

Estudo fluidodinâmico do leito fluidizado pulsado rotativo

Miriam Carla Bonicontró Ambrosio-Ugri^{1*} e Osvaldir Pereira Taranto²

¹Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, Bl. D-90, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil. ²DTF/FEQ, Universidade Estadual de Campinas, Cidade Universitária Zeferino Vaz, C.P. 6066, 13083-970, Campinas, São Paulo, Brasil. *autor para correspondência. e-mail: miriamugri@uol.com.br

RESUMO. Materiais particulados com características coesivas, mesmo pertencentes ao grupo A de Geldart, apresentam dificuldade em fluidizar, o que pode ser minimizado modificando o sistema de fluidização. Esta modificação pode ser feita pulsando a corrente gasosa através do distribuidor, denominado leito fluidizado pulsado rotativo (LFPR). Neste trabalho, o gás utilizado está na T_{ambiente} e os parâmetros utilizados no estudo fluidodinâmico foram: $C_{\text{sólidos}}$ e $f_{\text{rotação}}$ do disco. Variando estes parâmetros foi analisada sua influência na curva fluidodinâmica e se determinou a melhor condição de pulsofluidização do leito. A curva fluidodinâmica obtida para o LFPR foi comparada com a curva do leito fluidizado convencional e observou-se a suavização da curva para o LFPR, conseqüentemente diminuindo ΔP_{leito} ao longo do processo. Também se fez a comparação entre o LFPR e o leito fluidizado agitado mecanicamente (Ambrosio, 1999), e verificou-se que as quedas de pressão nos dois sistemas são muito próximas ao longo do processo.

Palavras-chave: fluidodinâmica, leito fluidizado, material coesivo, pulsofluidização.

ABSTRACT. Fluid dynamic study of rotative pulsed fluidized bed. Cohesive particulate materials, even those that belong to the Geldart A group, present some difficulties to fluidize in conventional equipment. The rotated pulsed fluidized bed (RPFb) can be used to pulse the gas flow through the distributor plate to minimize difficulties. In this work, the used gas is at T_{ambient} and the parameters used during the fluid dynamics studies were: C_{solids} and F_{disk} rotation. The fluid dynamic curve was analyzed with the variation of these parameters, and the best condition for the pulse fluidization of the bed was determined. The fluid dynamic curve obtained for the RPFb was compared with the conventional fluid dynamic bed curve. A smoothness of the curve for the RPFb was observed, and as a consequence, a decrease of the ΔP_{bed} during the process. A comparison between the RPFb and the mechanically agitated fluidized bed (Ambrosio, 1999) was also done and it was verified that the pressure drop in both systems are very close during the process.

Key words: fluid dynamic, fluidized bed, cohesive material, pulse fluidization.

Introdução

A fluidização de materiais particulados utilizando uma corrente gasosa é uma técnica que tem sido muito aplicada na indústria química, pois oferece altas taxas de transferência de calor e massa entre as fases. Existem diversas vantagens tecnológicas e econômicas no uso do leito fluidizado, podendo-se mencionar o aumento da superfície ativa dos sólidos, a alta agitação das partículas sólidas nas zonas de contato, a utilização em processos contínuos e a possibilidade de automação.

O leito fluidizado torna-se mais vantajoso com a aproximação da fluidização homogênea, que é caracterizada pelo escoamento uniforme do fluido através do leito de partículas e pela intensa mistura das partículas. A fluidização homogênea de materiais

em pó úmidos, as quais apresentam propriedades coesivas e/ou higroscópicas, é muito difícil de se obter.

Segundo Strumillo e Kudra (1986), os secadores com corrente pulsante de ar são chamados de “secadores de leito pulsofluidizado”; em que a vibração influencia o processo de secagem por aumentar a capacidade de fluidização do material e por melhorar a estrutura do leito. Tais equipamentos podem ser usados para materiais com alto conteúdo de umidade não-ligada e também para materiais que não contêm esse tipo de umidade.

O leito pulsofluidizado cria novas perspectivas para a secagem de materiais granulares de diferentes tipos, como tem sido estudado por Blacha-Jurkiewicz *et al.* (1987), Gawrzynski *et al.* (1989) e Ambrosio-Ugri (2003). A “pulsção” da corrente gasosa

apresenta algumas vantagens em relação ao leito fluidizado convencional, especialmente em relação a uma redução considerável na vazão de gás, como verificado nos trabalhos citados.

