

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

ROGER VALERI DALEFFE

CONTRIBUIÇÕES PARA A ANÁLISE DO COMPORTAMENTO
FLUIDODINÂMICO DE UM LEITO VIBROFLUIDIZADO

TESE DE DOUTORADO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**CONTRIBUIÇÕES PARA A ANÁLISE DO COMPORTAMENTO
FLUIDODINÂMICO DE UM LEITO VIBROFLUIDIZADO**

ROGER VALERI DALEFFE

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: Prof. Dr. José Teixeira Freire

SÃO CARLOS - SP
2005

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

D139ca Daleffe, Roger Valeri.
Contribuições para a análise do comportamento fluidodinâmico
de um leito vibrofluidizado / Roger Valeri Daleffe. -- São Carlos:
UFSCar, 2005.
334 p.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2005.

1. Fluidização. 2. Leito vibrofluidizado. 3. Leito fluidizado. 4.
Leito vibrado. 5. Segregação granulométrica. 6. Fluidodinâmica. I.
Título.

CDD: 660.284292 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE **Roger Valeri Daleffe**, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 25 DE NOVEMBRO DE 2005.

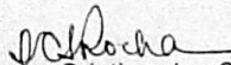
BANCA EXAMINADORA:



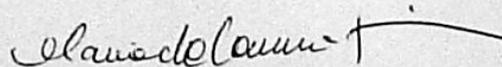
Prof. Dr. José Teixeira Freire
Orientador, PPG-EQ/UFSCar



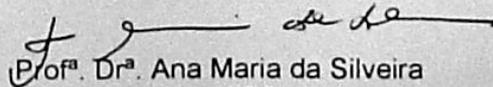
Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde
FEQ/UFU



Profª. Drª. Sandra Cristina dos Santos Rocha
FEQ-UNICAMP



Profª. Drª. Maria do Carmo Ferreira
DEQ/UFSCar



Profª. Drª. Ana Maria da Silveira
DEQ-UFSCar

Verba volant scripta manent

À minha família, em especial ao meu amado pai Vilmar Daleffe, que com muito amor me preparou para a vida, sempre mostrando que é com luta e muito trabalho que se vence.

Aos meus amados, Renan Daleffe e Sandrigo Daleffe, por transmitirem alegria à minha vida.

AGRADEÇO:

Agradeço a Deus por estar sempre presente em minha vida, dando equilíbrio, compartilhando amor e cuidando para que tudo dê certo.

A minha noiva Cecilia Rocío Morales Leiva pelo apoio incondicional, amor, encorajamento, compreensão e ajuda ao longo de todo este doutorado.

Ao Professor Dr. José Teixeira Freire pela agradável orientação, conselhos, estímulo, cuidado e dedicação que teve durante o desenvolvimento deste trabalho, pela sua carinhosa amizade e exemplo profissional.

Aos Professores Dr^a. Maria do Carmo Ferreira, Dr^a. Ana Maria da Silveira, Dr. Ronaldo Guimarães Corrêa e Dr. Dermeval José Mazzini Sartori pelos conselhos, colaboração e acima de tudo, pela amizade.

Ao técnico mecânico Oscar da Silva por ajudar na construção e na montagem do equipamento.

Aos funcionários do DEQ/UFSCar.

A todos os meus colegas e amigos do DEQ/UFSCar e da USP.

Aos companheiros de todas as repúblicas ao longo de todos estes anos em São Carlos, que me apoiaram e compartilharam de bons momentos.

A FAPESP pela bolsa de Doutorado e pelo auxílio financeiro (Processo 01/13987-0), que viabilizaram a realização deste trabalho e ao CNPq e ao PRONEX/FINEP pelo suporte técnico.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE QUADROS E TABELAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xxiii
RESUMO	xxvi
ABSTRACT	xxviii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 Generalidades	7
2.1.1 <i>Leito Vibrofluidizado</i>	7
2.1.2 <i>Adimensional de Vibração (I)</i>	9
2.1.3 <i>Regimes de Operação</i>	13
2.1.4 <i>Classificação das Partículas</i>	16
2.2 Propriedades Fluidodinâmicas	18
2.2.1 <i>Velocidade Mínima de Fluidização e Velocidade Mínima de Mistura</i>	21
2.2.2 <i>Perda de Carga no Leito</i>	32
2.2.3 <i>Porosidade do Leito</i>	39
2.2.4 <i>Desvio Padrão da Queda de Pressão</i>	42

2.3 Secagem de Pastas	48
2.4 Distribuição Granulométrica e Segregação	64
2.4.1 Leito Fluidizado.....	64
2.4.2 Leito Vibrofluidizado e Vibrado.....	73
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	76
3.1 Materiais.....	76
3.1.1 Partículas.....	76
3.1.2 Glicerol.....	77
3.2 Equipamentos	78
3.3 Metodologia Experimental	88
3.1.1 Fluidodinâmica.....	89
3.1.2 Ensaios Fluidodinâmicos Preliminares.....	91
3.1.3 Análise Fluidodinâmica do Leito Fluidizado e Vibrofluidizado.....	92
3.1.4 Efeito da Distribuição de Partículas sobre a Fluidodinâmica e a Segregação	95
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	99
4.1 Ensaios Fluidodinâmicos Preliminares.....	99
4.2 Análise Fluidodinâmica do Leito Fluidizado e Vibrofluidizado	118
4.2.1 Reprodutibilidade das Curvas Características e de Desvio Padrão	119

4.2.2 Efeito do Grau de Saturação de Líquido (Glicerol)	124
4.2.3 Efeito da Amplitude, da Freqüência e do Adimensional de Vibração	136
4.2.4 Efeito do Diâmetro das Partículas Inertes	155
4.3 Efeito da Distribuição de Partículas sobre a Fluidodinâmica e a Segregação	160
5 CONCLUSÕES	175
5.1 Ensaios Fluidodinâmicos Preliminares	175
5.2 Análise Fluidodinâmica do Leito Fluidizado e Vibrofluidizado	177
5.3 Efeito da Distribuição de Partículas sobre a Fluidodinâmica e a Segregação	179
6 SUGESTÕES	181
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	183
APÊNDICE A - Dados experimentais da queda de pressão no leito e do seu desvio padrão, para a análise dos ensaios fluidodinâmicos preliminares em leito fluidizado e vibrofluidizado	198
APÊNDICE B - Dados experimentais da queda de pressão no leito e do seu desvio padrão, para a análise dos experimentos fluidodinâmicos em leito fluidizado e vibrofluidizado	218
APÊNDICE C - Dados experimentais da queda de pressão no leito, do seu desvio padrão e da segregação, para a análise da distribuição de partículas sobre a fluidodinâmica em leito fluidizado, vibrado e vibrofluidizado	305

