



Leito fluidizado pulsado: uma revisão bibliográfica

PULSED FLUIDIZED BED: A REVIEW

Virgínia Sescatto Gusso*, Maria Regina Parise†,

Willian Eduardo Barbosa de Jesus‡

RESUMO

Processos que utilizam leito fluidizado requerem uma mistura sólido-fluido adequada, porém, muitas vezes, isto não é possível, como geralmente ocorre nos processos de recobrimento e secagem de partículas, que devido à elevada quantidade de umidade daquelas no interior do leito, pode ocorrer o surgimento de canais preferenciais. Por outro lado, adição de ar pulsado em leito fluidizado tem se mostrado efetiva na redução de canais preferenciais em leito, e também para melhorar a qualidade da fluidização de partículas do Grupo C de Geldart. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é realizar uma revisão bibliográfica sobre aplicação de ar pulsado em leito fluidizado gás-sólido utilizando válvula solenóide. Verificou-se que a maioria dos trabalhos encontrados na literatura realizou ensaios experimentais utilizando partículas coesivas, uma vez que esse tipo de material tende a formar aglomerados mais facilmente. De maneira geral, os pesquisadores observaram que a pulsação promove a homogeneidade do leito, e por consequência, separa os aglomerados de maneira mais efetiva. Além disso, verificaram uma redução na velocidade de mínima fluidização, indicando que a fluidização se inicia mais rápido quando aplicada a pulsação.

Palavras-chave: leito fluidizado, pulsação, válvula solenóide.

ABSTRACT

Processes that use fluidized bed need an adequate solid-fluid mixture, however, this is often not possible, as it usually occurs in the coating and drying processes, due to the high amount of moisture inside the bed, can the emergence of preferred channels. On the other hand, the addition of pulsed air in a fluidized bed has been effective in reducing channeling in bed, and also to improve the fluidization quality of Geldart Group C particles. In this sense, the objective of this work is to carry out a review on the application of pulsed in a gas-solid fluidized bed using solenoid valve. It was found that most of the works in the literature are about experimental tests using cohesive particles, since this type of material tends to form agglomerates more easily. Overall, the researchers observed that pulsation promotes the homogeneity of the bed, and consequently, separates the agglomerates more effectively. Furthermore, they found a reduction in the minimum fluidization velocity, indicating that fluidization starts faster when pulsation is applied.

Keywords: fluidized bed, pulsation, solenoid valve.

1 INTRODUÇÃO

O leito fluidizado é uma operação onde ocorre a suspensão de sólidos finamente divididos, através dos quais se passa uma corrente ascendente de fluido a uma velocidade suficientemente alta para causar a flutuação e movimentação intensa das partículas. Essa operação possui maior eficiência de contato sólido-fluido,

* Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil; virginiagusso@alunos.utfpr.edu.br

† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa; parise@utfpr.edu.br

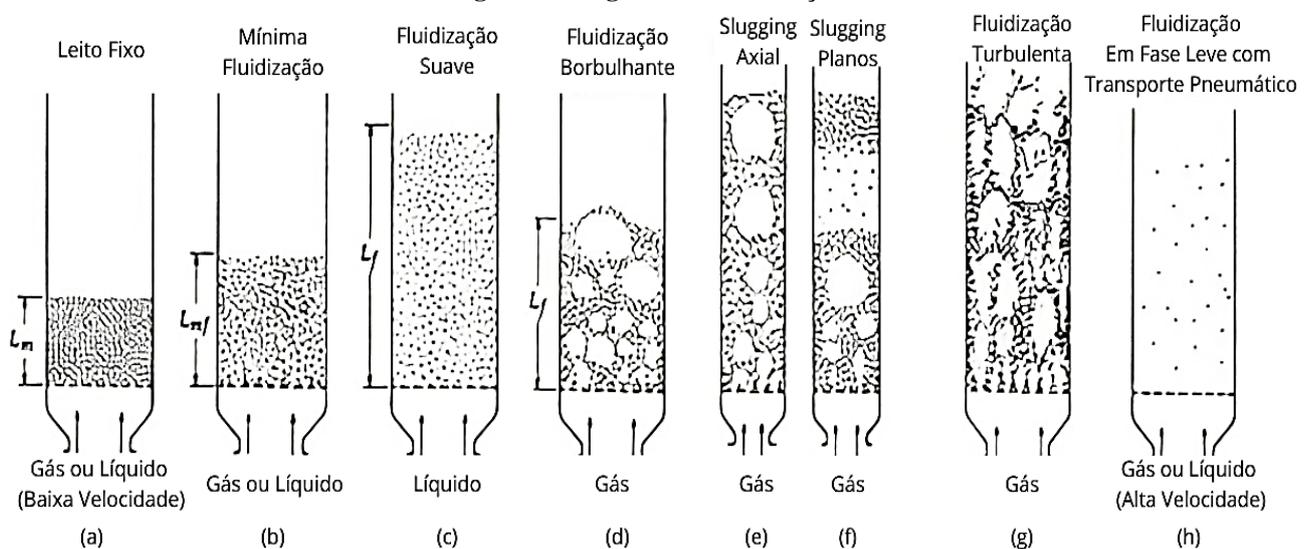
‡ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil; willianjesus@alunos.utfpr.edu.br