No Leito Fluidizado Pulsado Rotativo, o distribuidor de ar multi-orifícios é dividido em duas partes: o prato perfurado que suporta as partículas do leito fixo e distribui o gás uniformemente e o disco rotativo que, periodicamente, distribui o gás em toda a área da seção do prato perfurado. Ele pode ser aplicado na secagem de produtos cristalinos que têm a capacidade de se agregar ou grudar (açúcar cristal, sal marinho, entre outros), bem como na secagem de produtos biológicos com alto conteúdo de umidade (sementes de girassol, entre outros) (Elenkov e Djurkov, 1992; Gawrzynski e Glaser, 1996; Djurkov, 1998).

Jinescu *et al.* (2000) estudaram a fluidodinâmica do leito fluidizado pulsado rotativo para diferentes materiais (d_p de 200 e 800 μm), os quais apresentam pequena força interpartículas. Avaliando diferentes frequências de pulsação, verificaram uma diminuição na queda de pressão e na velocidade do gás, nas condições de mínima fluidização, com o aumento da frequência de pulsação. Esses resultados evidenciaram a eficiência desse método na fluidização de biomateriais em pó devido à contribuição energética dos pulsos para a diminuição das forças interpartículas.

O objetivo do presente trabalho foi estudar a fluidodinâmica de um leito fluidizado pulsado rotativo, utilizando um material em pó fino ($d_p = 80 \mu\text{m}$), com o gás à temperatura ambiente, variando a carga do sólido e a frequência de rotação do disco. A variação destes parâmetros foi estudada para analisar sua influência na curva característica de fluidização, como pode ser observado no trabalho de Ambrosio-Ugri (2003). Também foi feita a comparação entre as curvas fluidodinâmicas do Leito Fluidizado Pulsado Rotativo (LFPR) e o Leito Fluidizado Convencional (LFC), e entre o LFPR e o Leito Fluidizado Agitado Mecanicamente (LFAM), todas obtidas nas mesmas condições de processo.

Material e métodos

Material

O material usado no estudo fluidodinâmico do LFPR foi o ácido 2-hidroxibenzoico, isento de umidade, com d_p médio = 80 μm e $\rho = 1,443 \text{ g/cm}^3$. Esse material é um ácido orgânico cristalino bastante utilizado nas indústrias de tintas, cosméticos, produtos farmacêuticos, perfumaria, entre outras. Apesar desse material pertencer ao grupo A de

Geldart para pós-secos, ele apresenta algumas dificuldades de entrar no regime de fluidização em um leito fluidizado convencional (LFC) devido à sua característica coesiva, quando apresenta elevado conteúdo de umidade.

Ensaio fluidodinâmicos

O sistema experimental tem como elemento principal um leito cilíndrico em aço inox (diâmetro interno = 14,3 cm e altura = 70 cm). O sistema distribuidor de gás foi dividido em duas partes distintas: um prato perfurado e um disco rotativo, com uma única abertura de 60°, que fornece periodicamente o gás sob toda a área do prato perfurado. A Figura 1 apresenta esquematicamente o disco rotativo utilizado em conjunto com o prato perfurado.

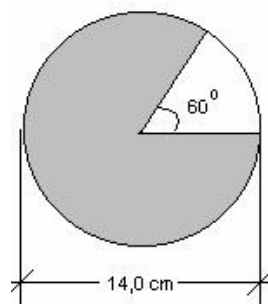


Figura 1. Esquema representativo do disco rotativo.

A Figura 2 apresenta esquematicamente o sistema experimental utilizado que é constituído pela câmara de fluidização (7) e pelo sistema de distribuição pulsada de ar (5 e 6); um soprador (1) que alimenta o leito com ar e um leito de sílica gel (3), utilizado para controlar a umidade de entrada do ar.

Os experimentos para a obtenção das curvas fluidodinâmicas do LFPR foram realizados variando a frequência de rotação (f_r) (5, 10 e 15 Hz) e a carga de sólidos ($C_{\text{sólidos}}$) (400 e 650 g). Os gráficos de ΔP versus v_{ar} (crescente e decrescente) foram obtidos em função dos parâmetros f_r e $C_{\text{sólidos}}$.

