

MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO DE PARTÍCULAS DE PARAFINA POR SPRAY COOLING

G. A. Pereira¹; F. O. Cardoso¹; K. P. Cardoso²; M. Y. Nagamachi³

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

Telefone: (123947-4853 - Email: guilhermeaugust777@gmail.com

2- 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

3- Divisão de Química – Instituto de Aeronáutica e Espaço

Praça Mal. Eduardo Gomes, 50 – CEP: 12228-900 – São Jose dos Campos - SP – Brasil

Telefone: (12) 3947- 4497– Email: marciomyn@iae.cta.br

RESUMO: O uso de partículas de parafina com morfologias esféricas em grãos propelentes de motores híbridos, tem sido uma excelente solução para os problemas encontrados em grãos de parafina maciços, pois estes apresentam fracas propriedades mecânicas e também sofrem com derretimento durante o processo de queima do motor por irradiação de calor. Uma das técnicas utilizadas para a produção de partículas é a de Spray-Cooling, essa técnica pode ser definida como atomização de um fluido que após a refrigeração solidifica as gotas transformando em partículas. O objetivo desse projeto é desenvolver a modelagem computacional de um processo de produção de partículas por Spray-cooling avaliando todas as variáveis do processo. Para melhor compreensão da modelagem, a mesma foi estudada por seções denominadas Tundish, responsável pela injeção da parafina no spray, Atomizer seção em que ocorre a atomização e Chamber que é responsável pela solidificação das partículas.

PALAVRAS-CHAVE: Parafina; Partículas; Spray-cooling; Modelagem computacional.

ABSTRACT: The use of wax particles with spherical morphologies in propellant grain of hybrid engines have been an excellent solution to the problems encountered in massive Paraffin grains because they have poor mechanical properties and also suffer from melting during the engine firing process by radiant heat. One of the techniques used for the production of particles is the spray-cooling, this technique can be defined as an fluid atomization that after cooling solidifies the droplets turning them into particles. The objective of this project is to develop computational modeling of a particle by spray-cooling production process evaluating all the process variables. For a better understanding of the modeling, it was studied by sections called Tundish, responsible for injecting the paraffin spray, Atomizer, section in which atomization occurs and Chamber which is responsible for solidification of the particles.

KEYWORDS: Paraffin, Particles; Spray- cooling; Computational modeling

1. INTRODUÇÃO

O Spray-Cooling é uma técnica utilizada na produção de partículas de um dado material, e baseia-se na quebra de um líquido em gotículas, e sua solidificação [1]. Para o caso em estudo, cera de parafina foi inserida no equipamento de spray-cooling, onde foi fundida e injetada em um tubo de atomização.

Ao final do percurso, a parafina líquida se choca com ar comprimido injetado a velocidades quase sônicas através de um bocal convergente, formando gotículas de parafina. No interior da câmara de atomização, ar frio é circulado por um ventilador acoplado a câmara, o qual realiza a solidificação das partículas.

Para facilitar a compreensão do estudo proposto, o mesmo foi dividido em seções. O Tundish é a seção do reservatório de fluido (parafina), o controle da vazão da mesma é feita através de uma válvula e tem como uma dos parâmetros a serem estudados a vazão de líquido. Atomizer, é a seção que estuda a injeção de ar durante a atomização, isso porque o ar injetado é controlado por um rotâmetro acoplado ao equipamento spray. Por fim o Chamber, que é o segmento responsável pela solidificação das partículas produzidas.