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1:** Diagrama de Geldart para classificação de partículas para o ar em condições ambientes; (adaptado de Geldart, 1973)..... 17
- Figura 2.2:** Tipos de curvas características: (a) leito fluidizado; (b, c, d) leito vibrofluidizado; escalas logarítmicas (adaptado de Strumillo e Pakowski, 1980)..... 19
- Figura 2.3:** Representação de uma curva de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar para um leito fluidizado convencional. 22
- Figura 2.4:** U_{mvf} / U_{mf} em função do adimensional de vibração, parametrizado na altura de leito estático e com U_{mf} obtido pela Equação 7 (vide página 24); inertes de polietileno; $d_p = 3,11 \times 10^{-3}$ m; $A = 4,25 \times 10^{-3}$ m; (adaptado de Gupta e Mujumdar, 1980a). 22
- Figura 2.5:** U_{mm}/U_{mf} em função do adimensional de vibração, parametrizado no tipo de partícula e com U_{mf} obtido pela Equação 7; (adaptado de Gupta e Mujumdar, 1980a)..... 23
- Figura 2.6:** Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, parametrizado em Γ ; $\phi = 0,0000$; $A = 3,0 \times 10^{-3}$ m; $T = 40$ °C; $d_p = 1,10 \times 10^{-3}$ m (adaptado de Daleffe, 2002). 30
- Figura 2.7:** Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado em d_p ; $\phi = 0,0000$; $\Gamma = 0,00$; $T = 40$ °C; (adaptado de Daleffe, 2002)..... 31
- Figura 2.8:** Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado em d_p ; $\phi = 0,0000$; $f = 11,1$ Hz; $\Gamma = 1,50$; $T = 40$ °C; (adaptado de Daleffe, 2002)..... 32
- Figura 2.9:** $\Delta p/H_0$ em função da velocidade superficial do ar, parametrizado na frequência angular de vibração; escala logarítmica (adaptado de Gupta e Mujumdar, 1980a)..... 34

- Figura 2.10:** Efeito do adimensional de vibração sobre $(\Delta p_{mf})_{LVF}/(\Delta p_{mf})_{LF}$, parametrizado em A e H_0 ; (adaptado de Erdész e Ormós, 1984). 36
- Figura 2.11:** Efeito do adimensional de vibração sobre (Δp_{mf}) parametrizado em A e H_0 ; (adaptado de Erdész e Ormós, 1984). 37
- Figura 2.12:** Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, parametrizado na altura de leito estático; esferas de vidro; $d_p = 0,7 \times 10^{-3}$ m; $f = 10$ Hz; $A = 1,98 \times 10^{-2}$ m; $\Gamma = 1,27$ (adaptado de Camargo, 1998). 38
- Figura 2.13:** Porosidade do leito em função do adimensional de vibração, parametrizado em f; areia de quartzo; (adaptado de Chlenov e Mikhailov, 1965). 40
- Figura 2.14:** Desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, parametrizado em Γ ; esferas de vidro; $H_0 = 0,09$ m; $A = 1,95 \times 10^{-3}$ m; $d_p = 1,10 \times 10^{-3}$ m; (adaptado de Garim, 1998). 45
- Figura 2.15:** Desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, parametrizado em Γ ; esferas de vidro; $H_0 = 7,0 \times 10^{-2}$ m; (adaptado de Camargo e Freire, 2002). 46
- Figura 2.16:** Queda de pressão no leito e desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar, parametrizado em Γ ; $d_p = 1,10 \times 10^{-3}$ m; $T = 40^\circ$ C; $\phi = 0,0000$; (adaptado de Daleffe e Freire, 2004). 48
- Figura 2.17:** $(U_{mvf})_{ca}/(U_{mvf})_{sa}$ em função da concentração de água no leito, parametrizada em A; (adaptado de Pakowski *et al.*, 1984). 52
- Figura 2.18:** Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, parametrizado em Γ ; esferas de vidro; $d_p = 3,53 \times 10^{-2}$ m; $H_0 = 0,095$ m; $\phi = 0,0108$; (adaptado de Malhotra *et al.*, 1984). 57
- Figura 2.19:** Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, parametrizado em Γ ; esferas de vidro; $d_p = 3,53 \times 10^{-2}$ m; $H_0 = 0,095$ m; $\phi = 0,0216$; (adaptado de Malhotra *et al.*, 1984). 58

Figura 2.20: Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, parametrizado em Γ ; esferas de vidro; $d_p = 6,67 \times 10^{-2}$ m; $H_0 = 0,095$ m; $\phi = 0,0108$; (adaptado de Malhotra <i>et al.</i> , 1984).....	59
Figura 2.21: Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar; (adaptado de Daleffé e Freire, 2004).....	60
Figura 2.22: Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar; (adaptado de Daleffé e Freire, 2004).....	61
Figura 2.23: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função da velocidade superficial do ar, parametrizado em ϕ ; $\Gamma = 0,00$; $d_p = 1,10 \times 10^{-3}$ m; (adaptado de Daleffé e Freire, 2004).....	62
Figura 2.24: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função da velocidade superficial do ar, parametrizado em ϕ ; $\Gamma = 1,00$; $d_p = 1,10 \times 10^{-3}$ m; (adaptado de Daleffé e Freire, 2004).....	63
Figura 2.25: Representação de uma curva de queda de pressão total no leito em função da velocidade de um gás, para uma mistura binária de partículas e para partículas de tamanho uniforme (adaptado de Gauthier <i>et al.</i> , 1999).....	71
Figura 3.1: Esquema geral do secador de leito vibrofluidizado.....	80
Figura 3.2: Fotografia do leito vibrofluidizado esquematizado na Figura 3.1.....	82
Figura 3.3: Detalhes fotográficos do equipamento mostrado na Figura 3.2: (a) câmara do leito; (b) computadores utilizados na aquisição de dados; (c) soprador de ar e aquecedor elétrico.....	83
Figura 3.4: “Painel Frontal” do <i>software</i> desenvolvido em Labview.....	84
Figura 3.5: “Diagrama de blocos” do <i>software</i> desenvolvido em Labview.....	85
Figura 3.6: Fotografia do leito vibrofluidizado com o fio de cobre aterrado circundando o leito, minimizando as cargas eletrostáticas.....	86

