

ARTIGO DE REVISÃO

AERODINÂMICA DE LEITOS VIBROFLUIDIZADOS - UMA REVISÃO

KIL J. PARK¹, FERNANDO P. R. BROD², RAFAEL A. DE OLIVEIRA³

RESUMO: Aplicações da vibração mecânica com o intuito de facilitar a fluidização e aumentar as transferências de calor, massa e quantidade de movimento são processos comumente utilizados nas agroindústrias, que atualmente encontram suas aplicações no processamento de partículas difíceis de fluidizar. Equações e dados experimentais encontrados na literatura das características aerodinâmicas de leitos vibrofluidizados são apresentados e discutidos, ressaltando o efeito da vibração no leito.

PALAVRAS-CHAVE: perda de carga, velocidade mínima de fluidização, porosidade do leito.

AERODYNAMICS OF VIBRO-FLUIDIZED BEDS - A REVIEW

ABSTRACT: Application of mechanical vibration to aid fluidization and to improve heat, mass and momentum transfer are usual processes in agricultural industry and it has found nowadays extensive applications in particle processing of materials difficult-to-fluidized. Equations and experimental data found in literature for the aerodynamics characteristics of vibro-fluidized beds are presented and discussed, emphasizing the vibration effect in the bed.

KEYWORDS: pressure drop, minimum fluidizing velocity, bed porosity.

INTRODUÇÃO

Leitos vibrofluidizados encontram extensa aplicação industrial, principalmente em secagem, aquecimento/resfriamento, granulação, etc., de materiais particulados que geralmente têm dificuldades de processamento.

Vantagens dos leitos vibrofluidizados sobre leitos fluidizados convencionais incluem a redução do consumo de energia, melhor controle do tempo de residência, movimentação mais suave das partículas, aumento da transferência de calor e das taxas de secagem, e na melhoria da qualidade do produto final (GUPTA & MUJUMDAR, 1980 a; RINGER & MUJUMDAR, 1983-84). Além disso, as características do produto final (distribuição de tamanho, tamanho médio da partícula, dispersão do tamanho da partícula, etc.) são facilmente controladas, ajustando-se os parâmetros de vibração - amplitude e frequência (ERDÉSZ et al., 1986).

Correlações empíricas para parâmetros aerodinâmicos aparecem frequentemente na literatura devido a sua importância no entendimento do comportamento aerodinâmico do processo e, por conseguinte, em sua otimização. Essas correlações podem ser usadas na determinação de faixas favoráveis de utilização das variáveis operacionais de leitos vibrofluidizados.

O objetivo deste trabalho é descrever o efeito da vibração no comportamento aerodinâmico (ou hidrodinâmico) de leitos vibrofluidizados em termos da perda de carga, da velocidade mínima de fluidização e da porosidade do leito, por meio de revisão de literatura.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Aerodinâmica de leitos vibrofluidizados

No regime vibrofluidizado, o ar escoia a velocidades muito baixas, o que, por si só, não teria condições de movimentar as partículas do leito, ocorrendo o efeito redutor da vibração sobre a

¹ Eng^o de Alimentos, Professor Titular, FEAGRI/UNICAMP, Campinas - SP, Fone/Fax: (0XX19) 3788.1076, kil@agr.unicamp.br

² Eng^o Agrícola, Doutor em Engenharia Agrícola. FEAGRI/UNICAMP, fernando.brod@kepler.com.br

³ Eng^o Agrícola, Doutorando em Tecnologia Pós-Colheita. FEAGRI/UNICAMP, augustus@agr.unicamp.br

Recebido pelo Conselho Editorial em: 15-6-2005

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 18-9-2006

velocidade mínima de fluidização (u_{mf}) que passa a ser denominada de velocidade incipiente de vibrofluidização (u_{mvf}) (FINZER & KIECKBUSCH, 1986).

Na prática, a extensão da redução da vibração sobre a velocidade mínima de fluidização é menor do que prevê a equação, devido ao amortecimento de vibração pela influência da altura do leito.

O estado vibrofluidizado inicia-se quando a força gravitacional, atuando sobre a partícula, é exatamente equilibrada pela soma da força resistiva do gás e pela componente vertical da força gravitacional (GUPTA & MUJUMDAR, 1980 a).

Um completo estudo teórico e prático sobre a função de distribuição de velocidades em um leito vibrofluidizado (LVF) foi realizado por KUMARAN (1998). O autor utilizou o conceito de análise assintótica no limite em que a dissipação de energia em uma colisão devido à inelasticidade ou entre colisões sucessivas devido às forças viscosas é pequena comparada à energia da partícula (a velocidade máxima da superfície vibratória é pequena comparada à média do quadrado da velocidade das partículas).

MORI et al. (1991) desenvolveram um tipo especial de leito vibrofluidizado para partículas muito finas (Grupo C de Geldart), no qual a direção da vibração pode ser alterada, mudando o ângulo em que o motovibrador está preso. Os autores também descrevem a dificuldade em se fluidizar partículas menores do que 10 a 30 μm devido ao fenômeno de canais preferenciais (*channeling*). Essa classe de partículas, segundo MOROOKA (1988), citado por MORI et al. (1991), pode ser fluidizada em leitos fluidizados convencionais, pois se aglomeram em partículas secundárias maiores. Contudo, em colunas muito largas, não é fácil conseguir a fluidização dessas partículas em todo o leito, e um aumento na velocidade do gás ocasiona separação a um extremo, tal que algumas partículas são perdidas. Assim, os autores sugerem o uso de leitos vibrofluidizados que, satisfatoriamente, conseguem atingir a fluidização de partículas muito finas com velocidades do ar baixas. No experimento, o nitrogênio foi usado como gás fluidizante para não ter a influência da umidade no processo. Como conclusão, os autores confirmaram a eficiência de um leito vibrofluidizado, na fluidização de partículas muito finas com extrema dificuldade para fluidizar, e cada tipo de partícula tem sua própria frequência ótima de vibração para melhor fluidização.