O objetivo deste projeto é a extração de todas as variáveis atuantes em cada segmento para que, com seu estudo, seja realizada a modelagem do sistema e desenvolvido um simulador que possa reproduzir com fidelidade o equipamento spray.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a modelagem e simulação do processo foram empregados os seguintes equipamentos e materiais:

- Parafina Petrobrás (LOTE: 0314/497)
- Processador AMD E-350 com Windows 7 service Pack 1
- Microsoft Visual Studio 2013
- Mini Spray-Dryer Buchi, modelo B-290
- Circulador de ar frio Buchi, modelo B-296
- Acessório Tundish da Buchi
- Circulador térmico Optherm

O equipamento Mini Spray-Dryer Büchi foi modelado em três seções, sendo elas Tundish, Atomizer e Chamber. Nesse artigo trataremos dos principais parâmetros utilizados para a modelagem de cada sub sistema bem como a finalização do simulador e seu comparativo com resultados experimentais. A Figura 1 demonstra a configuração dos equipamentos utilizados.

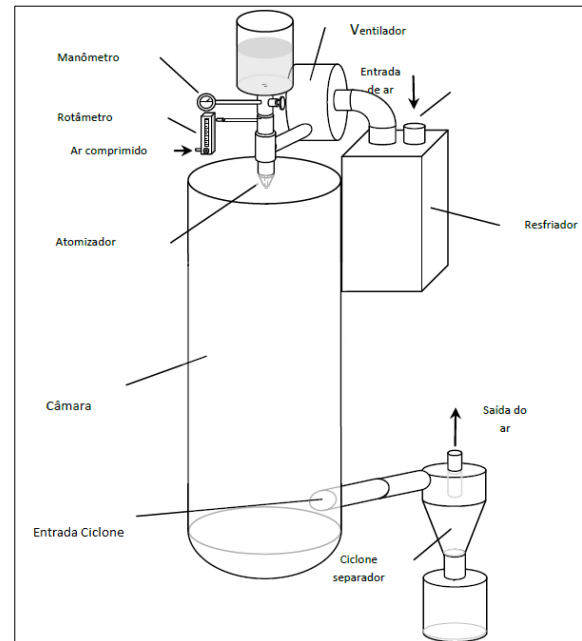


Figura 1. Equipamento Spray e seus acessórios

2.1 Modelagem do Sistema de Injeção

O sistema de injeção ou tundish é compreendido pela válvula de injeção do líquido, o tubo de injeção, o reservatório de alimentação e o banho térmico responsável por manter a temperatura do líquido a ser atomizado constante com mostra a Figura 2.

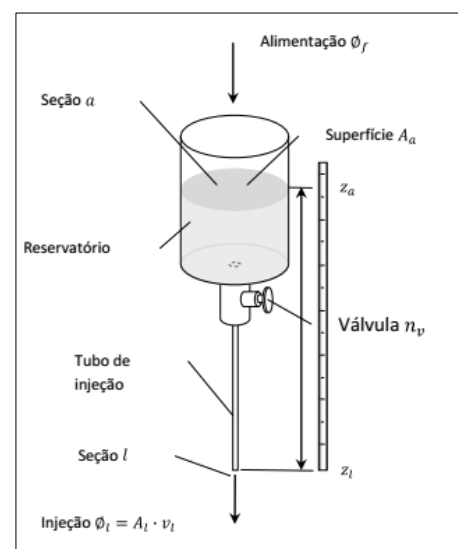


Figura 2. Ilustração da seção Tundish.

O líquido sai da boca de alimentação por gravidade e sua vazão é afetada pelo ar comprimido que é ejetado no bocal do atomizador, devido a duas pressões internas (que agem a favor e contra o escoamento do líquido) tem-se o efeito de pressurização/aspiração. Durante a saída do fluido, o mesmo colide com um fluxo de ar ejetado a altas velocidades e se quebra formando um spray.