- Figura 3.7:** Fotografia do tubo de sucção adaptado, fixado à mangueira de conexão que é ligada ao aspirador de partículas..... 88
- Figura 4.1:** Réplica da queda de pressão no leito e do seu desvio padrão, em função de U_s ; $\Gamma = 0,00$; $d_p = 17,00 \times 10^{-3}$ m..... 100
- Figura 4.2:** Réplica da queda de pressão no leito e do seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 6,00$; $f = 12,90$ Hz; $d_p = 17,00 \times 10^{-3}$ m. 102
- Figura 4.3:** Queda de pressão no leito em função de U_s , parametrizado no diâmetro médio das partículas e no tipo de material; VI = vidro; PS = poliestireno; PP = polipropileno; $\Gamma = 0,00$ 103
- Figura 4.4:** Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s , parametrizado no diâmetro médio das partículas; vidro; $\Gamma = 0,00$ 105
- Figura 4.5:** Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s , parametrizado no diâmetro médio das partículas; vidro; $\Gamma = 6,00$; $f = 12,90$ Hz. 108
- Figura 4.6:** Velocidade mínima de fluidização em função do diâmetro médio das partículas inertes, para o leito fluidizado e vibrofluidizado; vidro; $d_p = 17,00 \times 10^{-3}$ m. 110
- Figura 4.7:** Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s , parametrizado no tipo de partícula; $d_p = 3,67 \times 10^{-3}$ m; vidro ($\rho_p = 2500$ kg/m³; $\phi \approx 1$); polipropileno ($\rho_p = 935$ kg/m³; $\phi = 0,93$); $\Gamma = 0,00$ 112
- Figura 4.8:** Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s , parametrizado no diâmetro e no tipo de partícula; poliestireno ($d_e = 2,51 \times 10^{-3}$ m; $\phi = 0,82$); polipropileno ($d_p = 2,60 \times 10^{-3}$ m; $\phi = 0,93$); $\Gamma = 0,00$ 113
- Figura 4.9:** Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s , parametrizado no adimensional de vibração; $A = 1,0 \times 10^{-2}$ m; $d_p = 1,10 \times 10^{-3}$ m. 114

Figura 4.10: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s , parametrizado no adimensional de vibração; vidro; $d_p = 17,00 \times 10^{-3}$ m; $A = 1,0 \times 10^{-2}$ m.	116
Figura 4.11: Réplica da queda de pressão no leito e do seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 0,00$; $\phi = 0,0000$; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m.	120
Figura 4.12: Réplica da queda de pressão no leito e do seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 0,00$; $\phi = 0,0072$; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m.	121
Figura 4.13: Réplica da queda de pressão no leito e do seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,021$ m; $f = 4,86$ Hz; $\phi = 0,0000$; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m.	122
Figura 4.14: Réplica da queda de pressão no leito e do seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,021$ m; $f = 4,86$ Hz; $\phi = 0,0072$; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m.	123
Figura 4.15: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 0,00$; $d_p = 1,10 \times 10^{-3}$ m.	125
Figura 4.16: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,003$ m; $f = 12,87$ Hz; $d_p = 1,10 \times 10^{-3}$ m.	127
Figura 4.17: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 0,00$; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m.	128
Figura 4.18: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,021$ m; $f = 4,86$ Hz; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m.	131
Figura 4.19: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 0,00$; $d_p = 3,68 \times 10^{-3}$ m.	133
Figura 4.20: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,003$ m; $f = 12,87$ Hz; $d_p = 3,68 \times 10^{-3}$ m.	136
Figura 4.21: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m; $\Gamma = 1,00$; $\phi = 0,0000$	138

Figura 4.22: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m; $\Gamma = 1,00$; $\phi = 0,0072$.	141
Figura 4.23: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m; $\Gamma = 2,00$; $\phi = 0,0000$.	143
Figura 4.24: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m; $\Gamma = 2,00$; $\phi = 0,0072$.	144
Figura 4.25: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m; $\Gamma = 4,00$; $\phi = 0,0000$.	146
Figura 4.26: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m; $\Gamma = 4,00$; $\phi = 0,0072$.	147
Figura 4.27: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $d_p = 3,68 \times 10^{-3}$ m; $\phi = 0,0000$.	149
Figura 4.28: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $d_p = 3,68 \times 10^{-3}$ m; $\phi = 0,0072$.	150
Figura 4.29: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $A = 0,003$ m; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m; $\phi = 0,0000$.	152
Figura 4.30: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $A = 0,003$ m; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m; $\phi = 0,0072$.	153
Figura 4.31: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $A = 0,021$ m; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m; $\phi = 0,0000$.	154
Figura 4.32: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 0,00$; $\phi = 0,0000$.	157
Figura 4.33: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 0,00$; $\phi = 0,0072$.	158
Figura 4.34: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 4,00$; $A = 0,003$ m; $f = 18,20$ Hz; $\phi = 0,0072$.	159

- Figura 4.35:** Réplica da queda de pressão no leito e do seu desvio padrão em função de U_s ; distribuição plana; $d_s = 2,18 \times 10^{-3}$ m; $\Gamma = 0,00$ 162
- Figura 4.36:** Réplica da queda de pressão no leito e do seu desvio padrão em função de U_s ; distribuição plana; $d_s = 2,18 \times 10^{-3}$ m; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,003$ m; $f = 12,87$ Hz. 163
- Figura 4.37:** Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 0,00$; (a) tamanhos uniformes; (b) distribuições. 164
- Figura 4.38:** Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,003$ m; $f = 12,87$ Hz; (a) tamanhos uniformes; (b) distribuições. 165
- Figura 4.39:** Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,009$ m; $f = 7,43$ Hz; (a) tamanhos uniformes; (b) distribuições. 166
- Figura 4.40:** Leito fluidizado; $\Gamma = 0,00$; $U_s = 1,57$ m/s; (a) X_i em função de d_p ; (b) fotografia do leito em operação. 168
- Figura 4.41:** Leito vibrofluidizado; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,003$ m; $f = 12,87$ Hz; $U_s = 1,33$ m/s; (a) X_i em função de d_p ; (b) fotografia do leito em operação. 169
- Figura 4.42:** Leito vibrofluidizado; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,009$ m; $f = 7,43$ Hz; $U_s = 1,50$ m/s; (a) X_i em função de d_p ; (b) fotografia do leito em operação. 171
- Figura 4.43:** Leito vibrado; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,003$ m; $f = 12,87$ Hz; $U_s = 0,00$ m/s; (a) X_i em função de d_p ; (b) fotografia do leito em operação. 173
- Figura 4.44:** Leito vibrado; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,009$ m; $f = 7,43$ Hz; $U_s = 0,00$ m/s; (a) X_i em função de d_p ; (b) fotografia do leito em operação. 173
- Figura C.1:** X_i em função de d_p ; leito fluidizado; $\Gamma = 0,00$; $\varepsilon = 0,52$ 330
- Figura C.2:** X_i em função de d_p ; leito vibrofluidizado; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,003$ m; $f = 12,87$ Hz; $\varepsilon = 0,45$ 330