Perda de carga

O fenômeno mais reportado é a redução da perda de carga e a dependência da forma da curva de fluidização com a vibração (PAKOWSKI et al., 1984). Outra característica é a não - existência da histerese (MUJUMDAR, 1983).

STRUMILLO & PAKOWSKI (1980) dividiram a forma das curvas de fluidização em um leito vibrofluidizado, como se segue (Figura 1):

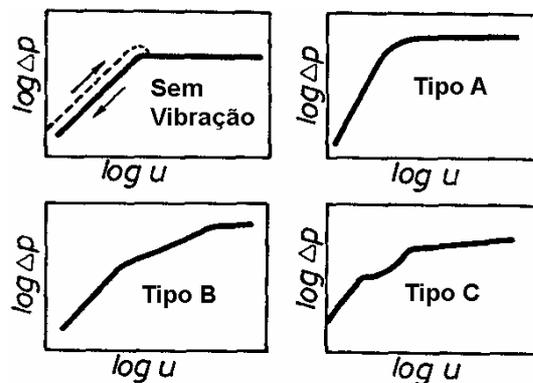


FIGURA 1. Classificação das curvas de fluidização em um secador vibrofluidizado - SVF. Fonte: STRUMILLO & PAKOWSKI (1980).

Como se observa, a primeira curva representa a fluidização convencional, sem a vibração. No caso de baixas acelerações vibracionais, curva *tipo (A)*, o pico de pressão não é observado. A curva *tipo (B)* representa valores intermediários de aceleração vibracional, e a curva *tipo (C)* representa altos valores de aceleração vibracional, em que se observam dois platôs ao invés de um, usualmente encontrado na fluidização convencional.

GUPTA & MUJUMDAR (1980 b), utilizando o esquema proposto na Figura 2, determinaram as curvas apresentadas na Figura 3, que mostra o comportamento aerodinâmico de um leito vibrofluidizado - LVF, variando-se a frequência de vibração e mantendo-se todos os outros parâmetros constantes.

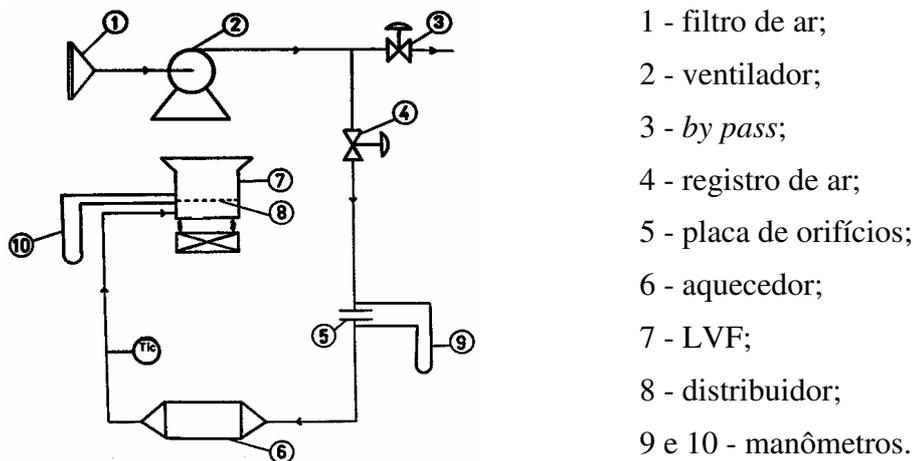


FIGURA 2. Esquema do equipamento para se determinar a aerodinâmica de um LVF. Fonte: GUPTA & MUJUMDAR (1980 b).

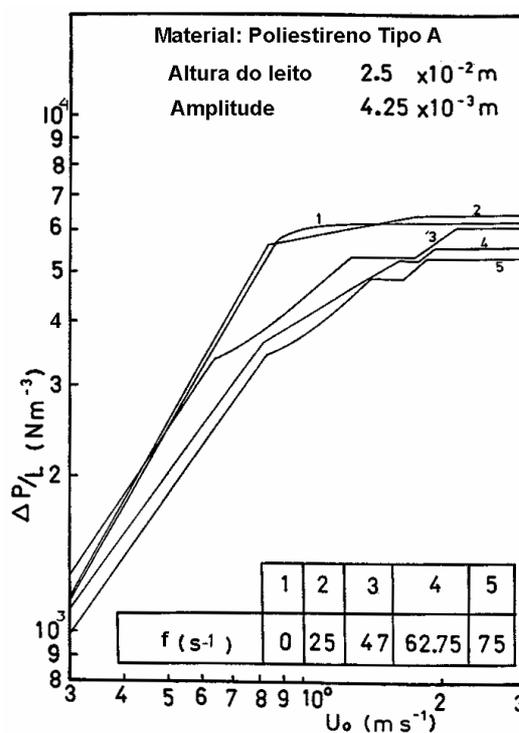


FIGURA 3. Efeito da frequência de vibração na curva perda de carga x velocidade. Fonte: GUPTA & MUJUMDAR (1980 b).

Na Figura 3, mostra-se claramente a transição de regime das curvas de fluidização. Percebe-se que as curvas encontradas assemelham-se às mostradas por STRUMILLO & PAKOWSKI (1980), e a partir da frequência de vibração de 47 Hz, as curvas apresentam dois platôs (curva tipo C de Geldart).

RINGER & MUJUMDAR (1983-84) encontraram o seguinte gráfico para LVF de partículas de $d_p = 2500 \mu\text{m}$ e $\rho_p = 1420 \text{ kgm}^{-3}$.