O parâmetro mais relevante para a modelagem do Tundish é a vazão de líquido ϕ_l (Equação 1), onde nela estão agindo o coeficiente da válvula de injeção C_v , o nível de parafina fundida no reservatório z_b a densidade da parafina ρ_l , a pressão do líquido P_b e a pressão na superfície do líquido P_l [2].

$$\phi_l = C_v \cdot \sqrt{2 \cdot \left(\frac{P_b - P_l}{\rho_l} + g \cdot z_b \right)} \quad (1)$$

2.2 Modelagem do Sistema de Atomização

Nessa seção está localizado o atomizador e o rotâmetro do equipamento, que tem como objetivo controlar a entrada de vazão de ar no atomizador por meio de uma válvula. O ar comprimido injetado é expandido e acelerado ao passar por um bocal convergente localizado na extremidade do atomizador, esta configuração proporciona uma velocidade quase sônica ao ar [4]. Esse tipo de atomizador utilizado é chamado de duplo-fluido assistido, a Figura 3 demonstra os componentes dessa seção.

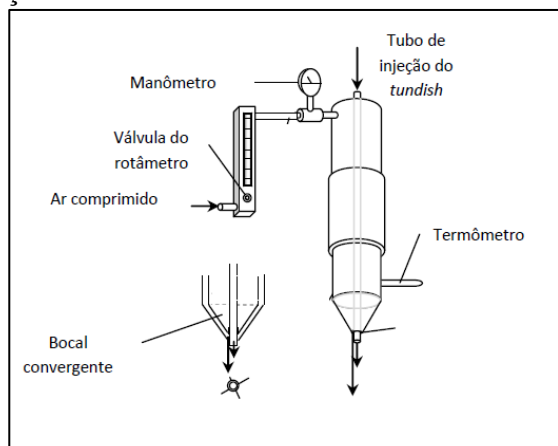


Figura 3. Ilustração da seção Atomizer.

A velocidade do ar pode ser calculada de acordo com a Equação 2, onde k é a constante universal do ar, T_o é a temperatura de estagnação do ar no atomizador, R é a constante universal dos gases e Ma é o valor de Mach [3].

$$V_g = Ma \cdot \left(\sqrt{\frac{k \cdot R \cdot T_o}{1 + \frac{k-1}{2} \cdot Ma^2}} \right) \quad (2)$$

Outro parâmetro importante a ser calculado nesta seção é a vazão mássica de ar, que pode ser obtida através do produto da Equação 1 pela densidade do ar injetado e pela área da seção por onde o ar passa na atomização. Após rearranjada a equação pode se chegar a uma expressão encontrada na literatura [4] como a Equação 3:

$$W_g = A_g \cdot \sqrt{\frac{k}{R}} \cdot \frac{P_o}{\sqrt{T_o}} \cdot \frac{Ma}{\left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot Ma^2 \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}} \quad (3)$$

2.3 Modelagem da Câmara de Atomização

Na seção da câmara de atomização foi estudado o comportamento da pressão da câmara que influencia na injeção de líquido e a temperatura como visto anteriormente. A temperatura é importante para a formação das partículas de parafina, pois após serem desenvolvidas na atomização elas se chocam com o ar frio gerado pelo ventilador, e em decorrência disso se solidificam. O ar gerado pelo ventilador também serve para levar as partículas ao ciclone separador, onde as partículas dispersas e secas são recolhidas (Figura 1).

Para determinar a pressão na câmara foi realizado o balanço de energia, ocorrido na mesma pela contribuição do ar frio ventilado, ar aquecido injetado durante a atomização, saída de ar na câmara e pelo calor transferido pelas partículas fundidas. Após algumas operações matemáticas pode se chegar a Equação 4, em que R é a constante universal dos gases $288 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, T_g é a temperatura

do ar comprimido injetado 396 K, T_v é a temperatura do ar do ventilador 294 K, V_c volume da câmara 0,01 m², W_g vazão em massa de ar comprimido, W_v é vazão em massa do ar do ventilador, W_l é a vazão em massa do líquido injetado, λ_l o calor de fusão da parafina e C_p é a capacidade calorífica do ar 1000 J/(kg.K).

$$\frac{dP_c}{dt} = \frac{R}{V_c} \cdot (W_v \cdot T_v + W_g \cdot T_g - W_{so} \cdot T_c + \frac{W_l \lambda_l}{C_p}) \quad (4)$$

