região de recirculação atrás da coluna líquida. A evidência deste tipo de recirculação concorda com os estudos empíricos de Fric e Roshko (1994) que mostra a presença de 2 vórtices verticais dispostos na esteira da coluna líquida e 2 vórtices contra rotativos dispostos na ponta do jato líquido. A Figura 8 mostra, por meio das linhas de corrente (*streamlines*), estas estruturas fluidodinâmicas que são responsáveis pela característica não permanente do fenômeno.

Figura 8 – Linhas de corrente e vórtices tridimensionais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

CONCLUSÃO OU CONSIDERAÇÕES FINAIS

As ferramentas de fluidodinâmica computacional (CFD) tem desempenhado um papel importante no cenário científico/industrial. Pelo fato das técnicas de medição e aquisição empíricas chegarem a um patamar satisfatório, faz-se necessária a utilização de técnicas numéricas na predição de efeitos. O presente trabalho teve por objetivo compreender o fenômeno da quebra secundária de jatos líquidos de água na condição de jatos cruzados. Ele pode ser utilizado para demonstrar a elevada acurácia do método TAB na predição da distribuição e velocidade das gotículas em condições de baixos números de Weber.

Outro fato importante observado é a influência direta da razão de quantidade de movimento e do número de Weber na quebra do jato e na formação do aerossol, como evidenciado no caso 2, onde o jato líquido em regime turbulento encontra um escoamento gasoso com maior velocidade relativa que culmina na formação de gotículas de diâmetros menores do que no caso 1.

O aumento da discrepância dos resultados se dá com o aumento do número de Weber. Como apontado por estudiosos como Tanner (1999) o método TAB, embora seja um método simples e rápido de ser executado, começa a superestimar valores de velocidades para gotículas menores e subestimar valores de velocidades para gotículas maiores para altos números de Weber. No meio científico é proposto, para regimes de quebra mais catastróficos, modelos híbridos como: TAB melhorado, cascata, etc. Outro fator com influência nos resultados finais são as correlações de arrasto utilizadas que, no código, assume o volume líquido com formato esférico. Tal consideração não representa fielmente a física do problema, pois os aglomerados líquidos (*blobs*) apresentam formatos irregulares de acordo com as forças fluidodinâmicas atuantes.

REFERÊNCIAS

- Arienti, M.; Soteriou, M. C. **Dynamic of Pulsed Jet in Crossflow**, ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea and Air. Montreal, Canada, 2007.
- Deepe, J. M. 2006. **Effect of Weber Number on The Fuel Transfer Function of Modulated Liquid Jets**. M.Sc. thesis, Pennsylvania State University, Pennsylvania.
- Fric, T. T. e Roshko, A. **Vortical Structure in The Wake of a Transverse Jet**, Journal of Fluid Mechanics (1994). Cambridge University Press. Doi: 10.1017/S0022112094003800, 1994.
- Inamura, T.; Nagai, N. **Spray Characteristics of Liquid Jet Traversing Subsonic Airstreams**. Journal of Propulsion and Power, Vol. 13(2), 1997. p. 250-256.
- O'Rourke, P. J.; Amsden, A. A. **The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup**. SAE Technical Paper No. 872089, 1987.
- Rayleigh, Lord, F. R. S. **On the Capillary Phenomena of Jets**, 1879.
- Reitz, R. D.; Pickett, L.; Trujillo, M. **Fuel Introduction**. **Encyclopedia of Automotive Engineering**. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-97402-5. DOI: 10.1002/9781118354179.auto118, 2014.
- _____. **Computer Modeling Spray**. Spray Technology Short Course. Pittsburgh, United States of America, 1996.
- Souza, F.J.; Oliveira, J. E. S. **Turbulência em Motores de Combustão Interna**. Turbulência. 1st edição. Ilha Solteira: ABCM, 2010, v.7, p. 167-213, 2010.
- Tanner, F. X. **Atomization and Droplet Breakup Modeling of Diesel Sprays**. Michigan Tech, 1999. Disponível em: <http://www.math.mtu.edu/~tanner/Research/Project3/poster_new/poster_new.html>. Criado em 1999. Acesso em: abril de 2017.
- Wu, P. K., Kirkendall, K. A., Fuller, R. P., and Nejad, A. S. **Breakup Processes of Liquid Jets in Subsonic Crossflow**, J. Propulsion and Power 13,64-73, 1997.
- Wu, P.-K., Kirkendall, K.A., Fuller, R.P., Gruber, M.R., e Nejad, A.S., **Spray Trajectories of Liquid Fuel Jets in Subsonic Crossflows**. 7th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Seoul, Korea, pp. 545-552, Aug. 1997b.