

IV Simpósio Paranaense de Modelagem, Simulação e Controle de Processos ISSN : 1984-7521	Artigo: 13
	Páginas: 89 - 96

INFLUÊNCIA DA VAZÃO DE GÁS DISPERSANTE SOBRE A PERDA DE CARGA DE UM BICO ATOMIZADOR DO TIPO AIR-BLAST

Rafael Vieira Velozo, Jaqueline Catapan, Hortênsia Aparecida Busana, Rebeca Isolani Theis, Leonardo Machado da Rosa, Jonathan Utzig, Waldir Pedro Martignoni, Henry França Meier*

Universidade de Blumenau – FURB, Blumenau – SC, meier@furb.br

Abstract – Bicos atomizadores são dispositivos que promovem a dispersão de carga líquida em diversas aplicações industriais. O atomizador do tipo “air-blast” funciona com o contato agressivo entre um gás dispersante e um líquido a ser disperso. A perda de carga é importante para o estudo de bicos atomizadores, pois afeta diretamente a efetividade da atomização e formação de gotículas. Dentre os fatores que influenciam a perda de carga de bicos, está a vazão de gás dispersante. O objetivo do estudo foi analisar o efeito da vazão de gás dispersante em relação à perda de carga do bico atomizador, e constatar qualitativamente a relação entre vazão de gás dispersante e de líquido dispersado. Os experimentos foram realizados por simulação numérica, e os resultados apresentaram que a perda de carga é diretamente proporcional à vazão de gás dispersante. Através dos contornos de fração volumétrica, foi possível avaliar qualitativamente a dispersão do líquido em função da vazão de gás. Palavras-chave: Spray, Atomização, Dispersor de carga, “Air-blast”, Perda de carga.

Introdução

Atomizadores são dispositivos presentes em diversas operações industriais. Eles são utilizados para auxiliar os processos através da dispersão do fluido, afim de que a etapa físico-química seja facilitada através do aumento da superfície de contato entre a carga atomizada e os reagentes. A atomização do tipo *twin-fluid* ocorre quando, dentro do bico do atomizador, acontece o contato entre uma corrente de fluido a ser atomizado e uma corrente de gás dispersante, sendo que a força cinética fornecida por esta última é suficiente para quebrar o jato contínuo de fluido em pequenas gotículas, chamadas de nuvem de *spray*.

A perda de pressão em bicos possui grande relevância para o estudo de atomização, pois é uma resposta muito sensível a alterações na configuração do equipamento, tanto quanto na escolha dos fluidos. Trabalhos da literatura constataam que parâmetros da geometria do bico tais como o diâmetro [1], o comprimento [2] e o ângulo de chanfro [2] alteram significativamente a perda de carga dentro do atomizador. Além disso, as propriedades do fluido atomizado também possuem efeito ativo nesta resposta, como foi constatado na literatura [4,5] a respeito da viscosidade. Ainda, estudos desenvolvidos [6] para analisar o efeito combinado de variáveis geométricas e condições de operação, como a vazão do fluido sobre a perda de carga do bico, permitiram a regressão de resultados experimentais em modelos para a predição da queda de pressão. Entretanto, estes estudos foram realizados em um bico de dispersão de sólidos, sendo então um escoamento gás-sólido.

Em vista disso, o objetivo do presente trabalho é avaliar a relação entre a velocidade do gás dispersante e o perfil de pressão dentro de um atomizador do tipo *twin-fluid* com configuração *air-blast*, sendo por sua vez um escoamento gás-líquido. As dimensões do problema físico foram suprimidas devido à confidencialidade.

Modelagem Matemática

O problema físico em estudo envolve dois fluidos de fases distintas em movimento e entrando em contato, ocorrendo com isto uma troca de energia e de

**14 e 15 de março de 2019
Curitiba - Paraná**

quantidade de movimento. Para isto, consideraram-se as equações de conservação para a modelagem do escoamento: a equação de conservação de massa, ou equação da continuidade, a equação de transporte de quantidade de movimento e a equação de conservação de energia.