Figura C.3: X_i em função de d_p ; leito vibrofluidizado; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,009$ m; $f = 7,43$ Hz; $\varepsilon = 0,57$	331
Figura C.4: X_i em função de d_p ; leito vibrado; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,003$ m; $f = 12,87$ Hz; $\varepsilon = 0,43$	331
Figura C.5: X_i em função de d_p ; leito vibrado; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,009$ m; $f = 7,43$ Hz; $\varepsilon = 0,48$	332
Figura C.6: X_i em função de d_p ; leito fluidizado; $\Gamma = 0,00$; $\varepsilon = 0,48$	332
Figura C.7: X_i em função de d_p ; leito vibrofluidizado; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,003$ m; $f = 12,87$ Hz; $\varepsilon = 0,40$	333
Figura C.8: X_i em função de d_p ; leito vibrofluidizado; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,009$ m; $f = 7,43$ Hz; $\varepsilon = 0,60$	333
Figura C.9: X_i em função de d_p ; leito vibrado; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,003$ m; $f = 12,87$ Hz; $\varepsilon = 0,43$	334
Figura C.10: X_i em função de d_p ; leito vibrado; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,009$ m; $f = 7,43$ Hz; $\varepsilon = 0,48$	334

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 2.1: Parâmetros experimentais utilizados por Daleffe (2002).....	26
Quadro 2.2: Correlações para velocidade mínima de vibrofluidização - U_{mvf}	28
Quadro 2.3: Correlações para queda de pressão na mínima fluidização, para o leito vibrofluidizado - $(\Delta p_{mf})_{LVF}$	33
Quadro 2.4: Alguns tipos de materiais secos em leito vibrofluidizado.	50
Tabela 3.1: Viscosidade do glicerol (Schneider e Bridgwater, 1993).....	78
Tabela 3.2: Densidade do glicerol (Windholz, 1996).	78
Tabela 3.3: Pressão de vapor do glicerol (Lide, 1998 e Perry e Green, 2000).....	78
Tabela 3.4: Valores dos parâmetros utilizados nos ensaios preliminares.	92
Tabela 3.5a: Valores dos parâmetros vibracionais utilizados nos experimentos fluidodinâmicos.	94
Tabela 3.5b: Valores dos demais parâmetros utilizados nos experimentos fluidodinâmicos.	94
Tabela 3.6: Valores dos parâmetros utilizados nos experimentos de segregação.	96
Tabela 3.7: Descrição da distribuição de tamanho das partículas, para $d_s = 2,18 \times 10^{-3}$ m.....	97
Tabela A.1: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	199
Tabela A.2: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	200
Tabela A.3: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	201
Tabela A.4: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	202
Tabela A.5: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	203

Tabela A.6: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	204
Tabela A.7: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	205
Tabela A.8: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	206
Tabela A.9: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	207
Tabela A.10: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	208
Tabela A.11: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	209
Tabela A.12: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	210
Tabela A.13: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	211
Tabela A.14: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	212
Tabela A.15: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	213
Tabela A.16: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	214
Tabela A.17: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	215
Tabela A.18: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	216

Tabela A.19: Valores das réplicas da queda de pressão no leito e do seu desvio padrão, em função da velocidade superficial do ar.....	217
Tabela B.1: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	219
Tabela B.2: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	220
Tabela B.3: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	221
Tabela B.4: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	222
Tabela B.5: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	223
Tabela B.6: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	224
Tabela B.7: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	225
Tabela B.8: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	226
Tabela B.9: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	227
Tabela B.10: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	228
Tabela B.11: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	229
Tabela B.12: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	230

Tabela B.13: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	231
Tabela B.14: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	232
Tabela B.15: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	233
Tabela B.16: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	234
Tabela B.17: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	235
Tabela B.18: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	236
Tabela B.19: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	237
Tabela B.20: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	238
Tabela B.21: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	239
Tabela B.22: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	240
Tabela B.23: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	241
Tabela B.24: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	242
Tabela B.25: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	243

Tabela B.26: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	244
Tabela B.27: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	245
Tabela B.28: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	246
Tabela B.29: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	247
Tabela B.30: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	248
Tabela B.31: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	249
Tabela B.32: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	250
Tabela B.33: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	251
Tabela B.34: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	252
Tabela B.35: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	253
Tabela B.36: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	254
Tabela B.37: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	255
Tabela B.38: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	256

Tabela B.39: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	257
Tabela B.40: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	258
Tabela B.41: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	259
Tabela B.42: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	260
Tabela B.43: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	261
Tabela B.44: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	262
Tabela B.45: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	263
Tabela B.46: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	264
Tabela B.47: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	265
Tabela B.48: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	266
Tabela B.49: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	267
Tabela B.50: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	268
Tabela B.51: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	269

Tabela B.52: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	270
Tabela B.53: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	271
Tabela B.54: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	272
Tabela B.55: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	273
Tabela B.56: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	274
Tabela B.57: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	275
Tabela B.58: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	276
Tabela B.59: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	277
Tabela B.60: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	278
Tabela B.61: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	279
Tabela B.62: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	280
Tabela B.63: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	281
Tabela B.64: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	282

Tabela B.65: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	283
Tabela B.66: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	284
Tabela B.67: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	285
Tabela B.68: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	286
Tabela B.69: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	287
Tabela B.70: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	288
Tabela B.71: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	289
Tabela B.72: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	290
Tabela B.73: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	291
Tabela B.74: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	292
Tabela B.75: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	293
Tabela B.76: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	294
Tabela B.77: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	295

Tabela B.78: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	296
Tabela B.79: Valores das réplicas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	297
Tabela B.80: Valores das réplicas do desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar.....	298
Tabela B.81: Valores das réplicas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	299
Tabela B.82: Valores das réplicas do desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar.....	300
Tabela B.83: Valores das réplicas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	301
Tabela B.84: Valores das réplicas do desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar.....	302
Tabela B.85: Valores das réplicas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	303
Tabela B.86: Valores das réplicas do desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar.....	304
Tabela C.1: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	306
Tabela C.2: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	307
Tabela C.3: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	308
Tabela C.4: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	309

Tabela C.5: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	310
Tabela C.6: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	311
Tabela C.7: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	312
Tabela C.8: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	313
Tabela C.9: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	314
Tabela C.10: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	315
Tabela C.11: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	316
Tabela C.12: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	317
Tabela C.13: Valores das réplicas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	318
Tabela C.14: Valores das réplicas do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	319
Tabela C.15: Valores das réplicas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	320
Tabela C.16: Valores das réplicas do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	321
Tabela C.17: Valores das réplicas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	322

Tabela C.18: Valores das réplicas do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	323
Tabela C.19: Valores das réplicas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	324
Tabela C.20: Valores das réplicas do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	325
Tabela C.21: Valores das réplicas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	326
Tabela C.22: Valores das réplicas do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	327
Tabela C.23: Valores das réplicas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	328
Tabela C.24 Valores das réplicas do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.....	329