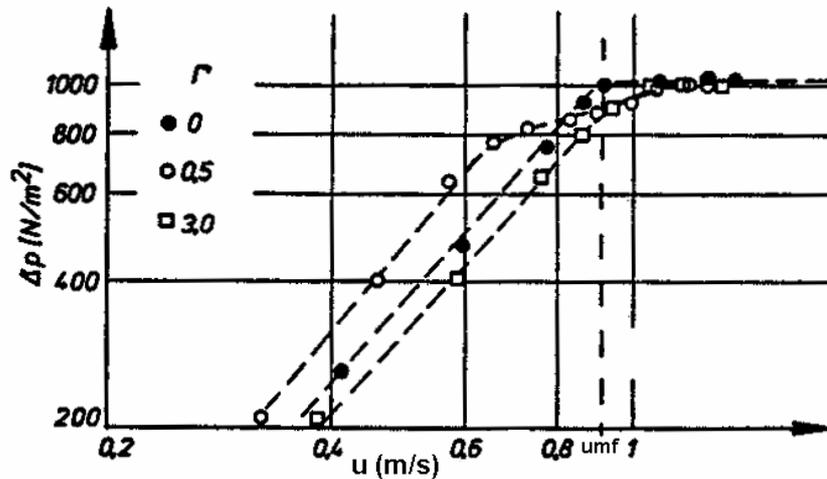


FIGURA 4. Perda de carga do leito para LVF. Fonte: RINGER & MUJUMDAR (1983-84).

Os autores afirmam que a combinação da vibração com o fluxo do gás origina maiores porosidades do leito do que com apenas o leito fixo; assim, a perda de carga é menor. Quando os efeitos da fluidização se tornam dominantes, os leitos fluidizados e vibrofluidizados têm a mesma porosidade e, logo, a mesma perda de carga.

Já ERDÉSZ et al. (1986) e ERDÉSZ (1990) determinaram o seguinte gráfico:

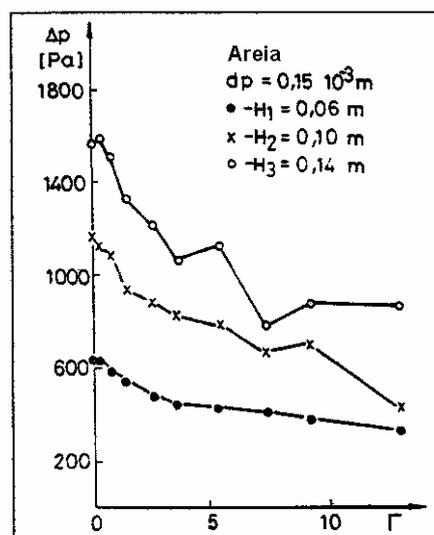


FIGURA 5. Perda de carga do leito para um LVF, em função da intensidade de vibração Γ . Fonte: ERDÉSZ et al. (1986); ERDÉSZ (1990).

DELLA TONIA JUNIOR et al. (1989) encontraram as seguintes curvas de perda de carga para a secagem de pãoço, em um LVF vertical:

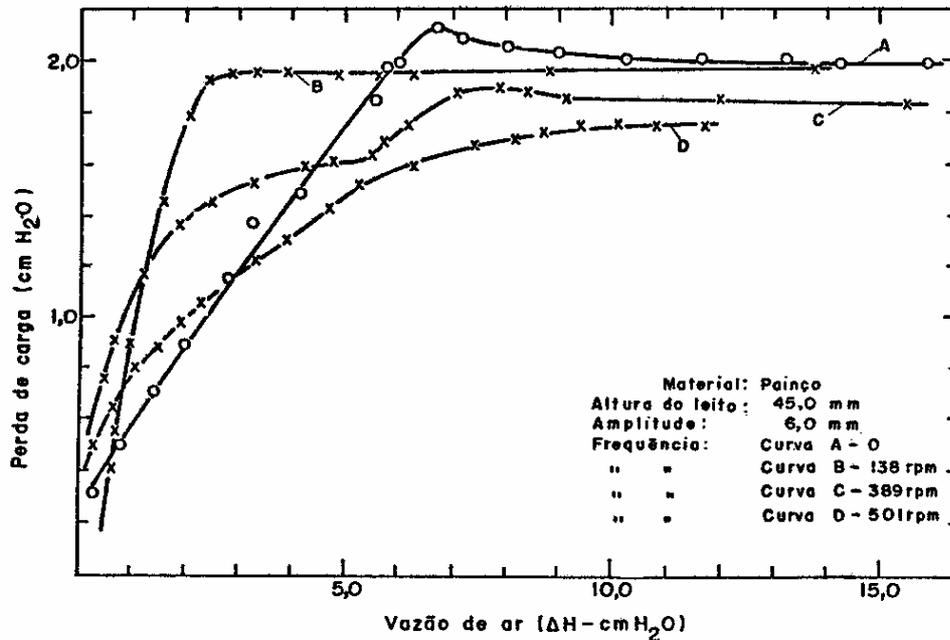


FIGURA 6. Queda de pressão em função da vazão para um SVF. Fonte: DELLA TONIA JR. (1989).

Observa-se que a curva da perda de carga versus vazão do ar encontrada foi similar à proposta em literatura (STRUMILLO & PAKOWSKI, 1980).

GUPTA & MUJUMDAR (1980 b) também sumarizaram, na Figura 7, o tipo que a curva deve apresentar, dado um certo conjunto de condições operacionais:

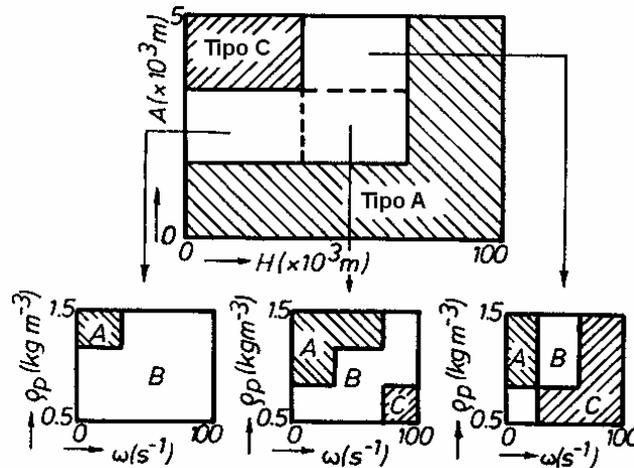


FIGURA 7. Mapa dos regimes de fluxo em um LVF. Fonte: GUPTA & MUJUMDAR (1980 b).