A abordagem selecionada para realizar a modelagem multifásica foi a euleriana para as duas fases, onde a presença ou ausência de cada fase é determinada através da interpenetrabilidade das fases e da conservação de sua massa total. Devido à presença de interface bem definida, utilizou-se o método *Volume of Fluid* (VOF), capaz de modelar o *breakup* de correntes de líquido contínuo [7], entre outras aplicações.

A abordagem VOF consiste na modelagem multifásica de dois fluidos imiscíveis. Nas células que possuem duas fases, a fração volumétrica indica a presença da interface, que é transportada. Nestas posições, as propriedades da célula são mediadas em relação ao volume de cada fase. Por fim, as equações foram resolvidas em uma formulação transiente.

Deste modo, a equação da continuidade pode ser escrita em termos da fração volumétrica de uma das fases, como para a q -ésima fase da seguinte forma, apresentada pela Equação (1):

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} \quad (1)$$

onde α_q é a fração volumétrica da q -ésima fase, ρ_q é a massa específica, e S_{α_q} representa um termo fonte. A equação possui como restrição que a soma das frações volumétricas das fases possua valor unitário. A fase gás é tratada como sendo um gás ideal, compressível, e a sua massa específica é estimada através de uma equação de estado. A fração volumétrica é resolvida utilizando uma formulação implícita.

Ainda, a equação de transporte de quantidade de movimento na abordagem VOF é resolvida apenas uma vez no domínio computacional, e o campo de velocidades resultante é compartilhado entre as fases envolvidas. A equação de transporte de quantidade de movimento então é dada pela Equação (2):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2)$$

onde o termo p é a pressão estática, $\rho \mathbf{g}$ é a força gravitacional e \mathbf{F} são forças externas.

A conservação da energia também é calculada utilizando-se apenas uma equação para todas as fases envolvidas, conforme expresso na Equação (3):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\mathbf{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j \mathbf{J}_j + (\boldsymbol{\tau}_{\text{eff}} \cdot \mathbf{v})) + S_h \quad (3)$$

sendo k_{eff} a condutividade efetiva envolvendo a condutividade turbulenta, dependente do modelo de turbulência, \mathbf{J}_j é o fluxo difusivo das espécies j , $\boldsymbol{\tau}_{\text{eff}}$ é o tensor tensão efetivo envolvendo a tensão turbulenta e S_h é um termo fonte. A energia total (E) para a q -ésima fase é definida conforme a Equação (4):

$$E_q = h_q - \frac{p}{\rho_q} + \frac{\mathbf{v}^2}{2} \quad (4)$$

O modelo de turbulência escolhido para esta modelagem foi o *Shear-Stress Transport* (SST) k - ω , que dos modelos de duas equações é o mais indicado para a problemática do presente estudo [8], pois apresenta acurácia tanto perto das paredes da geometria quanto nas regiões de livre escoamento. As equações de transporte para k e para ω são apresentadas respectivamente nas Equações (6) e (7):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{v}) = \nabla \cdot (\Gamma_k \nabla k) + G_k - Y_k + S_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \nabla \cdot (\rho \omega \mathbf{v}) = \nabla \cdot (\Gamma_\omega \nabla \omega) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (7)$$

onde os termos G_k e G_ω representam a geração de energia cinética turbulenta e da taxa de dissipação específica, Γ_k e Γ_ω são a difusividade efetiva, Y_k e Y_ω são a dissipação devido à turbulência, D_ω representa o termo de difusão cruzada e S_k e S_ω são termos fonte. Mais detalhes sobre o modelo de turbulência podem ser consultados na literatura [9].

Experimentação Numérica

A Figura 1 apresenta cortes do domínio de cálculo, nos quais é possível observar a injeção das fases. Nota-se que o líquido a ser atomizado é alimentado pelas laterais do bico, enquanto o gás dispersante é proveniente da parte inferior da geometria, entrando os dois fluidos em colisão na área denominada “região de contato”. A linha utilizada para realizar a medição do perfil de pressão, localizada no centro do dispositivo, desde a entrada de gás até a saída do bico atomizador, encontra-se destacada em amarelo na Figura 1. Ao final dela, encontra-se a câmara de escoamento livre, onde o *spray* é formado e as gotículas são dispersas. As simulações numéricas foram executadas variando a vazão de gás dispersante no atomizador e medindo a pressão resultante.