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Área	[m ²]
A	Amplitude de vibração	[m]
d	Diâmetro ou diâmetro médio	[m]
EL	Coefficiente de colisão elástica	[-]
f	Frequência de vibração	[s ⁻¹]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
H	Altura de leito	[m]
I _e	Energia específica de vibração	[m/s ²]
I _p	Potência específica de vibração	[m ² /s ³]
j	Razão entre o tempo ascendente e descendente da partícula	[-]
j ₁ e j ₂	Parâmetros da Equação 14	[-]
L	Comprimento do leito	[m]
m	Massa	[kg]
m ₁ e m ₂	Parâmetros da Equação 20	[-]
n	Parâmetro definido nas Equações (15) e (16)	[m ⁻¹]
T	Temperatura	[°C]
U	Velocidade	[m/s]
V _g	Volume de glicerol adicionado no leito de partículas	[m ³]
V _p	Volume de poros no leito estático de partículas	[m ³]
X	Fração mássica	[-]

SÍMBOLOS GREGOS

Γ	Adimensional de vibração	[-]
δp	Desvio padrão das medidas de queda de pressão no leito	[N/m ²]
Δp	Queda de pressão no leito	[N/m ²]

Δp_m	Queda de pressão máxima	$[\text{N}/\text{m}^2]$
ε	Porosidade no leito	$[-]$
μ	Viscosidade do ar	$[\text{Pa}/\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}]$
ν_g	Viscosidade cinemática do gás	$[\text{m}^2/\text{s}^2]$
ρ	Densidade	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
ρ_s	Densidade do sólido	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
ϕ	Grau de saturação de glicerol (V_g/V_p)	$[-]$
φ	Esfericidade da partícula	$[-]$
ω	Frequência angular de vibração ($2\pi f$)	$[\text{rad s}^{-1}]$

ÍNDICES SUBSCRITOS

0	Estático
ca	Inerte com água
e	equivalente
fc	Fluidização completa
fi	Fluidização incipiente
g	Gás ou glicerol
gr	Partículas grandes
He	Partículas pesadas
i	Para o componente i
L	Leito
LF	Leito fluidizado
Li	Partículas leves
LVF	Leito vibrofluidizado
m	Mistura de partículas
mf	Mínima de fluidização ou na mínima fluidização
mm	Mínima de mistura

mv	Média de vibração
mvf	Mínima de vibrofluidização ou na mínima vibrofluidização
p	Partícula
pe	Partículas pequenas
s	Superficial do ar no leito
sa	Inerte sem água

ADIMENSIONAIS

Número de Arquimedes: $Ar = \frac{\rho(\rho_p - \rho)gd_p^3}{\mu^2}$

Número de Reynolds da partícula na U_{mf} : $(Re_p)_{mf} = \sqrt{(33,7)^2 + 0,0408Ar} - 33,7$

RESUMO

Os leitos vibrofluidizados que utilizam partículas inertes como meio para fluidização estão se destacando como uma nova alternativa para a secagem de pastas e suspensões. A fim de contribuir para a compreensão dos fenômenos envolvidos neste processo, neste trabalho foi efetuada uma investigação do comportamento fluidodinâmico do leito vibrofluidizado (e fluidizado), constituído de partículas inertes e utilizando o glicerol para simular a presença de um líquido. O propósito desta pesquisa é efetuar uma investigação detalhada dos efeitos da amplitude, da frequência, do adimensional de vibração, do grau de saturação de líquido, do tamanho e da densidade das partículas inertes sobre o comportamento fluidodinâmico do leito. De forma complementar, realizar um estudo experimental da influência da distribuição granulométrica sobre o comportamento dinâmico das partículas inertes no leito fluidizado, vibrado (sem escoamento de ar) e vibrofluidizado, avaliando-se também o fenômeno da segregação.

Os experimentos foram divididos em três conjuntos: no primeiro realizou-se ensaios fluidodinâmicos preliminares; no segundo, analisou-se o comportamento fluidodinâmico do leito fluidizado e vibrofluidizado e, no terceiro, estudou-se o efeito da distribuição de partículas sobre a dinâmica dos leitos fluidizado, vibrado e vibrofluidizado.

O equipamento utilizado foi um leito vibrofluidizado composto por uma câmara de vidro, com seção circular de 0,114 m de diâmetro, 0,50 m de altura e 0,003 m de espessura. As partículas inertes utilizadas nos ensaios fluidodinâmicos preliminares foram esferas de vidro do tipo “ballotini” ($\rho_p = 2.500 \text{ kg/m}^3$), com diâmetros médios entre $1,10 \times 10^{-3}$ e $17,00 \times 10^{-3}$ m, esferóides de polipropileno ($\rho_p = 935 \text{ kg/m}^3$) com diâmetros médios de $2,60 \times 10^{-3}$ e $3,67 \times 10^{-3}$ m e cilindros elípticos de poliestireno ($\rho_p = 1.050 \text{ kg/m}^3$) com diâmetro equivalente (da esfera de mesmo volume) de $2,51 \times 10^{-3}$ m. O leito foi operado com adimensionais de vibração entre 0,00 e 6,00, para amplitudes entre 0,000 e 0,021 m, frequências entre 0,00 e 18,20 Hz e graus de saturação de glicerol (volume de glicerol por volume de poros no leito estático) entre 0,0000 e 0,0072. O glicerol foi utilizado para simular a presença de líquido alimentado em batelada, uma vez que este praticamente não

evapora nestas condições experimentais. Idênticos valores de adimensionais de vibração (Γ) foram obtidos utilizando diferentes combinações entre amplitudes (A) e frequências (f) de vibração, com o objetivo de verificar sua universalidade para descrever as características de vibração de um leito vibrofluidizado. No estudo do efeito da distribuição de partículas sobre a dinâmica do leito fluidizado, vibrado e vibrofluidizado, foram utilizadas quatro distribuições de partículas (binária, plana, gaussiana e de referência), com diâmetros médios de Sauter de $2,18 \times 10^{-3}$ m.

No intervalo de condições experimentais utilizadas nos experimentos fluidodinâmicos, observou-se que isoladamente o adimensional de vibração não representou de maneira única o comportamento fluidodinâmico do sistema. Em todos os casos onde estava presente o glicerol, constatou-se a ocorrência de algum nível de aglomeração das partículas, tornando a fluidização de má qualidade e irregular. A vibração nestes casos melhorou a movimentação das partículas, minimizando a aglomeração e atenuando a formação de canais preferenciais.

Quando foi empregada uma distribuição de partículas no leito, observou-se de uma forma global a ocorrência de segregação em quase todos os casos. No leito fluidizado, houve a migração das partículas menores para parte superior do leito, no vibrado ocorreu a migração das partículas maiores para parte superior do leito. Para o leito vibrofluidizado submetido à uma baixa amplitude de vibração (0,003 m) houve segregação, mas em menor quantidade que no leito fluidizado, enquanto que, quando submetido à alta amplitude de vibração (0,009 m), não ocorreu a segregação granulométrica.