Para se determinar a temperatura da câmara foi realizado o balanço de massa e pode ser obter a Equação 5:

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{R \cdot T_c}{P_c \cdot V_c} \cdot [W_v \cdot (T_v - T_c) + W_g \cdot (T_g - T_c) + \frac{W_l \lambda_l}{C_p}] \quad (5)$$

2.4 Desenvolvimento do simulador

O simulador foi desenvolvido utilizando o ambiente visual studio 2015 aplicando a linguagem de programação visual basic, em conjunto com as equações obtidas nas modelagens das seções do equipamento (seção 2.1 – 2.3).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os principais parâmetros das seções descritas do equipamento foram validados através do simulador.

3.1 Validação do sistema de injeção

Durante a análise dessa seção foi descoberta a ocorrência de um efeito de aspiração e pressurização, que é decorrência da formação de vórtices que afetam a pressão e modificam o perfil de escoamento do ar na saída do tubo de injeção. O atomizador já está preparado para trabalhar com o efeito de aspiração, que é causado pela passagem de ar a altas velocidades em torno do bocal de saída do tubo de injeção, este efeito de aspiração tende a facilitar o escoamento do líquido.

No entanto, a pressão do tubo pode ser maior do que a pressão atmosférica a baixas

vazões de ar, causando um efeito contrário a este escoamento, aqui denominado de pressurização. A Equação 6 correlaciona este efeito de aspiração e pressurização representado pela diferença de pressão de aspiração e pressurização (ΔP_{ea}) com o número de Mach (Ma) que descreve a velocidade de saída do ar comprimido no bocal de alimentação. Todos os testes experimentais foram realizados em triplicata e calculados os respectivos desvios.

$$\Delta P_{ea} = \rho_l \cdot g \cdot z_a - \frac{\rho_l}{2} \cdot \left(\frac{\phi_l}{C_v} \right)^2 - \Delta P_c \quad (6)$$

A Figura 4 demonstra o efeito de aspiração e pressurização para diferentes fluidos, os diferentes comportamentos se devem as características físico-químicas dos materiais.

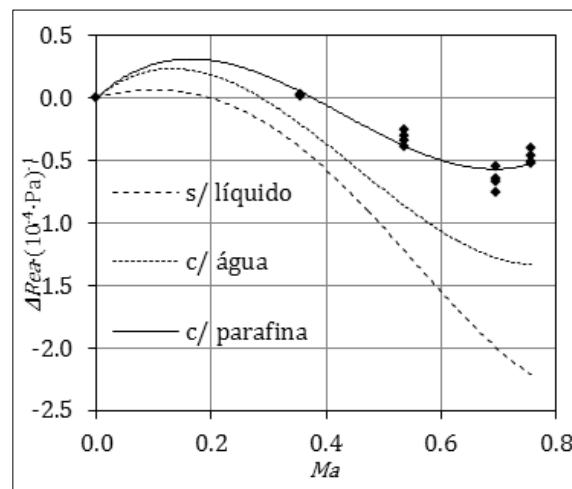


Figura 4. Correlação do efeito de aspiração/pressurização com o número de Mach.

Após a ocorrência deste efeito a Equação 6 foi adequada para satisfazer esta circunstância, inserindo agora a pressão da câmara P_c e a pressão de aspiração P_{ea} , conforme Equação 7.

$$\phi_l = C_v \cdot \sqrt{2 \cdot \left(g \cdot z_a - \frac{\Delta P_c + \Delta P_{ea}}{\rho_l} \right)} \quad (7)$$

A Figura 5 mostra a validação dos dados experimentais com os dados computacionais

gerados através da Equação 7. Observa-se que há uma dispersão de dados próximos, conforme esperado.

