

TÉCNICAS DE CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE SPRAY-COOLING PARA PREPARO DE MATERIAL PARTICULADO

P. C. G. Fernandes¹; G. A. Pereira²; F. O. Cardoso^{2*}; K. P. Cardoso³; M. Y. Nagamachi⁴; H. L. Riette⁵

¹-Departamento de Engenharia Básica – Universidade Paulista
Rod. Presidente Dutra, km 157,5 – Rio Comprido – CEP:12240-420– São José dos Campos- SP – Brasil

Telefone: (12) 2136-9000 – Email: paulacgfernandes7@hotmail.com

²-Departamento de Engenharia de Controle e automação– Faculdade de Tecnologia São Francisco. Av. Siqueira Campos, 1174 – CEP: 12307-000 – Jacareí - SP – Brasil

Telefone: (12)3947-4853 - Email: guilhermeaugust777@gmail.com

*Telefone: (12) 3947-4853 - Email: fagneroc@gmail.com

³-Departamento de Química – Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Praça Mal. Eduardo Gomes, 50 – CEP: 12228-900 – São Jose dos Campos - SP – Brasil
Telefone: (12) 3947-4853 – Email: kamila@ita.br

⁴-Divisão de Química – Instituto de Aeronáutica e Espaço
Praça Mal. Eduardo Gomes, 50 – CEP: 12228-015 – São Jose dos Campos - SP – Brasil
Telefone: (12) 3947- 4497– Email: marciomyn@iae.cta.br

⁵-Divisão de Defesa – Instituto de Aeronáutica e Espaço
Praça Mal. Eduardo Gomes, 50 – CEP: 12228-015 – São Jose dos Campos - SP – Brasil
Telefone: (12) 3947- 4758– Email: herve.riette@gmail.com

RESUMO: *Spray-cooling* tem se apresentado como uma técnica eficiente no preparo de materiais particulados, visto que possui baixo custo, boa reprodutividade e controle da distribuição de tamanhos e morfologia. Contudo, diversos parâmetros precisam ser estudados e controlados de modo que o resultado esperado seja alcançado. O projeto tem como objetivo desenvolver a calibração das variáveis do processo visando a análise computacional do comportamento da pressão exercida no bocal de atomização do spray. O processo das simulações será realizado pelo código de fluidodinâmica computacional (CFD - Computational Fluid Dynamics) OpenFOAM para obtenção dos dados numéricos e visuais.

PALAVRAS-CHAVE: *Spray-cooling*; pressão de aspiração; bocal de atomização; fluido dinâmico.

ABSTRACT: *Spray-cooling* has emerged as an effective technique in the preparation of particulate matter, as it has a low cost, good reproducibility and control of the size distribution and morphology. However, many parameters need to be considered and controlled so that the expected result is achieved. The project aims to develop the calibration of process variables aiming at computational pressure behavior analysis performed at nozzle spray. The process of the simulations will be carried out by computational fluid dynamics code (CFD) OpenFOAM to obtain the numerical and visual data.

KEYWORDS: *Spray-cooling*; aspiration pressure; atomizing nozzle; *spray* computational fluid dynamics.

1. INTRODUÇÃO

Diversas técnicas podem ser aplicadas para o preparo de materiais particulados dentre eles a técnica de cristalização por emulsão [1], sol-gel, microemulsão, precipitação [2], spray-cooling [3] entre outros. O Spray-cooling ou spray-chilling é um método de preparo de partículas por atomização, na qual o líquido fundido é injetado por gravidade no interior de uma câmara através do tubo central do atomizador. O fluido é atomizado devido ao ar comprimido que é expelido à alta velocidade e “quebra” o líquido em pequenas gotas. O Spray-Cooling possui um ventilador que circula ar frio em seu interior, responsável por resfriar e solidificar as gotas [4].

Este método permite boa reprodutividade dos resultados, baixo custo e alta eficiência [5]. No entanto, muitas variáveis físicas e químicas do processo podem interferir na distribuição de tamanhos de partículas o que exige um cuidadoso controle durante o preparo das partículas.