integrando processos de produção nas indústrias químicas, alimentícias, petrolíferas, entre outras (GOMIDE, 1983, p.238).

1.1 Fenômenos De Fluidização

O comportamento do leito fluidizado depende da velocidade, bem como das diversas propriedades dos sólidos e do gás. Quando um leito é mantido suspenso por um fluxo de fluido, esse pode apresentar vários regimes de fluidização, como mostra a Figura 1 (KUNII & LEVENSPIEL (1991, p.1); NITZ & GUARDANI (2008, p.5)).

Figura 1 – Regimes de Fluidização



Fonte: Adaptada de KUNII & LEVENSPIEL (1991)

Os regimes de fluidização são:

- **Leito fixo**: Ocorre quando um fluido de baixa velocidade percola entre os espaços vazios das partículas estacionárias de um leito de partículas, sem a movimentação dos sólidos, como mostra a Fig. 1 (a).
- **Leito expandido**: Ocorre quando há um aumento na velocidade do fluido e os sólidos começam a afastar-se. Alguns apresentam uma leve vibração em algumas regiões, como mostra a Fig. 1 (b).
- **Leito fluidizado**: Com o incremento na velocidade do fluido, alcança-se uma categoria onde todas as partículas estão suspensas, como observa-se na Fig. 1 (c), pois a soma das forças causadas pelo escoamento no sentido ascendente é igual ao peso de todas as partículas. Neste ponto, o leito é considerado fluidizado e a velocidade do gás neste estado é denominada velocidade de mínima fluidização. Um leito fluidizado opera entre a velocidade de mínima fluidização e a velocidade terminal de arraste.
- **Fluidização borbulhante**: Em maiores velocidades de fluido as agitações ficam mais intensas, assim como o movimento das partículas, como mostra a Fig. 1 (d). No caso de partículas com densidade inferior a $1,4 \text{ g/cm}^3$, observa-se uma expansão no leito, a qual antecede o surgimento de bolhas. No caso de partículas mais densas ($1,4 \text{ g/cm}^3 < \rho_s < 4 \text{ g/cm}^3$) não se obtém uma expansão do leito muito além da altura de mínima fluidização. Em alguns leitos com maior profundidade em colunas de diâmetro reduzido ocorre o



surgimento de *slugs*, que são grandes bolhas advindas da união de bolhas menores, e assim, o diâmetro dessas bolhas se torna equivalente ao diâmetro do leito, como mostra a Fig. 1 (e) e (f). Neste regime é possível observar um movimento pistonado e grandes oscilações na queda de pressão do gás.

- Fluidização turbulenta: Neste regime de fluidização, as partículas finas são fluidizadas com elevada velocidade de gás, excedendo assim a velocidade terminal dessas e fazendo com que haja o desaparecimento de bolhas e espaços vazios. Estes são substituídos por um movimento turbulento de aglomerados sólidos e por vazios de gás com diferentes formas e tamanhos, como podem ser observados na Fig. 1 (g).
- Fluidização rápida com transporte pneumático: Após o regime turbulento, é possível ter uma fluidização rápida realizando um incremento da velocidade do fluido, fazendo com que essa ultrapasse a velocidade terminal das partículas, como pode ser observado na Fig. 1 (h). Incrementando ainda mais a velocidade do fluido, os sólidos são arrastados para fora do leito, atingindo a condição de transporte pneumático.