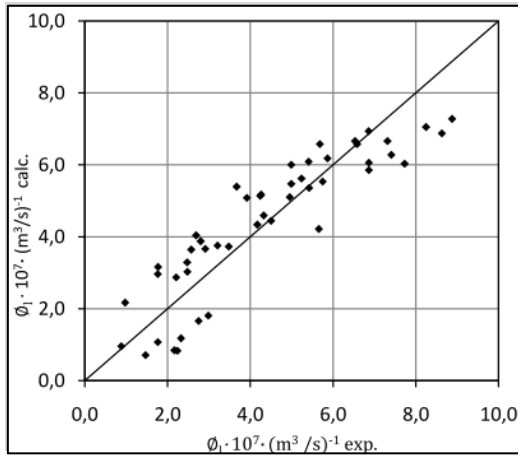


Figura 5. Correlação de valores calculados e experimentais

3.2 Validação do sistema de atomização

Após realizados métodos experimentais no Mini-Spray puderam ser levantados valores de vazão mássica, e com isso foi montada uma correlação com os valores de W_g calculados pela Equação 3 e os medidos experimentalmente como mostra a Figura 6:

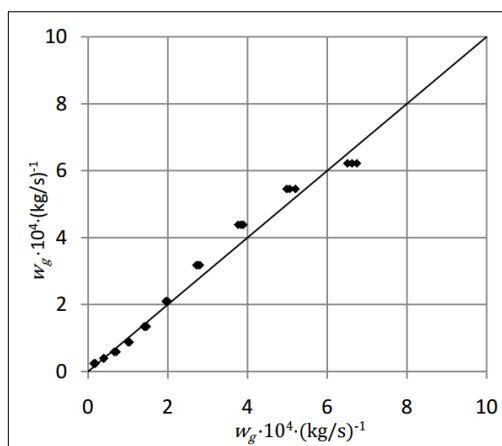


Figura 6. Correlação de dados experimentais e calculados da vazão de gás

3.3 Validação do sistema da Câmara

A validação da modelagem foi realizada correlacionando os valores de pressão (Pc) e temperatura (Tc) calculados com os valores

obtidos experimentalmente como mostram a Figura 7 e 8:

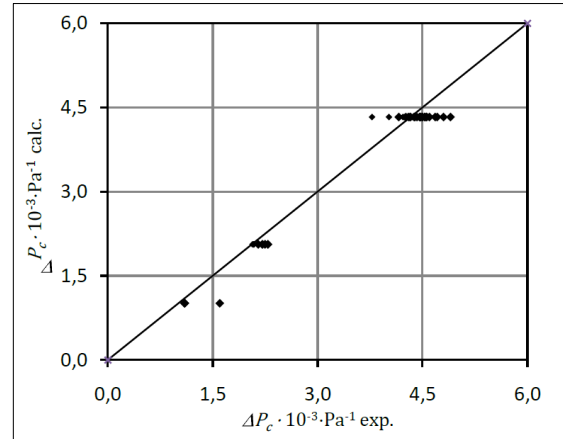


Figura 7. Correlação de dados de Pressão Pc calculado e experimental.

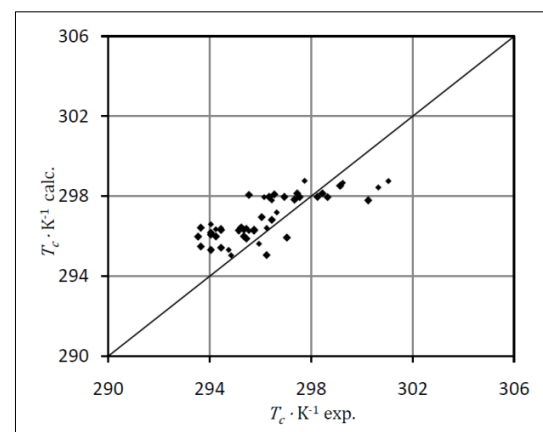


Figura 8. Correlação de dados Temperatura Tc experimental e teórico.