Simulações de fluidodinâmica computacional (CFD) são usadas para obtenção de dados numéricos a cerca de eventos que apresentam escoamento. Testes experimentais e simulações de CFD se relacionam diretamente uma vez que os experimentos validam as simulações, e essas, por sua vez, reduzem a quantidade necessária de experimentos e análises [6].

O estudo da técnica de *spray-cooling* utilizando ferramentas computacionais tem como finalidade diminuir os procedimentos experimentais e facilitar a compreensão de partes específicas do equipamento, principalmente o bico de atomização que apresenta influências no processo dependendo das características físico-químicas do fluido e do equipamento.

Sanjay e colaboradores avaliaram o efeito de aspiração no bocal de injeção do spray durante o processo de atomização de metais fundidos, mostrando em seu estudo que o evento depende da pressão do ar e do

comprimento do diâmetro por onde ele é injetado [7].

Hao Liu e colaboradores utilizaram CFD para estudar a aerodinâmica presente nas asas dos insetos e comparar com o mecanismo utilizado na produção de aeronaves [8]. Assim como Hamid Montazeri et al. estudaram a aplicação de CFD para simular a evaporação de gotículas de água em sistemas de pulverização [9], Muzammil Ali e outros avaliaram o processo de secagem de detergente na produção de detergente em pó [10] dentre outros.

Diante disso, esta pesquisa tem como objetivo utilizar a simulação computacional por CFD para estudar o processo de atomização de um líquido pela técnica de spray cooling e avaliar os efeitos causados pela pressão do ar injetado (efeito de aspiração/ pressurização) parâmetro de suma importância no processo e que modifica o resultado final da atomização.

Para isso primeiramente faz se necessário calibrar todos os parâmetros físicos do equipamento que influenciam na morfologia e na distribuição de tamanhos de partículas, resultados que serão aqui explanados. Estudos futuros serão desenvolvidos visando simulações computacionais que serão realizadas por CFD através do *Open source Field Operation And Manipulation* (OpenFOAM) [11].

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar o estudo proposto, foi utilizado um equipamento de Mini *Spray Dryer* da Büchi (*B-290*) conforme Figura 1. Água e cera de parafina (LOTE: 0314/497) foram os materiais utilizados durante a calibração.



Figura 1. Mini Spray Dryer utilizado no estudo.

2.1 Calibração da Vazão do Líquido

A calibração da vazão volumétrica e da perda de carga da seção responsável pela injeção de fluido na câmara de combustão foi conduzida inicialmente com água e, posteriormente, estendida para a parafina fundida. O líquido no reservatório flui através do tubo de injeção e é introduzido na saída do atomizador, conforme ilustra a Figura 2.

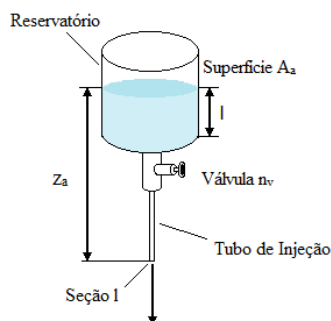


Figura 2. Representação esquemática da seção de injeção do líquido.

O reservatório é inicialmente preenchido com líquido e, com o auxílio de uma régua, são fixadas quatro diferentes cotas (z_a). Com um cronômetro, mediu-se três vezes o tempo de escoamento (Δt) para cada cota z_a e para cada número de voltas de abertura de válvula (nv) fixadas. Com os valores coletados, a vazão volumétrica (Φ_a) foi calculada a partir da altura do líquido deslocado (Δl) e da área (A_a) do reservatório, conforme a Equação 1:

$$\Phi_a = \frac{A_a \cdot \Delta l}{\Delta t} \quad (1)$$

A velocidade do líquido (v) foi calculada a partir da Equação 2, que foi deduzida com base na equação da continuidade para fluidos incompressíveis (líquidos). A área da seção de saída do tubo injetor é representada por (A_l):

$$v = \frac{\Phi_a}{A_l} \quad (2)$$

Considerando a aceleração da gravidade (g) como $9,81 \text{ m/s}^2$ e a velocidade calculada na Equação 2, é possível determinar a perda de carga (lw) utilizando-se a Equação 3, deduzida a partir da equação de Bernoulli:

$$lw = \frac{v^2}{2} * \left(1 - \frac{Dl^2}{Da^2}\right) - (-g * z_a) \quad (3)$$

Em que Dl é o diâmetro do tubo de injeção, Da é o diâmetro do reservatório do spray e z_a é a altura da superfície do líquido até a saída do tubo de injeção.