NODA et al. (1998) apresentaram a curva de fluidização de esferas de vidro de 6 μm de diâmetro em um LVF vertical (Figura 8). Sem vibração, as curvas típicas não foram observadas, possivelmente pelas altas forças coesivas entre as partículas. Além disso, observaram que a fluidização só pode ser alcançada se a vibração mecânica for imposta.

KUIPERS et al. (1996) estudaram a fluidização de amido de batata (grupo C de Geldart) em leito vibrofluidizado agitado. Os parâmetros determinados em função da velocidade do ar, altura do leito, conteúdo de umidade, tipo e velocidade do agitador, frequência e amplitude de vibração foram: índice de fluidização ($\Delta P S/m g$), expansão do leito, torque e comportamento visual do leito. A combinação ótima da agitação e dos parâmetros de vibração evitou o *channeling* no leito e a aglomeração do amido, mesmo para a altura elevada do leito (0,76 m).

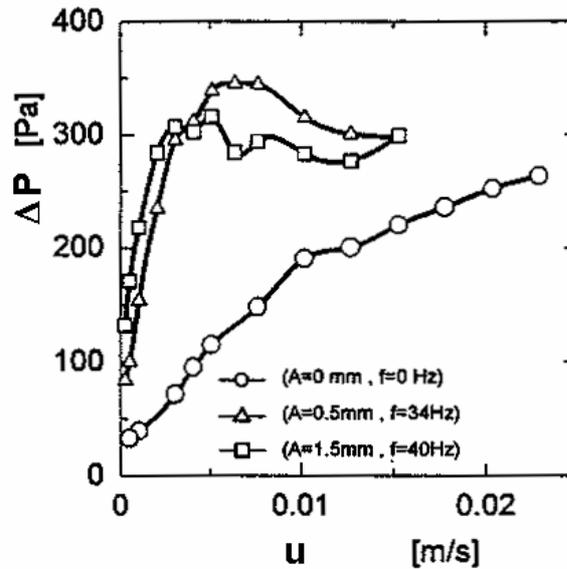


FIGURA 8. Curvas de fluidização. Fonte: NODA et al. (1998).

Na Tabela 1, estão representadas as equações empíricas para a perda de carga em leito vibrofluidizado, correlacionando a perda de carga em função dos parâmetros de vibração.

TABELA 1. Correlações para a estimativa da perda de carga em leito vibrofluidizado.

Autor	Correlação	Material*	Faixa de Γ	Eq.
BRATU & JINESCU (1969, 1971 e 1972) ¹	$(\Delta P_{mf})_{vib} = (\Delta P_{mf})_{st} \left(\frac{A\omega^2}{g} \right)^{-n}$ $n = 0,15 + 24,17 \times (d_p \rho_p)$	A, B	0-15	(1)
MUSHTAIEV et al. (1973) ¹	$(\Delta P_{mf})_{vib} = (\Delta P_{mf})_{st} \left(\frac{A\omega^2}{g} \right)^{-n}$ $n = 0,41 + 19,6 \times (d_p \rho_p)$	A, B	0-15	(2)
CHEVILENK et al. (1979) ²	$(\Delta P_{mf})_{vib} = \rho_p (1 - \varepsilon) H 1,967 d_p^{0,11} \left(\frac{H}{d_L} \right)^{0,18} \left(\frac{A\omega^2}{g} \right)^{0,51}$	-	-	(3)
GUPTA & MUJUMDAR (1980 b)	$\frac{(\Delta P_{mf})_{vib}}{(\Delta P_{mf})_{st}} = \left[1 - 0,0935 \left(\frac{d_p}{H} \right)^{0,946} \left(\frac{A\omega^2}{g} \right)^{0,606} \phi^{1,637} \right]$	B, D	0-22	(4)
RAMZIN (19--) ³	$(\Delta P_{mf})_{vib} = 1,41H(u_{mvf})^{1,43}$	D	1-10	(5)
DROGALIN & KARPOVA (19--) ³	$(\Delta P_{mf})_{vib} = 191,5H(u_{mvf}) + 1,12H(u_{mvf})^2$	D	1-10	(6)
	$Eu = \frac{\Delta P_{mvf}}{\rho_g (u_{mvf})^2} =$			
BAHMAN et al. (1970) ³	$= K_1 Re^{K_2} Re_{vib}^{K_3} \Gamma^{K_4} \left(\frac{m}{d_L \rho_g} \right)^{K_5} \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{K_6} \left(\frac{A}{\rho_g} \right)^{K_7}$ $Re = \frac{d_p u_{mvf}}{\nu}; Re_{vib} = \frac{d_p^2 \omega}{\nu}$	B, D	3,5-13	(7)
ERDÉSZ & ORMÓS (1984) ³	$\Delta P_{mvf} = \Delta P_{mf} (1,06 - 0,034\Gamma + 0,006\Gamma^2 - 0,0007\Gamma^3)$	B	1-12,9	(8)

* Classificação de Geldart; ¹ GUPTA & MUJUMDAR (1980 a e b); ² PAKOWSKI et al. (1984); ³ ERDÉSZ et al. (1986) e ERDÉSZ (1990)

Percebe-se que as eqs.(1) e (2) não levam em conta a altura do leito e o formato das partículas, acarretando discrepância de 40% para os valores de $(\Delta P_{mf})_{vib}$ (GUPTA & MUJUMDAR, 1980 b). Redução de 35% na perda de carga foi observada como consequência da vibração. Diminuição na perda de carga foi conseguida em alturas pequenas do leito, altas frequências e grandes amplitudes de vibração, e para leitos com partículas grandes ou mais esféricas (GUPTA & MUJUMDAR, 1980b).