O líquido a ser atomizado, a água, entra à temperatura e pressão atmosféricas de 25 °C e 1 atm, possuindo nestas condições massa específica de 998,2 kg/m³ e viscosidade absoluta de 10,03×10⁻⁶ Pa·s. O gás dispersante, ar atmosférico seco, também foi considerado à temperatura e pressão atmosféricas, sendo considerado compressível devido à proximidade em alguns casos da velocidade sônica, precisando então de uma equação de estado para a estimativa da massa específica, e sua viscosidade nessas condições é de 17,89×10⁻⁶ Pa·s

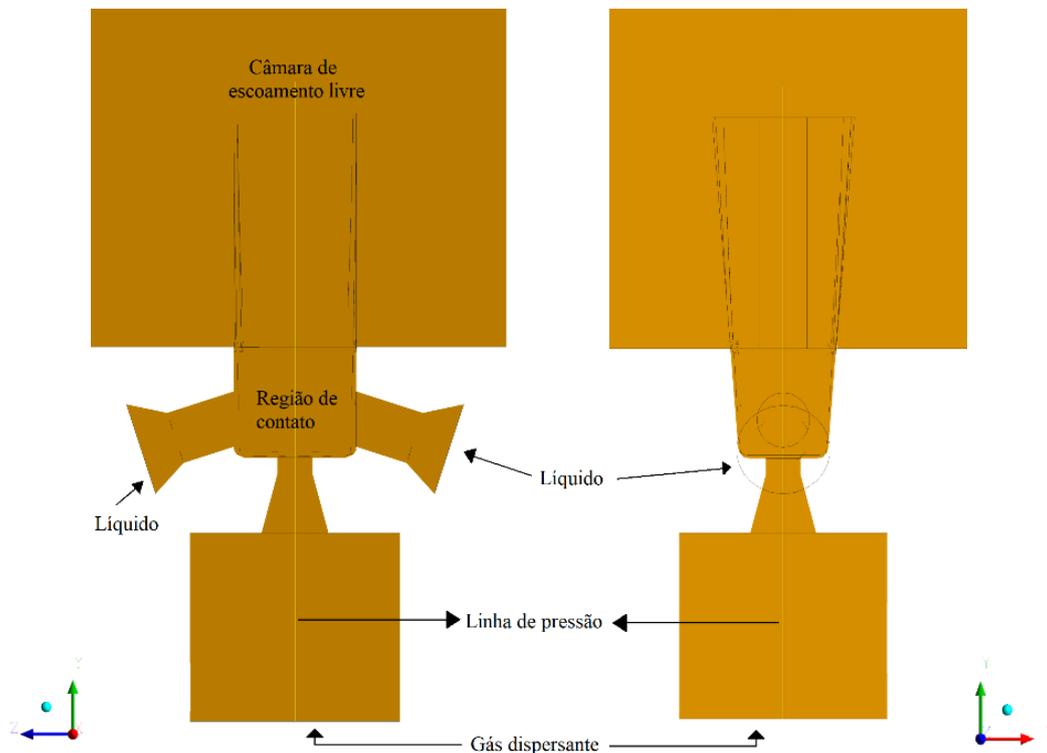


Figura 1 – Geometria do bico atomizador do tipo *twin-fluid* em disposição *air-blast*; vista em seções transversais nos planos (a) ZY e (b) XY.

A malha numérica utilizada para o estudo possui cerca de 112 mil elementos, sendo ela mais refinada nas regiões de escoamento com maior velocidade e mais esparsa nas regiões com menor velocidade. Como pode-se observar na Figura 2, a região mais refinada possui elementos na ordem de 1×10^{-6} m, enquanto que a mais esparsa possui células na ordem de 1×10^{-5} m. O menor volume de controle possui aproximadamente 1×10^{-10} m³, e o maior volume na ordem de 1×10^{-6} m³. O passo de tempo com número de Courant satisfatório foi o de 1×10^{-5} s e todos os casos foram resolvidos entre 0,190 e 0,025 s de tempo real, dependendo da vazão do gás dispersante, o que se mostrou ser tempo o suficiente para o escoamento ser completamente desenvolvido no interior do bico.