1.2 Aplicabilidade de Ar Pulsado em Leito Fluidizado

Leito fluidizado é amplamente empregado na indústria, entretanto, essa operação apresenta algumas limitações ao utilizar produtos coesivos, como relatado por Souza et al. (2010) e Pavani (2016), portanto, questiona-se: há alguma maneira de operar tais produtos sem que haja a formação de canais preferenciais? Alguns autores obtiveram resultados satisfatórios ao empregar ar pulsado em leito fluidizado, pois é possível obter uma fluidização mais rápida e homogênea.

Leito pulso-fluidizado está relacionado com a pulsação intercalada de ar, o qual trabalha com a alternância da vazão de ar em estágios ativos (vazão positiva) e inativos (vazão nula). A adição de ar pulsado pode ser feita por válvula solenóide, válvula borboleta ou disco rotatório. Essa pulsação pode ser de baixa, intermediária ou alta frequência, e estes comportamentos são denominados respectivamente de fluidização intermediária, pistonada e normal. Em geral, os pesquisadores utilizam em seus experimentos frequências de pulsação na faixa de 0 a 15 Hz (NITZ & GUARDANI (2008, p.12); IRELAND et al. (2016, p.110); PAVANI (2016, p.21)). Como exemplos de aplicações de leitos fluidizados pulsados pode-se citar: a secagem de grânulos farmacêuticos porosos, produtos agrícolas, grânulos coesivos de polihidroxibutirato (ALI et al., 2016, p.1).

1.3 Fluxo Pulsado vs. Fluxo Contínuo

Algumas das vantagens em utilizar o leito fluidizado pulsado em comparação ao leito fluidizado de fluxo contínuo incluem a desaglomeração de pós ultrafinos e a possibilidade de trabalhar com partículas que apresentam maior distribuição granulométrica e irregularidades geométricas. Além disso, o leito fluidizado pulsado utiliza uma menor vazão de ar no início da fluidização em comparação com o leito convencional, minimiza a formação de canais preferenciais no leito e também, possui uma menor perda de carga durante o processo (NITZ & GUARDANI (2008, p.16); PAVANI (2016, p.22)).

1.4 Objetivo

O objetivo do trabalho em questão seria analisar a influência da pulsação e da velocidade de fluidização na secagem de materiais pastosos em leito fluidizado, a fim de estudar a possibilidade de evitar o surgimento de canais preferenciais decorrente ao excesso de umidade das partículas no interior do leito. Para o controle do ar pulsado, seria utilizada uma válvula solenóide. A parte experimental da pesquisa seria realizada no



Laboratório de Sistemas Particulados da UTFPR – Ponta Grossa, e por consequência da pandemia da COVID-19 não foi possível utilizar esse espaço físico. Portanto, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre leito fluidizado pulsado utilizando válvula solenóide.

2 MÉTODO

Foram realizadas buscas de artigos científicos, publicados de 2000 a 2021, na base de dados Periódico Capes, ELSEVIER, Hindawi, ResearchGate e ACS Publications. Para essa pesquisa foram utilizados os seguintes termos em português e inglês: leito fluidizado pulsado, válvula solenóide, pulsed fluidized bed, solenoid valve.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Zhang e Koksall (2006) investigaram o efeito da pulsação de ar na transferência de calor e na fluidodinâmica em leito fluidizado. Os autores realizaram seus experimentos em uma coluna de acrílico com 17 cm de diâmetro interno e 90 cm de altura. Para a pulsação do ar, os pesquisadores empregaram uma válvula solenóide de duas vias normalmente aberta, com frequência de pulsação de 0 Hz a 10 Hz. Como partícula, foi utilizado esferas de vidro com diâmetros médios de 37, 60, 160 e 700 μm e areia com diâmetros médios de 162 e 240 μm . Para as esferas de vidro de 60 μm , a qual é pertencente ao Grupo A de Geldart, os autores observaram um aumento no coeficiente de transferência de calor em relação ao fluxo contínuo de 17 a 33% quando operadas em frequências altas de pulsação (7 Hz e 10 Hz). Com isso, os autores concluíram que a pulsação é uma técnica promissora para promover o aumento na transferência de calor leito-superfície em um leito borbulhante.