ERDÉSZ & MUJUMDAR (1989) estudaram a validade de modelo fenomenológico de um sistema vibrátil baseado no conceito de um pistão poroso em um cilindro. A flutuação da porosidade do leito foi considerada assim como o ar possuindo compressibilidade média. O modelo mostrou bom ajuste para os dados experimentais, possuindo grande sensibilidade para variações na permeabilidade do leito, ângulo de fase da flutuação da porosidade e amplitude da vibração:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{-k_0 \left[1 + \text{sen} \left(\frac{\omega t}{n} + \phi \right) \frac{P - P_L}{P} RT - A S \omega \cos(\omega t) P \right]}{V + A S \text{sen}(\omega t)} \quad (9)$$

Utilizando farelo de arroz, FITO et al. (1975) estudaram a perda de carga em LVF de 24 Hz de frequência e 2,1 mm de amplitude. Por meio da equação clássica de Ergun, chegaram à seguinte equação empírica:

$$\frac{\Delta P}{H} = 800 \frac{(1 - \epsilon_L)^2 \mu_g u_g}{\epsilon_L^3 d_p^2} \quad (10)$$

GARIM & FREIRE (1998) também estudaram as curvas características de fluidização de leitos vibrofluidizados e fluidizados, utilizando sistema automático de coleta de dados com transdutores de pressão instalados em vários pontos do leito. Esses dados foram tratados estatisticamente por meio da determinação do desvio-padrão das medidas de queda de pressão no leito. No caso de LVFs, as variações de queda de pressão são função da altura do leito e do adimensional de vibração. Por meio das curvas de desvio-padrão, podem-se determinar as condições nas quais a vibração imposta é predominante em relação à força exercida pelo escoamento do ar através do leito de partículas.

O persulfato de potássio foi utilizado por JINESCU et al. (2000) em um leito vibrofluidizado vertical para se chegar à seguinte equação empírica da perda de carga:

$$(\Delta P_{mf})_{vib} = j_1 \left(\frac{A \omega^2}{g} \right)^{-j_2} \quad (11)$$

Os parâmetros j_1 e j_2 são em função da relação H_0/dL , conforme mostrado na Tabela 2:

TABELA 2. Relação entre j_1 , j_2 e a razão H_0/dL .

H_0/dL	j_1	j_2
0,3	23	-0,0525
0,6	32,75	-0,0991
0,9	35	-0,0447
1,25	37	-0,0125

Fonte: JINESCU et al. (2000).

Velocidade mínima de fluidização

Em leitos não-vibrados, a velocidade mínima de fluidização corresponde à intersecção dos dois segmentos (inclinado e plano) da curva de fluidização. Como essa não é uma curva típica em LVF, a velocidade mínima de vibrofluidização é difícil de ser determinada (PAKOWSKI et al., 1984). Para minimizar essa dificuldade, GUPTA & MUJUMDAR (1980 b) propuseram a velocidade mínima de mistura em um LVF.

Define-se a velocidade mínima de fluidização como a velocidade perante a qual ocorre a fluidização convencional do leito, enquanto a velocidade mínima de mistura é a velocidade mínima para obter leito agitado.

Na Tabela 3, sumariza-se uma série de trabalhos para determinar a velocidade mínima de vibrofluidização. São todas equações empíricas, baseadas em diferentes conjuntos de dados:

TABELA 3. Correlações para a estimativa da velocidade mínima de vibrofluidização.

Autor	Correlação	Material*	Faixa de Γ	Eq.
BRATU & JINESCU (1972) ¹	$u_{mvf} = u_{mf} \left[1 - \frac{1+E}{2\pi j} \frac{A\omega^2}{g} \right]$	A, B	0-15	(11)
MUSHTAIEV & PLANOVSKY (19--) ³	$u_{mvf} = u_{mf} \left[1 - 0,08 \frac{A\omega^2}{g} \right]$	B	0-30	(12)
MUSHTAIEV et al. (1973) ^{1 e 2}	$u_{mvf} = 6,9 \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{0,63} \left(\frac{1}{v} \right)^{0,33} d_p^{0,88} \left(1 - 0,09 \frac{A\omega^2}{g} \right)$	B	0-30	(13)
GUPTA & MUJUMDAR (1980b)	$u_{mm} = u_{mf} (1,952 - 0,275\Gamma - 0,686\Gamma^2)$	D	0-3	(14)
RINGER & MUJUMDAR (1983-84)	$u_{mvf} = u_{mf} \sqrt{1 - \Gamma/\Gamma_{LVF}}$ $\Gamma_{LVF} = \Gamma \left[\frac{1}{1 - \Delta P S_L / m g} \right]$	B, D	0-3	(15)
ERDÉSZ & MUJUMDAR (1986)	$u_{mvf} = 0,8 u_{mf} \left(\frac{\Delta P_{mf}}{\Delta P_{mvf}} \right)^{2/3}$	B, D	0-12,9	(16)

* Classificação de Geldart; ¹ GUPTA & MUJUMDAR (1980 a e b); ² PAKOWSKI et al. (1984); ³ ERDÉSZ et al. (1986) e ERDÉSZ (1990).

RINGER & MUJUMDAR (1983-84) também propuseram as seguintes faixas operacionais para fluidização homogênea em LVF (Figura 9). Para $\Gamma < 1$, o leito é fixo (região delimitada pela linha 1); a região entre as linhas 1 e 2 corresponde à pequena movimentação no leito ($1 < \Gamma < 1,4$); na região entre a linha 2 e a linha 3, um estado de fluidização homogênea é alcançado. Por razões mecânicas, Γ não deve exceder 3,3, nem a velocidade superficial deve exceder u_{mf} . Para esses valores, o tempo de vôo se iguala ao período de oscilação, e comportamento instável do leito pode ocorrer. Além disso, as maiores forças de impacto são alcançadas na região próxima à linha 3.