As curvas apresentadas para o LFC e para o LFAM foram obtidas a partir do trabalho de Ambrosio (1999). Para sua construção, utilizam-se ar à temperatura ambiente, a velocidade de agitação em torno de 10 Hz e o sólido utilizado foi a celulose microcristalina isenta de umidade. Na época da realização do trabalho de Ambrosio (1999), o ácido 2-hidroxibenzoico não estava disponível e, como o LFAM necessitava de estudos fluidodinâmicos prévios para sua validação, a celulose microcristalina foi utilizada, fornecendo resultados satisfatórios para o objetivo proposto.

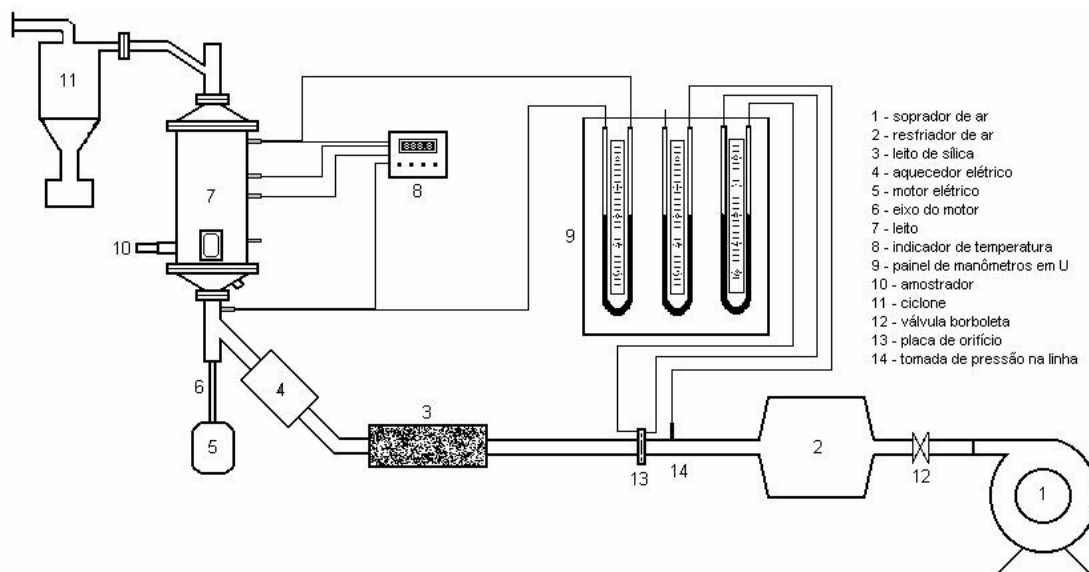


Figura 2. Montagem experimental utilizada no estudo fluidodinâmico do LFPR para o material seco.

Resultados

As Figuras 3 e 4 apresentam as curvas fluidodinâmicas obtidas para o LFPR, considerando diferentes valores de f_r e $C_{sólidos}$, e para o LFC. Nelas, observa-se um comportamento fluidodinâmico semelhante, considerando as diferenças existentes entre os valores de f_r e $C_{sólidos}$, o que deveria ser esperado.

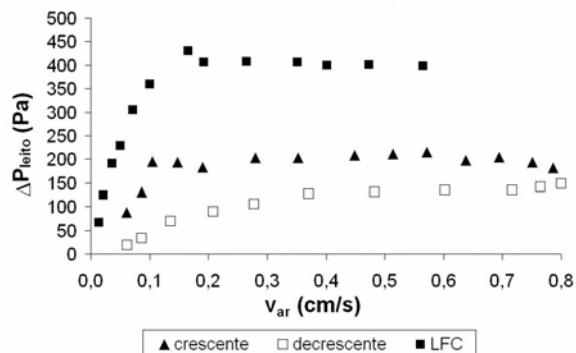


Figura 3. Curva fluidodinâmica. $C_{sólidos} = 400$ g e $f_r = 5$ Hz.