ABSTRACT

Vibro-fluidized beds with inert particles as fluidizing medium have been appearing as an innovative technique for drying of suspensions and pastes. Aiming to contribute for the comprehension of phenomena involved in such processes, an investigation of fluid dynamic behavior of a vibro-fluidized (and also of a fluidized) bed with inert particles was carried out in this work. Glycerol was employed to wet the inert particles and then simulate the presence of a liquid paste into the bed. The purpose of the present work is to obtain a detailed investigation of the effects of amplitude, frequency of vibration, dimensionless vibration number, degree of liquid saturation, and of the particle size and density on the fluid dynamic behavior of the bed. The research included also an experimental investigation on the effects of the particle size distribution on the dynamic of inert particles into the fluidized, vibrated and vibro-fluidized beds, with an evaluation of size segregation patterns.

The experiments were divided into three groups: in the first one, preliminary fluid dynamics tests were carried out; in the second one, the fluid dynamic behavior of fluidized and vibro-fluidized beds was investigated, and in the last one, the effects of particle size distribution on the dynamics of fluidized, vibrated and vibro-fluidized beds were verified.

The experimental apparatus used in the tests was a vibro-fluidized bed constituted of a glass chamber, with a 0.114 m diameter cylindrical section, thickness of 0.003 m and height of 0.50 m. “Ballotini” spherical glass beads ($\rho_p = 2,500 \text{ kg/m}^3$), with mean diameters from 1.10×10^{-3} to 17.00×10^{-3} m, polypropylene spheroids ($\rho_p = 935 \text{ kg/m}^3$) with mean diameters of 2.60×10^{-3} and 3.67×10^{-3} m and elliptical cylinders of polystyrene ($\rho_p = 1,050 \text{ kg/m}^3$) with equivalent diameter (volumetric diameter) of 2.51×10^{-3} m, were used as inert particles. The bed was operated under dimensionless vibration numbers from 0.00 to 6.00, for amplitudes varying from 0.000 to 0.021 and frequencies of vibration from 0.00 and 18.20 Hz. Glycerol saturation degrees (defined as the ratio between volume of glycerol and volume of voids in the fixed bed) varied from 0.0000 and 0.0072. The glycerol was employed to simulate the presence of a liquid fed into

the bed in a batch mode, since it practically does not evaporate under the conditions of present work. Identical values of dimensionless vibration numbers (Γ) were obtained using different combinations of amplitudes (A) and frequencies of vibration (f), aiming to verify the universality of such a parameter to describe vibration characteristics of a vibro-fluidized bed. Four types of size distribution models were used in the investigation of the effects of the particle size distribution on the dynamics of vibro-fluidized beds: binary, flat, Gaussian and a reference one, all of them with a mean Sauter diameter of 2.18×10^{-3} m.

In the range of experimental conditions investigated, it was observed that the dimensionless vibration number does not fully characterize the fluid dynamic behavior of the vibrated systems. Some degree of particle agglomeration was always observed in the presence of glycerol, yielding to an irregular and poor fluidization. The use of vibration in such cases improved the particle circulation in the bed, thus reducing the agglomeration and minimizing the formation of channelling.

When specific particle size distributions were adopted for fluidization, some size segregation pattern was observed in almost every case. In the fluidized bed, the smallest particles stayed at the top of the column, while in the vibrated one the largest particles tended to concentrate at the top. In a vibro-fluidized bed under short amplitude of vibration (0.003 m), some segregation was noted but in a less extent than that observed in the fluidized bed at similar conditions. At high amplitude of vibration (0.009 m), no size segregation was detected.

1 INTRODUÇÃO

A secagem de pastas em leitos “móveis” contendo partículas inertes é uma operação complexa envolvendo a transferência de calor e massa, no qual o fenômeno local é pouco entendido até o momento. Um dos fatores que contribuem para complicar este processo são as interações partícula-partícula, o que conduz às forças de coesão entre as partículas inertes recobertas com a pasta (Passos e Mujumdar, 2000). Outro fator decorre da diversidade de tipos de pastas com características intrínsecas muito distintas e que mudam com o tempo enquanto o processo de secagem vai ocorrendo (Freire, 1992). Estas forças interpartículas afetam a circulação dos sólidos durante a operação de secagem, alterando a eficiência das transferências de calor e massa. Mesmo assim, várias pesquisas vêm demonstrando a viabilidade técnica na secagem de pastas tanto orgânicas quanto inorgânicas, utilizando diferentes leitos “móveis” tais como o fluidizado, o vibrofluidizado e o de jorro (Freire, 1992).

Para entender melhor o processo de secagem envolvendo pastas e suspensões em leitos com partículas inertes, é fundamental a caracterização do comportamento fluidodinâmico sob diversos aspectos. Para caracterização do comportamento fluidodinâmico de leitos “móveis” simulando a presença de um líquido, se utiliza geralmente o glicerol alimentado em batelada. O glicerol é utilizado justamente por ter baixo poder de evaporação nas condições experimentais normalmente utilizadas, devido a sua baixa pressão de vapor, e cuja viscosidade praticamente não muda no tempo, desde que mantidas as condições operacionais. Alguns trabalhos na literatura especializada apresentam a influência do glicerol sobre o comportamento fluidodinâmico em leito de jorro (Patel *et al.*,

1986; Schneider e Bridgwater, 1993; Passos e Mujumdar, 2000; Spitzner Neto, 2001 e Bacelos *et al.*, 2005), em leito fluidizado (Passos e Mujumdar, 2000; Passos e Massarani, 2001; Daleffe, 2002 e Daleffe e Freire, 2004) e em leito vibrofluidizado (Malhotra *et al.*, 1984; Daleffe, 2002 e Daleffe e Freire, 2004).

As características fluidodinâmicas dos leitos fluidizados e vibrofluidizados, contendo partículas inertes recobertas com líquido, são freqüentemente estudadas por pesquisadores interessados na compreensão e na modelagem do processo de secagem de pastas. Embora o leito fluidizado convencional promova um contato efetivo entre as fases sólida e fluida, durante a secagem pode ocorrer a segregação e a formação de bolhas, de aglomerados e de canais preferenciais, indesejáveis na maioria dos casos. O leito fluidizado convencional não costuma ser recomendado para secagem de materiais polidispersos, adesivos e coesivos, os quais são difíceis de fluidizar (Davidson *et al.*, 1985 e Kunii e Levenspiel, 1991). Inconvenientes desta natureza motivaram a busca por equipamentos alternativos e, o leito vibrofluidizado se apresenta como uma técnica promissora para a secagem e o processamento de pastas e suspensões (Eccles, 1990).

A introdução de vibração mecânica vertical em um leito fluidizado convencional pode aumentar a eficiência da transferência de calor e massa e possibilitar a redução na velocidade mínima de fluidização e na perda de carga no leito. Pode ainda reduzir o volume das bolhas e minimizar o aparecimento de zonas mortas, aglomerações e canais preferenciais, além de possibilitar a fluidização de materiais adesivos, coesivos e pastosos (Gupta e Mujumdar, 1980b; Pakowski *et al.*, 1984; Erdész, 1990; Eccles e Mujumdar, 1997; Cardoso e

Kieckbusch, 1999 e Daleffe e Freire, 2004). Neste equipamento, a vibração pode facilitar a fluidização tanto pela energia fornecida para impulsionar verticalmente as partículas a se moverem, quanto pela redução da formação de aglomerados no leito, devido à quebra das pontes líquidas e/ou sólidas.