O tempo de duração das simulações foi de aproximadamente 10 dias, cada caso utilizando 5 processadores, com pequenos intervalos entre este período para coleta de resultados e verificação de contornos de fração volumétrica afim de analisar o desenvolvimento do escoamento. As simulações foram conduzidas utilizando-se do código comercial ANSYS® Fluent versão 19.0.

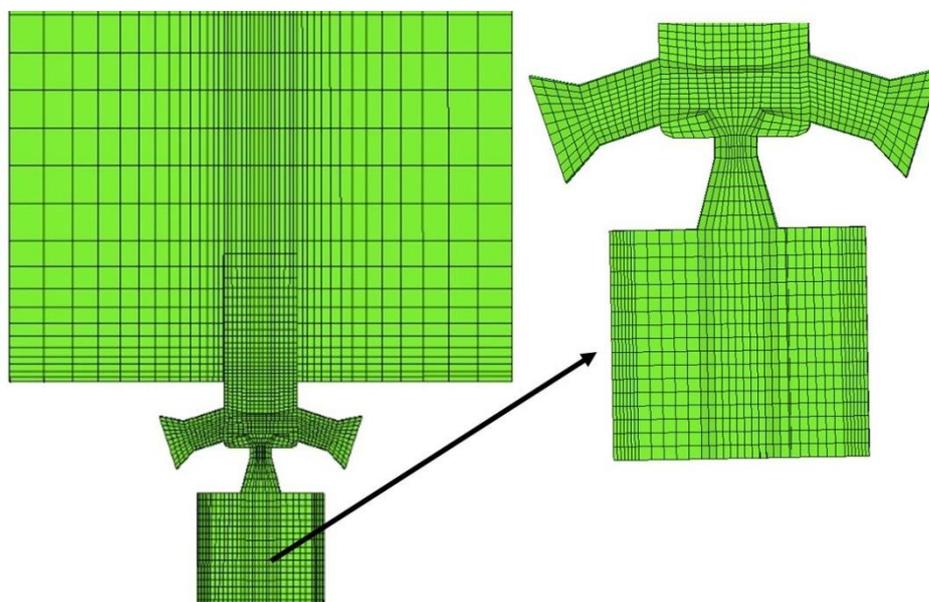


Figura 2 – Malha numérica utilizada para a experimentação numérica (a) na região próxima ao bico injetor, e (b) detalhe na alimentação dos fluidos.

As condições de contorno dos experimentos numéricos incluem a vazão de líquido dispersado de 1500 kg/h, sendo este água à pressão e temperatura atmosférica, e a condição de saída foi uma configuração de pressão ambiente. A vazão de gás dispersante foi simulada com um valor diferente para cada caso, iguais a 5, 15, 25, 35 e 45 kg/h de ar atmosférico. Resultados obtidos para fração volumétrica, velocidade e pressão foram avaliados.

Resultados e Discussão

O campo de pressão e vetores de velocidade são apresentados nas Figuras 3 e 4, respectivamente. Pode-se observar que a maior queda de pressão ocorre na região de afunilamento do duto de gás dispersante, logo antes do mesmo entrar na região de contato com o líquido atomizado; além disso, ocorrem regiões de pressão relativa negativa nesta mesma região de contato.