Como supracitado, a pulsação de ar no leito aumenta o coeficiente de transferência de calor e por consequência, é possível melhorar a secagem de materiais, o que foi comprovado por Akhavan et al. (2009) em seus estudos que tinham como objetivo melhorar a secagem de grânulos farmacêuticos. Para isso, os pesquisadores utilizaram uma coluna de acrílico com 15 cm de diâmetro interno e 45 cm de altura e realizaram seus experimentos com 1 kg de material úmido (constituído de celulose, lactose e água) com densidade de 495 kg/m^3 . Para a pulsação de ar a 64 °C, os autores utilizaram uma válvula solenóide. O fluxo de ar era oscilado periodicamente durante 2 minutos a 3 Hz e, durante os próximos 2 minutos, permanecia constante. Inicialmente o leito apresentava uma altura de 13 cm e ao final passou para 8 cm. Os autores observaram um aumento na homogeneidade e mistura do material, e também na taxa de secagem.

Também com objetivo de estudar o comportamento fluidodinâmico do leito com adição de ar pulsado, Alamian et al. (2011) utilizaram em seus experimentos uma coluna de vidro com diâmetro interno de 0,11 m e altura de 0,50 m. Para a geração de ar pulsado no leito, foi empregado uma válvula solenóide com frequência de pulsação de 0,5 e 1 Hz. As partículas utilizadas foram o tetraborato decahidratado, cujo diâmetro médio de partículas era de 40 μm a 50 μm , e o sulfato de potássio, cujo diâmetro médio de partículas era 100 μm . A altura do leito fixo nos experimentos foi definida em 3 cm, e nos primeiros experimentos foi utilizada uma velocidade superficial do ar de 0,1 m/s. Com isso, os autores verificaram uma queda de pressão do leito de 2,9 cmca para o tetraborato decahidratado e de 4,4 cmca para o sulfato de potássio. Ao pulsar o ar em diferentes tempos dentro do intervalo de pulsação supracitados, verificaram uma maior queda de pressão no leito. Ao comparar o fluxo de ar contínuo com o fluxo de ar pulsado, os pesquisadores concluíram que no leito fluidizado pulsado há uma maior queda de pressão, bem como a redução do borbulhamento do leito.



Além do aumento na queda de pressão e da redução do borbulhamento, pesquisas mostram que utilizar a pulsação também reduz a velocidade de mínima fluidização, como foi observado por Bizhaem e Tabrizi (2013) em seus estudos fluidodinâmicos com partículas finas. Os autores utilizaram um leito de acrílico de 0,5 m de altura por 0,11 m de diâmetro com um distribuidor de ar acoplado na base do leito a fim de evitar que o fluxo de ar gerasse efeitos assimétricos. Neste estudo, diferentes partículas dos grupos B, A/B e C de Geldart foram utilizadas nos ensaios. O ar da fluidização foi fornecido por um compressor e logo após, foi instalado um tanque de armazenamento de ar para que não houvesse flutuações na pressão de ar. A vazão de ar foi ajustada com o auxílio de uma válvula esfera, e a pulsação foi gerada por uma válvula solenóide de duas vias com sua frequência sendo controlada por um circuito eletrônico. A frequência de pulsação utilizada foi de 1 Hz, 4 Hz e 10 Hz (sendo que 4 Hz significa que a válvula abre e fecha 4 vezes por segundo). Os autores concluíram que a pulsação produz uma menor expansão no leito e a quebra dos aglomerados, promovendo assim a homogeneidade do leito. Além disso, verificaram que para pós dos grupos A e B, a velocidade de mínima fluidização pode ser reduzida em até um terço da velocidade mínima obtida em fluidização sem pulsação, se essa for exposta à altas frequências de pulsação.

A quebra dos aglomerados também foi relatada por Ali et al. (2016) que avaliaram o efeito da frequência de pulsação na desaglomeração de pós ultrafinos. Neste estudo, os autores utilizaram uma coluna de acrílico de 1,5 m de altura e 70 mm de diâmetro interno e para a pulsação de ar foi utilizada uma válvula solenóide. Para os testes foram usadas três frequências de pulsação: 0,05 Hz, 0,10 Hz e 0,25 Hz. O material utilizado para os testes foi a sílica pirogênica hidrofóbica com diâmetro médio de 20 μm . A maior frequência de pulsação (0,25 Hz) apresentou leito com turbulência contínua, a frequência intermediária (0,1 Hz) foi suficiente para colapsar o leito antes do início do próximo pulso e a de 0,05 Hz, causou apenas o assentamento do leito. De acordo com os autores, a adição de ar pulsado resultou em uma redução de quase 40% no tamanho dos aglomerados.