2.2 Calibração da Vazão do Ar Comprimido

A calibração do rotâmetro, que mede a vazão de ar comprimido injetado pelo *Twin-Fluid Atomizer*, consiste em determinar uma correlação mais precisa entre a vazão mássica de ar comprimido e as marcações do rotâmetro. Para isso, o ar comprimido proveniente do equipamento é direcionado para o interior da proveta, deslocando para fora da proveta a água em seu interior. Além do volume deslocado e do tempo de deslocamento, a altura de desnível da água h também deve ser considerada, conforme a Figura 3.

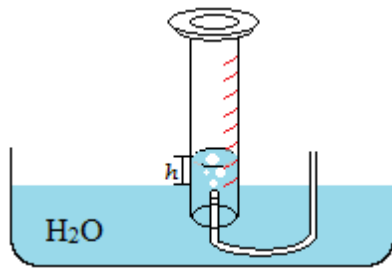


Figura 3. Calibração do Rotâmetro.

Com o auxílio de um cronômetro, um manômetro e um termômetro determinou-se o tempo de coleta Δtp , a pressão Pp e a temperatura Tp dentro da proveta, respectivamente, para cada marcação do rotâmetro. Com uma régua, foi medido a altura h e o volume de ar deslocado Vp . Adotando a constante universal dos gases $R = 287,0530 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, foi possível determinar a vazão mássica (Wg) por meio da Equação 4:

$$Wg = \left(\frac{Pp}{R \cdot Tp} \right) * \frac{Vp}{\Delta tp} \quad (4)$$

2.3 Calibração da Vazão do Ar Frio

Para a calibração do ar ventilado, o rotâmetro e a válvula de injeção do líquido são mantidos desligados. A velocidade de saída do ar (vs) e a temperatura no interior da câmara (Tc) para diferentes valores de ajuste da potência do ventilador são obtidos através de um anemômetro e um termômetro digital, respectivamente. A pressão interna da câmara (Pc) foi medida por meio de um manômetro diferencial digital.

A pressão do ar na saída do equipamento (Ps) foi assumido como sendo igual a pressão atmosférica ($Patm$) na Equação 5. A velocidade do ar (vso) na seção (So), vide Figura 3, é dada por:

$$vso = \left(\frac{Ps}{Pc} \right) * vs \quad (5)$$

A potência do ventilador (np) pode então ser determinado através da Equação 6:

$$np' = \frac{Pc}{R \cdot Tc} * \frac{vso^2}{2} - Pc + Patm \quad (6)$$

A perda de carga do ar (lw) no cone separador foi calculada pela Equação 7:

$$lw = -np - \frac{Ps}{R \cdot Tc} * \frac{vs^2}{2} \quad (7)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Visando a produção de partículas por Spray-Cooling e o estudo por CFD do processo de atomização, é de suma importância calibrar todas as etapas e variáveis do processo. Com base nisso, os resultados de calibração da vazão volumétrica de injeção de líquido e da perda de carga pela seção de injeção do líquido, conforme descrito no item 2.1, estão ilustrados nas Figuras 4 e 5:

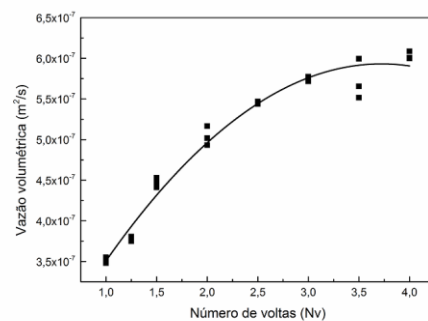


Figura 4. Correlação do número de voltas na válvula com a vazão volumétrica.