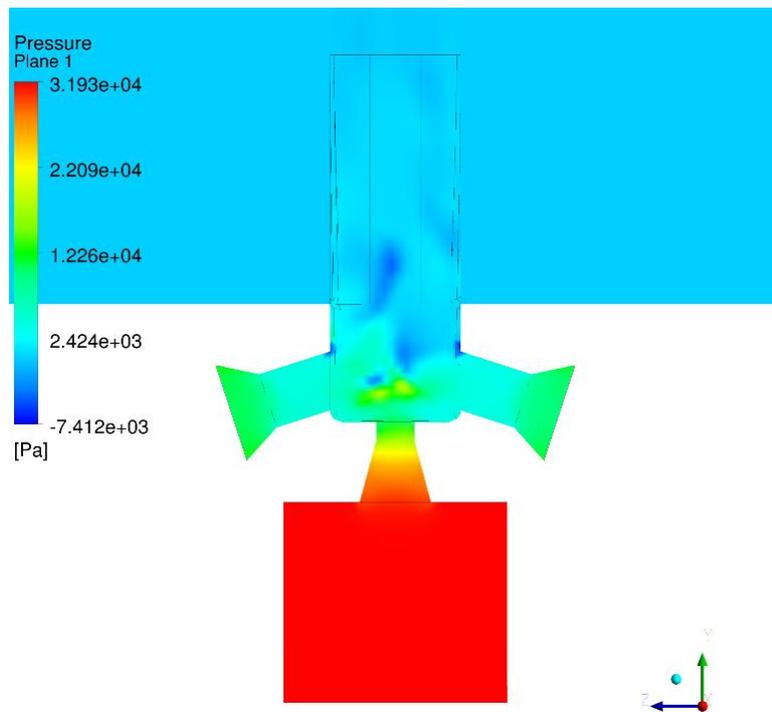


Figura 3 – Campo de pressão para vazão de 25 kg/h de gás dispersante.

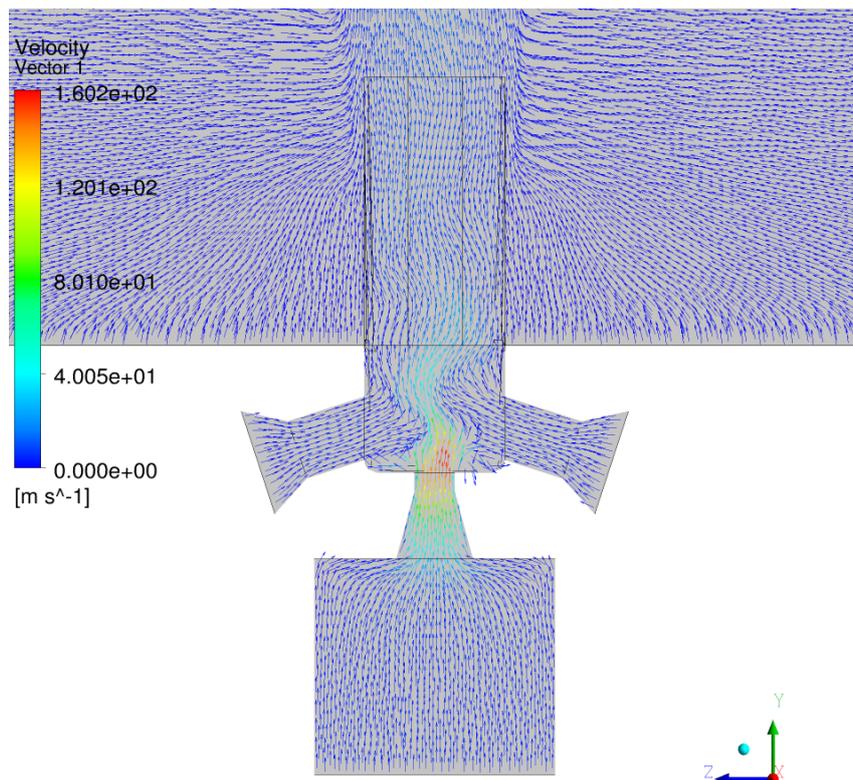


Figura 4 – Vetores de velocidade para vazão de 25 kg/h de gás dispersante.

Através dos vetores, pode-se notar que as maiores velocidades se concentram na região de saída do gás dispersante, chegando a aproximadamente 160 m/s para a vazão de 25 kg/h. Nesta condição, atinge-se um valor de 0,47 para o número de Mach. No caso com 45 kg/h de gás dispersante, chegou-se próximo à condição de escoamento sônico, com número de Mach igual a 0,94.