A forma mais utilizada para caracterizar o efeito da vibração sobre o comportamento dinâmico do leito vibrofluidizado é por meio do adimensional de vibração (Γ). Este adimensional é normalmente utilizado como um parâmetro com características universais. No entanto, uma inspeção da sua definição, representada pela seguinte equação,

$$\Gamma = \frac{A \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2}{g} \quad (1)$$

mostra que um mesmo valor de Γ pode ser obtido usando diferentes combinações entre amplitude (A) e frequência de vibração (f), sendo g a aceleração gravitacional. Na literatura especializada, existe um grande número de trabalhos apresentando resultados experimentais e correlações para os leitos submetidos à vibração vertical, porém a grande maioria ignora as diferentes configurações vibracionais possíveis entre a amplitude e a frequência de vibração, na composição de um dado Γ . Isto pode explicar em parte a divergência entre resultados e a não concordância na análise do comportamento dinâmico do leito, entre diferentes pesquisadores. Mujumdar (1984), Chen *et al.* (1991), Gallas *et al.* (1992) e Barker e Mehta (1993) verificaram incompatibilidade entre alguns comportamentos observados para leitos submetidos à vibração vertical, quando foi utilizado somente o adimensional de vibração para caracterizar o efeito desta vibração. Embora estes trabalhos não tenham investigado a validade do

adimensional de vibração como um parâmetro de referência à vibração, eles servem de base para estudos mais abrangentes. Apesar da grande quantidade de estudos fluidodinâmicos em leitos vibrofluidizados, existe ainda uma grande lacuna a respeito do efeito dos parâmetros vibracionais sobre a dinâmica do leito, e se estes efeitos podem ser representados somente pelo adimensional de vibração (Γ).

A segregação granulométrica é outro tipo de fenômeno que ocorre com frequência nos leitos vibrofluidizados e vibrados (sem escoamento de ar), e que ainda requer uma profunda investigação. A segregação granulométrica e/ou mássica pode ocorrer com frequência quando os leitos “móveis” gás-sólido são utilizados para secagem ou processamento de uma mistura de material particulado com diferentes densidades e/ou tamanhos. Na maioria dos processos, a segregação é indesejável, pois pode afetar a circulação das partículas conduzindo a uma fluidização irregular (instável), podendo reduzir a eficiência da transferência de calor e massa. Deve-se ressaltar que em um processo de secagem outros fatores também podem prejudicar a circulação das partículas, como a formação de aglomerados e de canais preferenciais.

Embora para o leito fluidizado já exista na literatura uma considerável quantidade de trabalhos analisando a influência de uma distribuição granulométrica sobre o comportamento fluidodinâmico das partículas e também a ocorrência de segregação, para o leito vibrofluidizado, estes estudos ainda são incipientes. A maioria das pesquisas analisa o comportamento fluidodinâmico dos leitos vibrofluidizados gás-sólido com partículas inertes, de tamanho praticamente uniforme. Para os leitos vibrados (sem escoamento de ar), existem linhas de pesquisa bem desenvolvidas, analisando o efeito da vibração sobre a segregação

de materiais polidispersos. Mesmo assim, os trabalhos existentes são pouco esclarecedores e deixam muitas dúvidas sobre como ocorre, de fato, a segregação granulométrica neste tipo de leito. Além do que, usualmente adotam o adimensional de vibração como um parâmetro universal, fazendo pouca distinção do efeito da amplitude e da frequência na dinâmica do leito.

Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho é efetuar um estudo fluidodinâmico do leito vibrofluidizado (e fluidizado), constituído de partículas inertes e utilizando o glicerol para simular a presença de um líquido. O propósito desta pesquisa é permitir uma melhor análise do efeito da amplitude, da frequência, do adimensional de vibração, do grau de saturação de líquido, do tamanho e da densidade das partículas inertes sobre o comportamento fluidodinâmico do leito. De forma complementar, realizar um estudo experimental da influência da distribuição granulométrica sobre o comportamento dinâmico de partículas inertes no leito fluidizado, vibrado (sem escoamento de ar) e vibrofluidizado, avaliando-se também o fenômeno da segregação; para tanto, propôs-se efetuar um estudo sobre o tema por meio das seguintes etapas:

- adaptação, instrumentação e operação de um leito vibrofluidizado com geometria circular;
- testes estruturais, funcionais e calibração de todo o sistema montado;
- ensaios fluidodinâmicos sem pasta para avaliar os efeitos da densidade e do tamanho dos inertes sobre a dinâmica do leito fluidizado e vibrofluidizado;
- testes fluidodinâmicos para escolha dos parâmetros de trabalho para amplitude, frequência, adimensional de vibração, tamanho dos inertes, altura de leito estático e grau de saturação de glicerol (avaliando preliminarmente

eventual universalidade do adimensional de vibração);

- ensaios fluidodinâmicos com e sem “pasta” (glicerol) para estudar a influência da amplitude, frequência e adimensional de vibração, diâmetro das partículas inertes e grau de saturação de líquido (avaliando a universalidade do adimensional de vibração);
- testes fluidodinâmicos para escolha dos parâmetros de trabalho, avaliando a influência de diferentes distribuições de partículas em leito fluidizado, vibrado e vibrofluidizado, e
- ensaios fluidodinâmicos para avaliar a influência da distribuição de partículas sobre o comportamento dinâmico do leito fluidizado, vibrado e vibrofluidizado, avaliando-se também o fenômeno da segregação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão aborda principalmente os aspectos fluidodinâmicos fundamentais relacionados ao leito vibrofluidizado e fluidizado, a forma como a energia vibracional é quantificada no leito vibrofluidizado e vibrado (sem escoamento de ar), a segregação granulométrica em leito fluidizado, vibrofluidizado e vibrado e a secagem de líquidos em leito fluidizado e vibrofluidizado utilizando partículas inertes como suporte.