Os resultados mostrados nas Figuras 3 e 4 mostram que a curva fluidodinâmica do LFPR, independente do valor de f_r utilizado, quando comparada com a curva do LFC, apresenta uma suavização e, conseqüentemente, uma diminuição da faixa de ΔP_{leito} . Desse modo, o regime de fluidização foi atingido sem passar através do pico de queda de pressão.

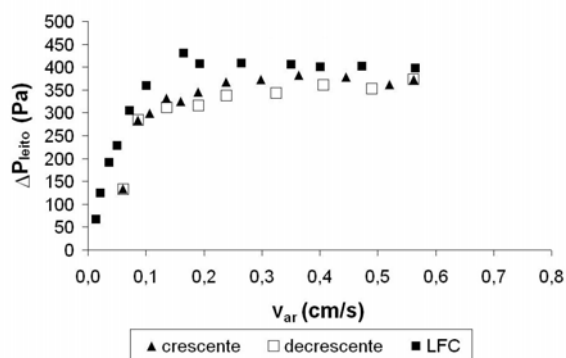


Figura 4. Curva fluidodinâmica. $C_{sólidos} = 650$ g e $f_r = 15$ Hz.

A Tabela 1 indica as combinações dos parâmetros f_r e $C_{sólidos}$ dentro das faixas estudadas.

Tabela 1. Variação de $v_{mf\dot{p}}$ e $\Delta P_{mf\dot{p}}$ em função da frequência de rotação.

	5Hz		10Hz		15Hz	
$C_{sólidos}$ (g)	400	650	400	650	400	650
$v_{mf\dot{p}}$ (cm/s)	0,26	0,15	0,22	0,10	0,16	0,09
$\Delta P_{mf\dot{p}}$ (Pa)	130	280	110	290	118	310

Os valores de $v_{mf\dot{p}}$ e de $\Delta P_{mf\dot{p}}$, apresentados na Tabela 1, foram determinados através da interseção das tangentes das curvas de leito fixo e de leito fluidizado pulsado rotativo. Nessa tabela, observa-se um decréscimo no valor de $v_{mf\dot{p}}$ com o aumento de f_r , independente da carga de sólidos ($C_{sólidos}$) utilizada (400 ou 650 g). Esse comportamento para $v_{mf\dot{p}}$ está relacionado com o aumento de f_r do disco, pois o gás é pulsado mais rapidamente dentro do leito, aumentando o movimento dos sólidos e, assim, causando a diminuição do valor de $v_{mf\dot{p}}$ e do consumo de gás.

As Figuras 5 e 6 apresentam a comparação das curvas fluidodinâmicas em função de f_r , mantendo $C_{sólidos}$ constante.

A Figura 5 mostra a dependência de v_{mf} em relação à f_r , considerando $C_{sólidos}$ igual a 400 g, uma vez que v_{mf} diminui conforme f_r aumenta.

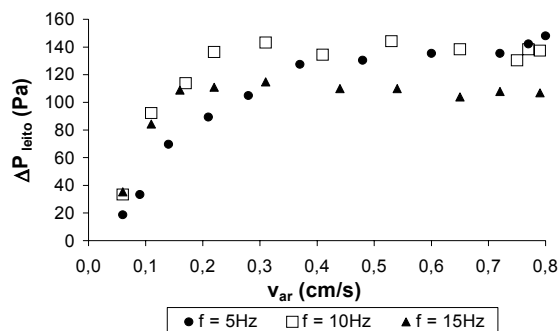


Figura 5. Curva fluidodinâmica, para v_{ar} decrescente, $C_{sólidos} = 400$ g.

A Figura 6 indica uma pequena variação de v_{mf} em função de f_r , para uma $C_{sólidos}$ de 650 g. Nessa figura, também se pode observar que os valores de ΔP_{mf} estão bastante próximos mesmo com o aumento de f_r .

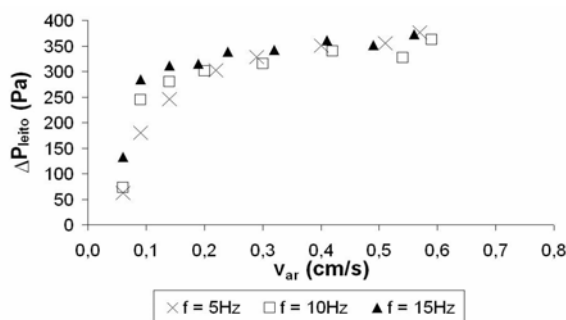


Figura 6. Curva fluidodinâmica, para v_{ar} decrescente, $C_{sólidos} = 650$ g.