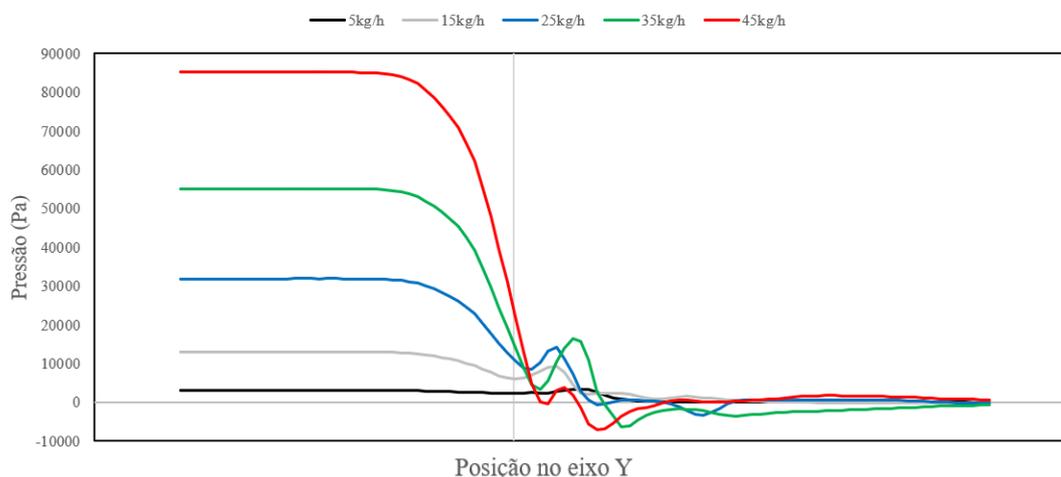


Figura 5 – Perfis de pressão medido na linha ao centro da geometria do atomizador para diferentes vazões de gás dispersante.

Na Figura 5 é possível observar que a pressão é praticamente constante antes da entrada de gás dispersante. Na entrada do bico, onde há o afinilamento do duto, a pressão sofre uma queda drástica, seguida por oscilações devido à região de contato com o líquido, até por fim estabilizar na pressão atmosférica. Também é possível notar que quanto maior a vazão, maior é a queda de pressão.

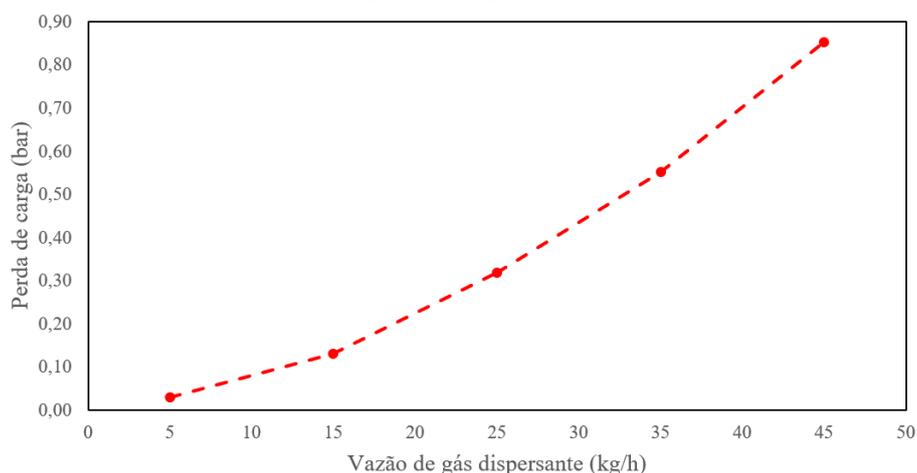


Figura 6 – Relação entre vazão de gás dispersante e perda de carga no bico atomizador.

Na Figura 6, apresenta-se o comportamento da perda de carga dentro do bico atomizador. Nota-se que a perda de carga eleva-se em função da vazão de gás dispersante. Ainda, a maior perda de carga, de aproximadamente 0,9 bar, foi resultada pela maior vazão de gás dispersante, de 45 kg/h.