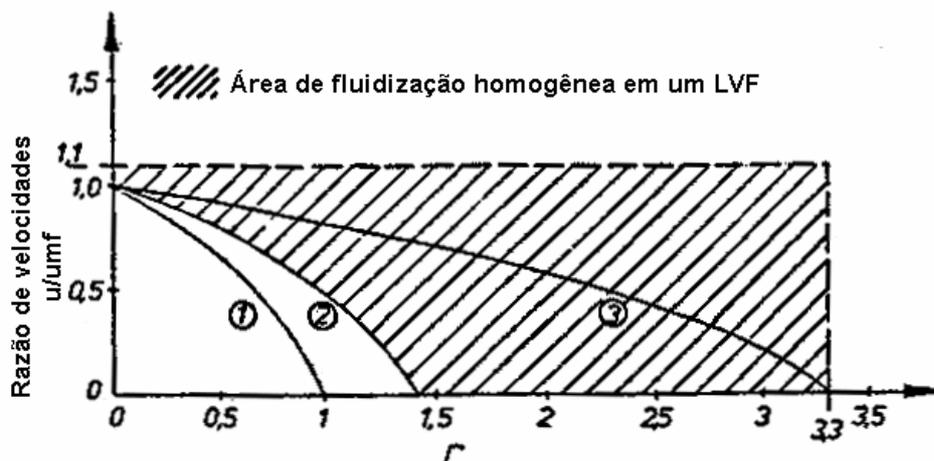


FIGURA 9. Mapa de regimes de fluxos em um LVF. Fonte: RINGER & MUJUMDAR (1983-84).

ERDÉSZ et al. (1986) e ERDÉSZ (1990), estudando a influência da velocidade mínima de fluidização em leitos de areia, verificaram o seguinte comportamento, mostrado na Figura 10.

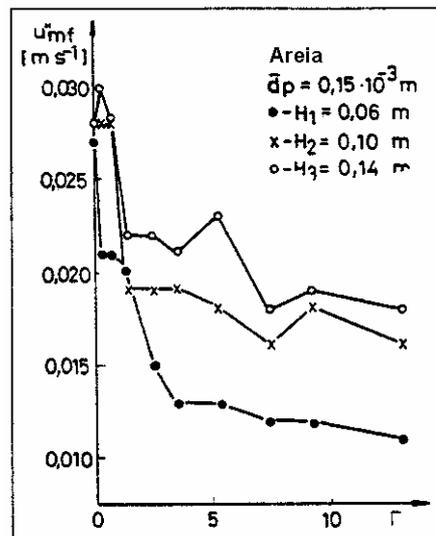


FIGURA 10. Velocidade mínima de fluidização em LVF versus Γ . Fonte: ERDÉSZ et al. (1986); ERDÉSZ (1990).

Conforme pode ser observado, há efeito redutor da vibração na velocidade mínima de fluidização, efeito esse também notado por MORENO et al. (2000) no comportamento de serragem em leito vibrofluidizado vertical, chegando a 50% do valor de leitos fluidizados convencionais.

JINESCU et al. (2000) também encontraram correlação para a velocidade mínima em LVF de persulfato de potássio (similar à da perda de carga):

$$u_{mf} = j_1 \left(\frac{A\omega^2}{g} \right)^{-j_2} \quad (17)$$

Os parâmetros j_1 e j_2 são ajustados em função da relação H_0/d_L , conforme mostrado na Tabela 4.

TABELA 4. Relação entre j_1 , j_2 e a razão H_0/d_L .

H_0/d_L	j_1	j_2
0,3	22	-0,0346
0,6	23	-0,0328
0,9	25	-0,0375
1,25	27,5	-0,0435

Nesse caso, foi observada redução de 30% na velocidade mínima no LVF em relação aos leitos fluidizados convencionais.

Porosidade do leito

Um dos parâmetros essenciais para a predição do movimento das partículas e da perda de carga é a porosidade do LVF. Mas os autores não têm consenso quanto a sua influência. Teoricamente, com a presença da vibração, a porosidade tende a cair devido à homogeneidade do leito, mas na prática isso nem sempre foi observado (RINGER & MUJUMDAR, 1983-84; PAKOWSKI et al., 1984).

Na Tabela 5, estão apresentadas as equações empíricas encontradas na literatura para estimar a porosidade do leito.

TABELA 5. Estimativa da porosidade do leito vibrofluidizado.

Autor	Correlação	Material*	Faixa de Γ	Eq.
CHEVILENKO et al. (1979) ¹	$\frac{H_d - H}{H_d} = \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon_0} =$ $= 1 - \exp \left[-0,54 \left(\frac{u}{u_{mf}} - 1 \right) \left(\frac{A \omega^2}{g} \right)^{0,75 \frac{u_{mf}}{u}} \right]$		1,37 e 4,72	(18)
BAKHMAN et al. (1970) ²	$\varepsilon = K_1 \text{Re}_{vib}^{K_2} \left(\frac{A}{d_p} \right)^{K_3} \left(\frac{m}{d_L^3 \rho_p} \right)^{K_4} \Gamma^{K_5}$ $\text{Re}_{vib} = \frac{\rho_g d_p \omega}{\nu}$	B, D	3,5-13	(19)
GINZBURG & SYROIÉDOV (1965) ²	$\varepsilon = \frac{1 - \varepsilon_0}{1 + 5,48 \frac{A}{H_0}}, \text{ onde } \varepsilon_0 = 1 - \frac{m}{\rho_p H_0 S}$	B	1-7	(20)
RINGER & MUJUMDAR (1983-84)	$(\varepsilon - \varepsilon_0) = 0,19 \left[W_0^2 / \left(g - \frac{\Delta P_{mf}}{H_0 \rho_s} \right) \right]^{0,21}$	B, D	0-3	(21)

* Classificação de Geldart; ¹ PAKOWSKI et al. (1984); ² ERDÉSZ (1990).