4 CONCLUSÃO

Após todo o levantamento bibliográfico realizado, pode-se concluir que vários autores observaram que a adição de ar pulsado em leito fluidizado proporciona aspectos fluidodinâmicos positivos, como a quebra de aglomerados e a redução da velocidade de mínima fluidização. Adicionalmente, a pulsação quando aplicada em processo de secagem em leito fluidizado pode promover maior eficiência desta, propiciando não somente a redução dos gastos de operação, mas também da energia elétrica requerida no processo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao órgão Fundação Araucária pelo apoio financeiro recebido para a realização do presente trabalho. Também agradeço a Profa. Maria Regina Parise por todo o apoio ofertado para a conclusão do trabalho, independente do período pandêmico.

REFERÊNCIAS

AKHAVAN, A.; OMMEN, J. R. V; NIJENHUIS, J.; WANG, X. S.; COPPENS, M. O.; RHODES, M. J. **Improved Drying in a Pulsation-Assisted Fluidized Bed**. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. n. 48, p. 302-308, 7 jan. 2009. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie800458h>>. Acesso em: 2 jun. 2021.



- ALAMIAN, R., BANIASSADI, A. TRABIZI, HB. **An experimental study on effects of applying the pulsating flow to a gas-solid fluidized bed.** Word Acad. Sci.Eng Technol, p. 820-824, 24 jan. 2011. Disponível em:
<https://www.researchgate.net/publication/263161837_An_Experimental_Study_on_Effects_of_Applying_the_Pulsating_Flow_to_a_Gas-Solid_Fluidized_Bed>. Acesso em: 6 jul. 2021.
- ALI, S.S.; AL-GHURABI, E.H.; AJBAR, A.; MOHAMMED, Y.A.; BOUMAZA, M.; ASIF, M. **Effect of Frequency on Pulsed Fluidized Beds of Ultrafine Powders.** Journal of Nanomaterials, p. 1-12, 18 jan. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2016/4592501>>. Acesso em: 5 nov. 2020.
- BIZHAEM, H.K.; TABRIZI, H.B. **Experimental study on hydrodynamic characteristics of gas-solid pulsed fluidized bed.** Powder Technol. P. 237 (14-31), 5 jan. 2013. Disponível em:
<<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.01.001>>. Acesso em: 15 jul. 2021.
- GOMIDE, REYNALDO. **Operações Unitárias: operações com sistemas sólidos granulares.** v. 1., 289p, 1983.
- IRELAND, E. ; PITT, K. ; SMITH, R. **A review of pulsed flow fluidisation; the effects of intermittent gas flow on fluidised gas–solid bed behaviour.** Powder Technology, volume 292, p. 108-121, 2016.
- KUNII, D., LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering.** Butterworth-Heinemann, 2nd Ed, 491p 1991.
- NITZ M., GUARDANI R. **Fluidização Gás-Sólido - Fundamentos e Avanços.** Revista Brasileira de Engenharia Química, 2008. Disponível em: <<https://maua.br/files/artigos/artigo-fluidizacao-gas-solido-prof-nitz.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2020.
- PAVANI, M. G. T. **Estudo experimental e simulação da fluidodinâmica de amido de milho em leito fluidizado pulsado.** Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2016. Disponível em:
<<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/74/74133/tde-26092016-163234/publico/ME5712514COR.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2020.
- SOUZA, L. F. G. de; NITZ, M.; LIMA, P. A.; TARANTO, O. P. **Drying of Sodium Acetate in a Pulsed Fluid Bed Dryer.** Chemical Engineering & Technology, v. 33, p. 2015-2020, 9 nov. 2010.
- ZHANG, D.; KOKSAL, M. **Heat transfer in a pulsed bubbling fluidized bed.** Powder Technol. p. 21-31, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.06.017>>. Acesso em: 11 out. 2021.