3.4 Validação do simulador de tamanho de partícula

O resultado final da modelagem do equipamento é referente aos valores de tamanho de partícula, ou diâmetros médio de Sauter [5] [6], que foram calculados através do simulador elaborado e comparados aos dados experimentais. A correlação é mostrada na Figura 9.

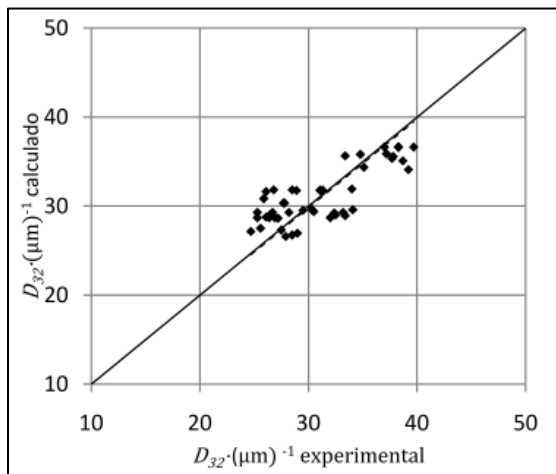


Figura 9. Correlação de valores calculados e experimentais

Os pontos obtidos na Figura 9 se distribuem uniformemente em torno da reta com 45° de inclinação, o que indica que o modelo fornece valores médios obtidos para o sistema. Embora esses pontos apresentem certa dispersão em relação a essa reta, isso se deve ao erro experimental embutido e a dificuldade de caracterização dos diâmetros através do método de espalhamento da luz laser utilizado neste trabalho.

3.5 Simulador do equipamento

Com o término da modelagem do equipamento pode ser realizado software responsável pela simulação, o mesmo pode reproduzir todos os parâmetros da máquina e também os efeitos resultantes do processo.

Foram utilizadas lógicas de programação de modo a deixar o software prático e de fácil aplicação para o usuário.

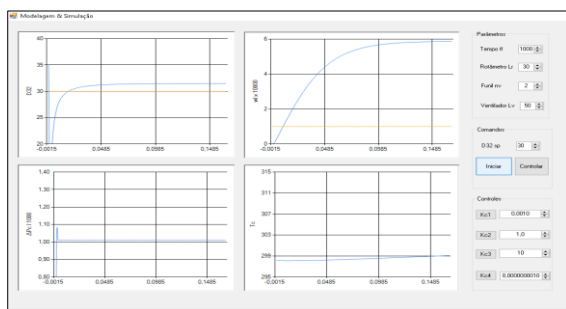


Figura 10. Interface do simulador do equipamento spray

4. CONCLUSÕES

Após todo o estudo do equipamento e suas variáveis, foi desenvolvido um simulador que trabalha com os parâmetros físicos do equipamento Mini Spray-Dryer Büchi, modelo B-290, gerando como resultado tamanho de partícula. Estudos mais aprofundados devem ser realizados com intuito de incrementar elementos de controle ao software para se obter uma otimização do processo de produção de partículas de parafina por Spray.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, por disponibilizar a bolsa PIBIC; ao IAE por disponibilizar o espaço para estudos e pela possibilidade de fazer iniciação científica e a AEB por fornecer recursos para a compra do Mini Spray Dryer.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Hoffman, A. C., Stein L. E. (2002). Gas Cyclones and Swirl Tubes: Principles, Design, and Operation. New York: Springer-Verlag., pag. 60.
- [2] Crowe, C. T. (2006). Multiphase Flow Handbook. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, págs. 8-13 a 8-14.
- [3] Balachandran, H. (2006). Fundamentals of Compressible Fluid Dynamics. Delhi: Prentice Hall India Ltd
- [4] Shapiro, A. H. (1953). The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow. New York: The Ronald Press Co
- [5] Lefebvre, A. H. (1989). Atomization and Sprays. New York: Taylor & Francis., pag. 136.
- [6] Ashgriz N. Handbook of Atomization and Sprays [Book]. - New York : Springer Science, 2011.