CHLENOV & MIKHAILOV (1965), citados por RINGER & MUJUMDAR (1983-84), encontraram o seguinte gráfico para um LVF de partículas de $d_p = 2500 \mu\text{m}$ e $\rho_p = 1420 \text{ kgm}^{-3}$.

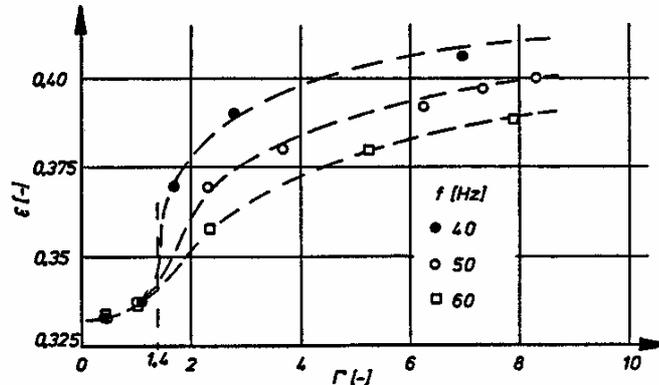


FIGURA 11. Porosidade do leito para um LVF. Fonte: RINGER & MUJUMDAR (1983-84).

Já ERDÉSZ et al. (1986) e ERDÉSZ (1990) determinaram o gráfico apresentado na Figura 12. Os resultados mostraram que, para altas vazões de ar, a diferença entre a porosidade do leito vibrado e não-vibrado desaparece.

Comparando-se as Figuras 5; 10 e 12, nota-se que, com o aumento de Γ (de zero), a perda de carga do leito primeiramente aumenta enquanto o leito se comprime ($\Gamma < 1$) e, então, diminui. Os autores também afirmaram que os parâmetros hidrodinâmicos (ou aerodinâmico) de perda de carga, velocidade mínima de fluidização e porosidade do leito vibrofluidizado são funções não-lineares de Γ .

Uma técnica de transmissão de luz foi utilizada por KUIPERS et al. (1992) para medir a porosidade local em leito fluidizado bidimensional. A calibração foi realizada utilizando os princípios da fluidização líquida-sólida e da vibrofluidização. A primeira técnica possibilita a única forma de geração de um leito expandido homogêneo de partículas sobre grande variedade de

porosidades. A segunda possibilita, aplicando-se certa amplitude e frequência, distribuição homogênea de partículas sólidas. Os dados experimentais dos perfis de porosidade foram muito bem ajustados com os modelos hidrodinâmicos encontrados em literatura.

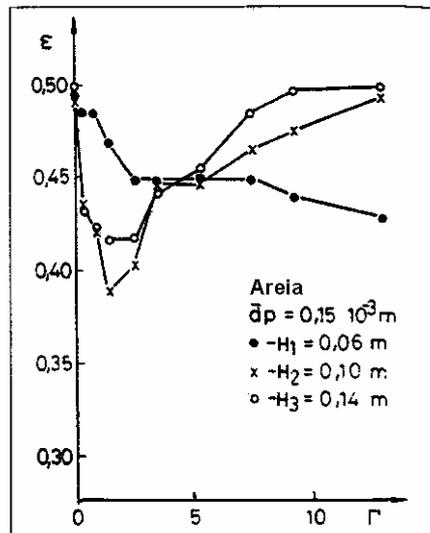


FIGURA 12. Porosidade de um LVF versus Γ . Fonte: ERDÉSZ et al. (1986); ERDÉSZ (1990).

CONCLUSÕES

Com relação ao efeito da vibração nas características aerodinâmicas de leitos vibrofluidizados, verificou-se que:

Quanto à perda de carga, grandes reduções foram observadas em decorrência da utilização da vibração.

Com a utilização da vibração, ocorreu efeito redutor na velocidade mínima de fluidização.

As correlações encontradas baseiam-se em equações empíricas em experimentos específicos. Devido à complexidade dos fenômenos e à dificuldade de determinações experimentais acuradas, as equações apresentam muitas aproximações.

Apesar da literatura vasta encontrada, são necessárias pesquisas futuras para a obtenção de mais dados que possam ser viáveis nos procedimentos para projetistas, em muitos equipamentos vibrofluidizados.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

NOMENCLATURA

ΔP - perda de carga, Pa;

A - amplitude da vibração, m;

d - diâmetro, m;

E - coeficiente de colisão elástica;

f - frequência de vibração, 1/s;

g - aceleração da gravidade, $m\ s^{-2}$;

H - altura do leito, m;

H_d - altura dinâmica do leito, m;

j - razão entre o tempo ascendente e descendente da partícula;

j₁ e j₂ - parâmetros das equações 11 e 18;

k_1 a k_7 - parâmetros das equações 7 e 20;
 k - condutividade térmica, W/m °C;
 L - comprimento característico, m;
 m - massa, kg;
 n - razão de frequência;
 P - pressão, Pa;
 R - constante universal dos gases ideais; J/mol K;
 S - área, m²;
 T - temperatura, °C ou K;
 t - tempo, s;
 u - velocidade do gás, m s⁻¹;
 V - volume, m³, e
 W_0 - velocidade de impacto, m s⁻¹.

Letras Gregas

ε - porosidade;
 ϕ - esfericidade;
 Γ - intensidade de vibração (parâmetro de vibração);
 ρ - densidade, kg m⁻³;
 μ - viscosidade dinâmica, Pa s;
 ν - viscosidade cinemática, m² s⁻¹, e
 ω - frequência angular de vibração, 1/s.

Subscritos

0 - inicial;
 g - gás;
 L - leito;
 mf - mínima de fluidização;
 mm - mínima de mistura;
 mvf - mínima de vibrofluidização;
 p - partícula;
 st - leito estacionário, e
 vib - condições de vibração do leito.