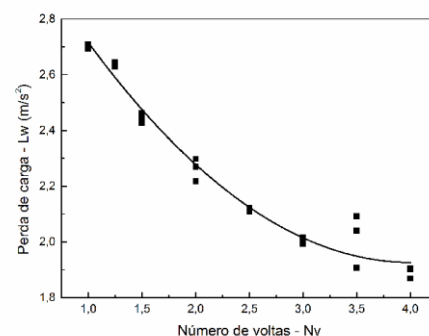


Figura 5. Correlação do número de voltas da válvula com a perda de carga.

É possível observar na Figura 4 que a correlação da vazão volumétrica com a abertura da válvula apresenta um

comportamento crescente uniforme e contínuo, tendendo a se tornar constante a partir de 3,5 voltas, ou seja, o gráfico demonstra que com o aumento do número de voltas da válvula a passagem do líquido é facilitada de modo a aumentar a vazão volumétrica. A correlação da perda de carga com a abertura da válvula também apresenta um comportamento uniforme e contínuo, porém decrescente como resultado da redução da perda de carga com a abertura da válvula, conforme ilustra a Figura 5, pode-se considerar que com a facilitação da passagem do líquido com o aumento do número de voltas da válvula a perda de carga é reduzida. Dessa forma, é possível, ainda, determinar que o aumento da vazão volumétrica se relaciona inversamente com a perda de carga no sistema analisado.

Os resultados da calibração da vazão mássica de ar comprimido no atomizador, descrito no item 2.2, estão representados no gráfico da Figura 6.

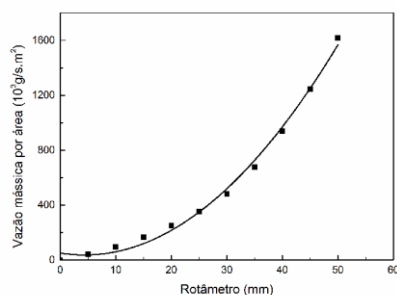


Figura 6. Correlação da marcação do rotâmetro com a vazão mássica/área.

Analisando o gráfico da Figura 6, observa-se que há um aumento exponencial da vazão mássica do ar comprimido com o aumento da vazão na marcação do rotâmetro, o que também trata-se de um resultado já esperado visto que o aumento da vazão na marcação do rotâmetro possibilitaria uma maior passagem do ar. A partir desses dados são determinadas a vazão volumétrica e a velocidade do ar comprimido no atomizador, que são de extrema importância para a determinação da influência do ar comprimido na formação do spray, uma vez que esses

parâmetros são necessários e analisados no estudo da fluido dinâmica computacional realizado em seguida mas não apresentados neste trabalho.

Uma vez calibrados a seção denominada de tundish, que é responsável pela injeção de líquido e a seção denominada de atomizer que é responsável pela injeção de ar comprimido no sistema; é de suma importância também avaliar a injeção de ar refrigerado responsável pela solidificação das gotículas atomizadas na seção conhecida por chamber. Com isso, os resultados da calibração do ventilador e do ciclone separados, descritas no item 2.3, estão representados nas Figuras 7 e 8.

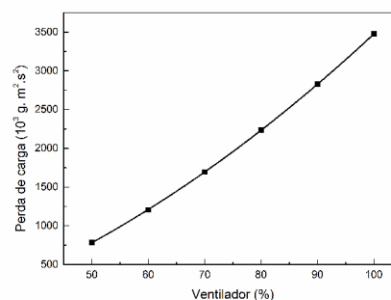


Figura 7. Correlação da velocidade do ventilador com a perda de carga.

É possível observar na Figura 7 que a perda de carga no ciclone separador aumenta com o aumento no fluxo de ar ventilado na câmara de atomização. Esse comportamento é esperado e largamente estudado [12]. Porém, a potência do ventilador calculado a partir da perda de carga e da velocidade do ar na saída do equipamento resultou na Figura 8.

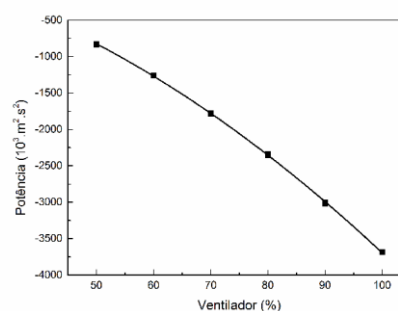


Figura 8. Vazão de ventilação x Potência.