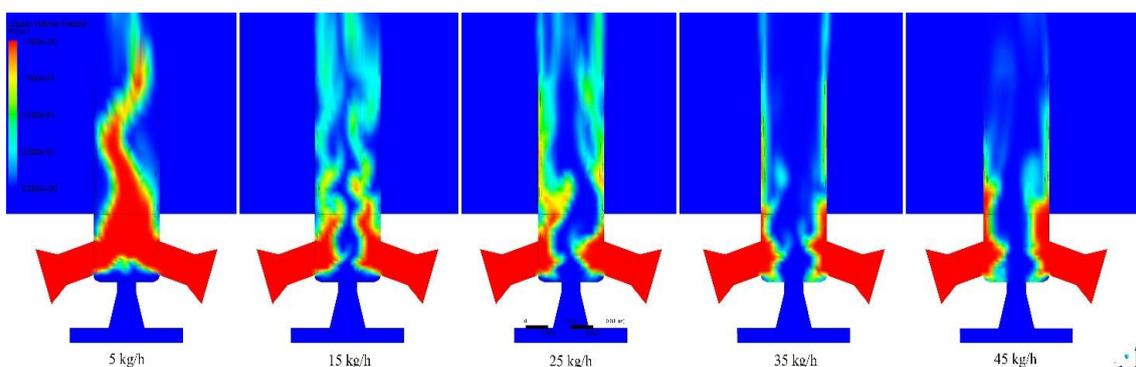


Figura 7 – Contornos instantâneos de fração volumétrica de líquido disperso para as vazões de (a) 5 kg/h, (b) 15 kg/h, (c) 25 kg/h, (d) 35 kg/h e (e) 45 kg/h.

Na Figura 7 é possível observar o efeito da vazão de gás dispersante sobre a distribuição de líquido. Nas vazões intermediárias de 25 e 35 kg/h, o líquido deixa a câmara de escoamento livre em uma nuvem menos concentrada de líquido, indicando gotículas. Nas primeiras vazões, a velocidade do gás dispersante não é suficiente para quebrar o jato de líquido em gotículas, enquanto que na última vazão a velocidade é tão alta que o jato de líquido é diretamente arremessado para as paredes, evitando a formação de um *spray* uniforme na saída do bico.

Conclusão

Resultados obtidos através de simulações numéricas demonstraram-se coerentes fisicamente, sendo dentro do esperado para bicos atomizadores. Os valores de perda de carga obtidos poderão ser utilizados em estudos mais detalhados sobre bicos atomizadores do tipo *air-blast*, através da linha de tendência gerada com os experimentos numéricos. Também foi possível observar que o escoamento logo na saída de gás no bico possui comportamento quase sônico nas vazões mais elevadas, podendo chegar a sônico, como é o caso de alguns atomizadores industriais. Resultados obtidos em simulações também demonstraram o efeito da vazão de gás dispersante sobre a distribuição de líquido, o que permite avaliar a qualidade do *spray* em diferentes condições operacionais.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado com o apoio da Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras), através do termo de cooperação n° 5850.0107354.18.9.

Referências bibliográficas

1. A. Royne, C.J. Dey, “Effect of nozzle geometry on pressure drop and heat transfer in submerged jet arrays”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49 (2006) 800–804
2. Y.F. Tuo, L.H. Yang, T. Guo, L.J. Zhang, “A calculative formula and experimental study on loss-of-head of taper nozzle”, *Water Saving Irrigation* 4 (2005) 14–16
3. L.A. Brignoni, S.V. Garimella, “Effects of nozzle-inlet chamfering on pressure drop and heat transfer in confined air jet impingement”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43 (2000) 1133–1139
4. C. James, M.Ware, J. Grant, A. Thorpe, A. Michael, F. Senftle, S. Smith, “Flow equation for an ideal or viscous gas through a nozzle: application to cascade impactors”, *Experimental Thermal and Fluid Science* 25 (2001) 421–427
5. D.A. McNeil, A.D. Stuart, “Vertically upward two-phase flow with a highly viscous liquid-phase in a nozzle and orifice plate”, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 25 (2004) 58–73
6. W. Huang, X. Gong, X. Guo, Z. Dai, H. Liu, Z. Cao, C. Wang. “Study of the pressure drop of dense phase gas–solid flow through nozzle”. *Powder Technology*, 2009, 189(1), 82–86.
7. C. W. Hirt, B. D. Nichols. "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries". *Journal of Computational Physics*. 1981. 39 (1): 201–225
8. J. Hasan, A. Sepideh, X. Jie, D. C. Xiao, S. Cordelia, W. W. Meng. “On the effect of turbulence models on CFD simulations of a counter-current spray drying process”. *Chemical Engineering Research and Design*, 2019. (141):592-607.
9. F. R. Menter. "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications". *AIAA Journal*. 1994. 32(8). 1598–1605