Com os resultados verificados, pode-se notar que uma maior velocidade de pulsação do gás facilita e melhora o movimento das partículas, diminuindo a quantidade de gás necessária para a fluidização. Assim, os resultados apresentados corroboram com os resultados obtidos por Elenkov e Djurkov (1992) e Jinescu *et al.* (2000).

As Figuras 7 e 8 apresentam a comparação feita entre os leitos fluidizados convencional (LFC) e pulsado rotativo (LFPR), relacionando a velocidade e a queda de pressão, na condição de mínima fluidização, com as cargas de sólidos utilizadas.

De acordo com a Figura 7, pode-se observar que a velocidade de mínima fluidização para o LFPR, em qualquer frequência estudada, é menor do que no LFC. Com a diminuição da velocidade de mínima fluidização,

ocorre a diminuição do consumo de gás; a diminuição da v_{mf} para o LFPR ocorreu para as duas cargas de sólidos estudadas.

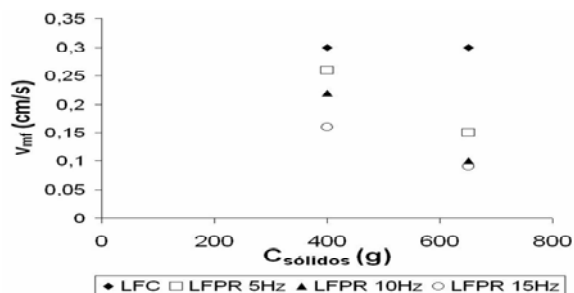


Figura 7. Variação da v_{mf} em função da $C_{sólidos}$, comparando o LFC e o LFPR.

Na Figura 8, pode-se observar a diminuição da queda de pressão para o LFPR, na condição de mínima fluidização, independente da frequência de rotação do disco, comparando com a queda de pressão do LFC. Essa diminuição da queda de pressão, observada na Figura 8, e a suavização da curva fluidodinâmica indicam que o leito entra no regime de fluidização sem precisar vencer a barreira do pico de queda de pressão, que geralmente está presente na fluidização em um leito convencional, diminuindo a energia necessária para o LFPR entrar em regime.

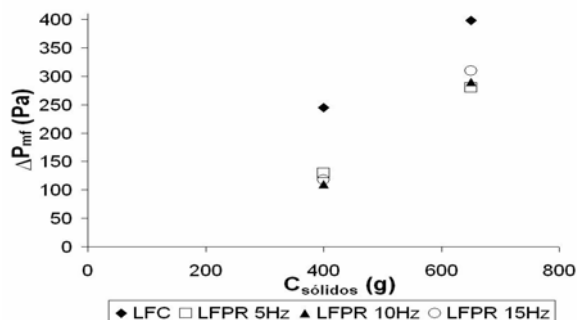


Figura 8. Variação de ΔP em função da $C_{sólidos}$, comparando o LFC e o LFPR.

A Figura 9 apresenta a comparação entre as curvas fluidodinâmicas para três diferentes sistemas de fluidização. Essa comparação foi feita entre os leitos fluidizados: convencional (LFC), agitado mecanicamente (LFAM), estudado por Ambrosio (1999), e o pulsado rotativo (LFPR).

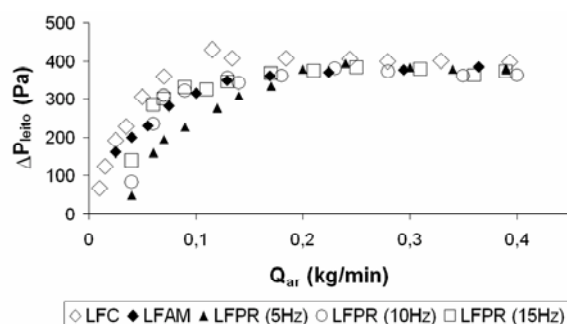


Figura 9. Comparação entre diferentes sistemas de fluidização.