A potência do ventilador deveria ser crescente, pois há um aumento da perda de carga e da velocidade de saída do ciclone separador com o aumento na vazão de ar ventilado. Essa discrepância ocorreu ao considerar que a potência transmitida pelo ventilador para o ar ventilado (ou eficiência) fosse constante e independente da pressão na câmara de atomização. Porém, os resultados mostraram que a eficiência da transferência da potência do ventilador para o ar aumenta com o aumento da resistência oferecida pelo ciclone separador

A partir desses resultados, a determinação da potência passou a ser considerada para diferentes pressões da câmara ou resistência ao fluxo pelo ciclone.

Com base nas calibrações realizadas do aparelho para os testes experimentais, pode-se dar início aos estudos da simulação computacional da ação do equipamento de Spray-Cooling.

4. CONCLUSÃO

Diante disso é possível concluir que as calibrações de cada seção do equipamento foram bem sucedidas e, a partir desses resultados, serão levantados modelos semi-empíricos que irão compor um simulador para o equipamento e para o processo. Além disso, esses dados permitirão caracterizar a formação de partículas quanto à dependência do tamanho e da morfologia com as vazões do líquido e do ar comprimido.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, por disponibilizar a bolsa PIBIC; a AEB por fornecer recursos para a compra do Mini Spray Dryer.

6. REFERÊNCIAS

[1] CARDOSO, K. P.; KAWACHI, E. Y.; ARAUJO, T. B.; NUNES, R. F.;

NAGAMACHI, M. Y. Thermogravimetric Analysis of the Decomposition of a Paraffin Particle/HTPB Fuel Grain for Hybrid Rocket Motors. *SciTech2015, AIAA*.

[2] TEIPEL, U. Particle technology: Design of particulate products and dispersed systems. *Chem. Eng. Technol.*, vol. 27, no. 7, pp. 751–756, 2004.

[3] MASCHKE, A.; BECKER, C.; EYRICH, D.; KIERMAIER, J.; BLUNK, T. and GÖPFERICH, A. Development of a spray congealing process for the preparation of insulin-loaded lipid microparticles and characterization thereof. *Eur. J. Pharm. Biopharm.*, vol. 65, no. 2, pp. 175–87, Feb. 2007.

[4] ASHGRIZ, N. *Handbook of Atomization and Sprays*, vol. XXXIII, no. 2. Toronto, 2011.

[5] JUNIOR, F. E. de. “Desenvolvimento, caracterização e aplicação de microcápsulas de ácido ascórbico obtidas por spray chilling,” 2013.

[6] ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. *Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e aplicações*. Mcgraw-hill Brasil, 2008.

[7] SANJAY, P.; SRINIVASA, T. N.; Effect of Aspiration Pressure on Convergent Nozzle Employed for Gas Atomization of Liquid Metals.

[8] LIU, H.; ELLINGTON, C. P.; KAWACHI, K.; BERG, C. V. D.; WILLMOTT, A. P.; A computational fluid dynamic study of hawkmoth hovering. *The Journal of experimental biology* 1998 vol. 201 pp. 461–77.

[9] MONTAZERI, H.; BLOCKEN, B.; HENSEN, J.L.M. CFD analysis of the impact of parameters on evaporative cooling by a mist



spray system. Applied Thermal Engineering
75 (2015) pp. 608-622.

[10] ALI, M.; MAHMUD, T.; HEGGS, P.J.;
GHADIRI, M.; BAYLY, A.; AHMADIAN,
H.; JUAN, L.M.; CFD Simulation of a
Counter-Current Spray Drying Tower with
Stochastic Treatment of Particle-Wall
Collision. Procedia Engineering 102 (2015)
pp. 1284-1294.

[11] GREENSHIELDS, C. J.; OpenFOAM-
The Open Source CFD Toolbox – User Guide.
CFD Direct Ltd (2015).

[12] HOFFMANN, A. C. and STEIN, L. E.
Gas Cyclones and Swirl Tubes, Second. 2007.