Adimensionais

Intensidade de vibração	$\Gamma = \frac{A\omega^2}{g}$	razão da força mássica máxima com a gravidade;
Número de Euler	$Eu = \frac{\Delta P}{\rho_g (u)^2}$	razão entre perdas friccionais pela velocidade ao quadrado;
Número de Reynolds	$Re = \frac{d \rho u}{\mu}$	expressa o comportamento do escoamento; razão entre forças inerciais e viscosas.

REFERÊNCIAS

- DELLA TONIA JUNIOR.; V.; FREIRE, J.T.; TOBINAGA, S. Leito vibrofluidizado I - desenvolvimento do equipamento e testes preliminares. In: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS - ENEMP, 17., 1989, São Carlos. *Anais...* São Carlos: UFSCar, 1989. v.1, p.307-11.
- ERDÉSZ, K. Hydrodynamic studies on vibrated fluidized beds. *Powder Handling & Processing*, Clausthad-Zellerfeld, v.2, n.4, p.327-39, 1990.

- ERDÉSZ, K.; MUJUMDAR, A.S. Hydrodynamic aspects of conventional and vibrofluidized beds - a comparative-evaluation. *Powder Technology*, Lausanne, v.46, n.2 e 3, p.167-72, 1986.
- ERDÉSZ, K.; MUJUMDAR, A.S. Numerical investigation of a phenomenological model for vibrated fluidized beds. *Drying Technology*, New York, v.7, n.3, p.487-502, 1989.
- ERDÉSZ, K.; MUJUMDAR, A.S.; RINGER, D.U. Hydrodynamic similarity of conventional and vibrated fluidized beds. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM (Drying '86), 5., 1986, Boston. *Proceedings...* Boston: Cambridge University, 1986. v.1, p.169-76.
- FINZER, J.R.D.; KIECKBUSCH, T.G. Secagem de fatias de cebola sob vibração. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v.6, n.2, p.99-120, 1986.
- FITO, P.J.; SANZ, F.J.; FLORS, A. Secado de salvado de arroz em lecho vibrofluidizado. I. Estudio de la fluidización. *Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos*, Valencia, v.15, n.2, p.220-26, 1975.
- GARIM, M.M.; FREIRE, J.T. Uma análise das curvas características de leitos fluidizados e vibrofluidizados utilizando as curvas de desvio-padrão das medidas realizadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS - ENEMP, 14., 1998, Teresópolis. *Anais...* Rio de Janeiro: DTQ/UFRRJ, 1998. v.1, p.253-9.
- GUPTA, R.; MUJUMDAR, A.S. Aerodynamics and thermal characteristics of vibrated fluid beds - a review. In: MUJUMDAR, A.S. (Org.). *Drying 80*. New York: Hemisphere Publishing, 1980a. v.1, p.141-50.
- GUPTA, R.; MUJUMDAR, A.S. Aerodynamics of a vibrated fluid bed. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Ottawa, v.58, n.3, p.332-8, 1980b.
- JINESCU, G.; TEBRENCU, C.; IONESCU, E.; PETRESCU, M.; JINESCU, C. Hydrodynamic aspects at vibrated-fluidized drying of polydisperse powdery materials. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM IDS2000, 12., 2000, Noordwijkerhout. *Proceedings...* Elsevier Science, 2000. 1 CD-ROM (paper, 244)
- KUIPERS, J.A.M.; TAMMES, H.; PRINS, W.; VANSWAAIJ, W.P.M. Experimental and theoretical porosity profiles in a 2-dimensional gas-fluidized bed with a central jet. *Powder Technology*, Lausanne, v.71, n.1, p.87-99, 1992.
- KUIPERS, N.J.M.; STAMHUIS, E.J.; BEENACKERS, A.A.C.M. Fluidization of potato starch in a stirred vibrating fluidized bed. *Chemical Engineering Science*, Oxford, v.51, n.11, p.2727-32, 1996.
- KUMARAN, V. Kinetic theory for a vibro-fluidized bed. *Journal of Fluid Mechanics*, United Kingdom, v.364, n.1, p.163-85, 1998.
- MORENO, R.; RÍOS, R.; CALBUCURA, H. Batch vibrating fluid dryer for sawdust particles: experimental results. *Drying Technology*, New York, v.18, n.7, p.1481-93, 2000.
- MORI, S.; HARUTA, T.; YAMAMOTO, A.; YAMADA, I.; MIZUTANI, E. Vibrofluidization of very fine particles. *International Chemical Engineering*, London, v.31, n.3, p.475-80, 1991.
- MUJUMDAR, A.S. Aerodynamics, heat transfer and drying in vibrated fluid beds. *Revista Latinoamericana de Transferencia de Calor y Materia*, La Plata, v.7, p.99-110, 1983.
- NODA, K.; MAWATARI, Y.; UCHIDA, S. Flow patterns of fine particles in a vibrated fluidized bed under atmospheric or reduced pressure. *Powder Technology*, Lausanne, v.99, n.1, p.11-14, 1998.
- PAKOWSKI, Z.; MUJUMDAR, A.S.; STRUMILLO, C. Theory and application of vibrated beds and vibrated fluid beds for drying process. In: MUJUMDAR, A.S. (Ed.) *Advances in drying*. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1984. v.3, cap.7, p.245-306.

RINGER, D.U.; MUJUMDAR, A.S. Analysis of aerodynamics and heat-transfer in vibro-fluidized beds. *Drying Technology*, New York, v.2, n.4, p.449-70, 1983-84.

STRUMILLO, C.; PAKOWSKI, Z. Drying of granular products in vibrofluidized beds. In: MUJUMDAR, A.S. (Ed.). *Drying '80: Developments in drying*. Washington: Hemisphere Publishing, 1980. v.1, p.211-26.