Na Figura 9, confirma-se a ocorrência da suavização da curva fluidodinâmica para o LFPR e o LFAM, comparando com a curva do LFC. A suavização na curva do LFPR e LFAM indica que tanto a pulsação do gás quanto a agitação das partículas ajudam a movimentação dos sólidos, evitando a formação de caminhos preferenciais e permitindo que o leito comece a fluidizar sem precisar vencer uma barreira energética muito grande. Comparando apenas as curvas entre o LFPR e o LFAM, os valores da queda de pressão estão bastante próximos ao longo de todo o processo de fluidização, dentro das condições estudadas.

Conclusão

No estudo fluidodinâmico realizado para o LFPR, na faixa estudada, pode-se concluir que:

- com o aumento da frequência de rotação (15Hz), independente da carga de sólidos, foi obtido um menor valor para a velocidade de mínima fluidização pulsada, indicando que a pulsação mais rápida do ar promove uma melhor mistura do sólido e auxilia na movimentação, facilitando a fluidização. A mesma conclusão foi obtida no trabalho de Jinescu *et al.* (2000);
- o aumento da carga de sólidos (650 g) causou uma diminuição no valor da velocidade de mínima fluidização pulsada;
- observou-se a suavização da curva fluidodinâmica quando imposta a pulsação do gás, independente da frequência de rotação indicando que, no LFPR, o gás precisa vencer uma menor barreira energética para fazer que as partículas iniciem a fluidização;
- comparando o LFPR e o LFC, ocorreu a diminuição na queda de pressão (ΔP_{leito}) do leito tanto na condição de mínima fluidização como em todo o processo de fluidização;
- o valor da ΔP_{leito} para o LFPR se manteve próximo do valor da ΔP_{leito} para o LFAM, em

todo o processo de fluidização, dentro da faixa estudada.

Nomenclatura

A_t	área da seção transversal do leito (m^2)
$C_{sólidos}$	carga de sólidos (g)
d_p	diâmetro médio da partícula (μm)
f_r	freqüência de rotação do disco (Hz)
g	aceleração da gravidade (m/s^2)
m	massa de sólidos (kg)
v_{ar}	velocidade do ar (cm/s)
v_{mfp}	velocidade de mínima fluidização pulsada (cm/s)
T_s	temperatura de sublimação do sólido ($^{\circ}C$)
X	conteúdo de umidade do sólido (%) b.s.
ΔP_{leito}	queda de pressão no leito (Pa)
ΔP_{mfp}	queda de pressão na mínima fluidização pulsada (Pa)
Símbolo grego	
ρ_s	densidade do sólido (g/cm^3)

Referências

- AMBROSIO-UGRI, M.C.B. *Caracterização física e secagem do ácido 2-Hidroxibenzoico em leito fluidizado agitado mecanicamente e em leito fluidizado pulsado rotativo*. 2003. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- AMBROSIO, M.C.B. *Secagem de particulado coesivo em secador de leito fluidizado coesivo*. 1999. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.
- BLACHA-JURKIEWICZ, J. *et al.* Drying of granular material in pulsofluidized bed. *Drying '87*, p.109-114, 1987.
- DJURKOV, T.G. Modeling of bed pressure drops in rotation-pulsed fluidized bed dryer. *Drying '98*, v. A, p.160-167, 1998.
- ELENKOV, V.R., DJURKOV, T.G. Rotating-pulsed fluidized bed dryer for high-moisture content byproducts. *Drying '92*, p.1636-1641, 1992.
- GAWRZYNSKI, Z.; GLASER, R. Drying in a pulsed-fluid bed with relocated gas stream. *Dry. Technol.*, New York, v. 14, n. 5, p.1121-1172, 1996.
- GAWRZYNSKI, Z. *et al.* Drying of granular material in pulsofluidized bed. *Hung. J. Ind. Chem.*, v. 17, p.245-255, 1989.
- JINESCU, G. *et al.* Aspects concerning the intensification of drying process of powdery biomaterials. *Proceedings of the IDS'2000* (CD-rom, # 243), 2000.
- STRUMILLO, C.; KUDRA, T. *Drying: principles, applications and design*. London: Gordon and Breach Science Publ., 1986.

Received on March 24, 2004.

Accepted on June 16, 2004.