2.1 Generalidades

2.1.1 Leito Vibrofluidizado

Um leito vibrofluidizado consiste de um de leito fluidizado convencional, ao qual se aplica uma vibração mecânica vertical, horizontal ou inclinada para melhorar suas propriedades de transporte. Um dos primeiros artigos publicados sobre a aplicação comercial de um leito vibrofluidizado é datado de 1938, quando Allis Chalmers operou uma unidade para secagem de minério de molibdênio (Gupta e Mujumdar, 1980b). As pesquisas sobre a mecânica dos leitos submetidos à vibração iniciaram-se em 1940 por Bachmann, que propôs o primeiro modelo descrevendo o comportamento dinâmico de partículas sólidas no interior de uma câmara cilíndrica vibrada, sem escoamento de ar (Gutman, 1976). Esta linha de pesquisa foi seguida pela modelagem clássica de Kröll apresentada em 1954 e 1955 (Thomas *et al.*, 1988), que propôs um modelo simplificado para descrever a circulação das partículas nos leitos vibrados sem escoamento de ar (Gutman, 1976). Porém, o interesse em aplicações práticas para os leitos

vibrofluidizados surgiu a partir dos trabalhos de Chlenov e Mikhailov (Chlenov e Mikhailov, 1964 e 1972), que utilizaram a vibração vertical como uma forma auxiliar na fluidização (suspensão) de um leito de sólidos granulares. Desde então, expandiram-se as pesquisas sobre os fenômenos envolvidos neste tipo de equipamento e os trabalhos de Gutman (1976), Gupta e Mujumdar (1980a e 1980b), Strumillo e Pakowski (1980), Pakowski *et al.* (1984), Erdész e Mujumdar (1986), Thomas *et al.* (1988), Erdész (1990), Garim (1994 e 1998), Daleffe (2002), Moris (2002), Brod (2003) e Daleffe e Freire (2004) apresentam um pouco desta evolução.

O projeto e a operação de um secador de leito fluidizado ou vibrofluidizado, deve ser feito com o conhecimento de alguns parâmetros característicos com razoável precisão, dentre estes, pode-se destacar: queda de pressão máxima (ΔP_m), queda de pressão em torno da velocidade mínima de fluidização (ΔP_{mf}), velocidade mínima de fluidização (U_{mf}), porosidade do leito (ε), porosidade do leito na mínima fluidização (ε_{mf}) e taxa de circulação das partículas.

A vibração do sistema pode advir de diversos tipos de dispositivos geradores de vibração. Finzer e Kieckbusch (1992) classificam alguns destes dispositivos da seguinte forma:

- **vibrador mecânico de inércia** - a força de excitação é promovida pela rotação de massas desequilibradas;
- **vibrador excêntrico** - produz forças de excitação intensas e de baixa frequência; a vibração é devida ao uso de excêntricos em seus eixos;
- **vibrador pneumático ou hidráulico** - promove alta frequência de vibração; a

vibração é ocasionada pelo movimento de um pistão acionado por um fluido;

- **vibrador eletromagnético** - um dos melhores dispositivos para promover a vibração, pois além de produzir altas frequências possui uma precisa regulagem da mesma; em contrapartida não possibilita variação da amplitude de vibração, e
- **vibrador sonoro** - produz ondas sonoras quando o ar escoar em um gerador de áudio.

2.1.2 Adimensional de Vibração (Γ)

Para o estudo do comportamento dinâmico dos leitos submetidos à vibração vertical, deve-se quantificar a energia vibracional ao qual o sistema está submetido. A amplitude (A) e a frequência (f) de vibração são usualmente os parâmetros controladores da energia vibracional transferida para estes leitos. Com base na combinação destes parâmetros, alguns pesquisadores propuseram formas para quantificar a intensidade de vibração (Erdész, 1990):

- adimensional de vibração (Chlenov e Mikhailov, 1965 e 1972)

$$\Gamma = \frac{A(2\pi f)^2}{g} = \frac{A\omega^2}{g} \quad (1)$$

- velocidade média de vibração (Zabrodshiy *et al.*, 1968)

$$U_{mv} = Af \equiv A\omega \quad (2)$$

- intensidade específica de vibração (Shah e Goyel, 1980)

$$I_e = Af^2 \equiv A\omega^2 \quad (3)$$

- potência específica de vibração (Dorney *et al.*, 1981)

$$Ip = A^2 f^3 \equiv A^2 \omega^3, \quad (4)$$

sendo A, f e ω a amplitude [m], a frequência [Hz] e a frequência angular ($2\pi f$) [rad s^{-1}] de vibração, respectivamente, e g a aceleração gravitacional.

O adimensional de vibração (Γ) como foi definido na Equação 1 é a forma mais utilizada na literatura para quantificar a energia vibracional inserida no leito. Este adimensional é muitas vezes chamado de parâmetro vibracional e segundo Erdész (1990), pode ser interpretado fisicamente como sendo a relação entre a aceleração média vibracional exercida sobre o sistema e a aceleração gravitacional.

O adimensional de vibração (Γ) é habitualmente adotado na literatura como um parâmetro universal para caracterizar o efeito da vibração sobre o comportamento dinâmico do leito vibrofluidizado e vibrado. Porém, uma inspeção da sua definição (vide Equação 1) mostra que um mesmo valor de Γ pode ser obtido usando diferentes combinações entre amplitude (A) e frequência (f) de vibração. Muitos destes trabalhos sobre os leitos vibrofluidizados (e vibrados) apresentam um número expressivo de resultados e correlações, contudo a grande maioria ignora as diferentes configurações vibracionais possíveis entre a amplitude e da frequência de vibração, na composição de um dado valor de Γ . Isto pode explicar em parte a divergência entre resultados e a não concordância na análise do comportamento dinâmico do leito entre diferentes pesquisadores. Mujumdar (1984), Chen *et al.* (1991), Gallas *et al.* (1992) e Barker e Mehta (1993) verificaram incompatibilidade entre alguns comportamentos observados

para leitos submetidos à vibração quando foi utilizado somente o adimensional de vibração para caracterizar o efeito desta vibração.

Mujumdar (1984) estudou os efeitos da vibração mecânica vertical sobre o comportamento fluidodinâmico de leitos vibrofluidizados com partículas inertes quase esféricas de polietileno e peneiras moleculares. Ele estudou a influência da frequência de vibração (entre 0 e 160 Hz), da amplitude de vibração (entre 0,00 e $4,25 \times 10^{-3}$ m) e da altura de leito estático (entre 25×10^{-3} e 125×10^{-3} m) sobre a queda de pressão no leito (Δp). Este autor observou que, quando valores semelhantes de adimensional de vibração (em alguns casos iguais) são obtidos usando duas diferentes amplitudes (e frequências) de vibração, o efeito da amplitude de vibração é mais pronunciado na redução da queda de pressão no leito. Ele acrescenta ainda que, o efeito da amplitude de vibração parece intensificar o efeito do adimensional de vibração e deduz que a altas amplitudes de vibração, a redução da queda de pressão pode ocorrer mesmo a baixos valores de Γ . A forma como estes dados foram apresentados e a ausência de algumas informações, dificultam a apresentação de uma análise além da que foi discutida.

Chen *et al.* (1991) estudaram algumas características da aglomeração de partículas cristalinas de perclorato de amônia úmidas em leito vibrofluidizado. Eles trabalharam com dois leitos, um à alta amplitude de vibração ($3,80 \times 10^{-2}$ m) e o outro à baixa amplitude de vibração ($0,26 \times 10^{-2}$ m). Baseado em algumas observações experimentais, eles advertem que o adimensional de vibração pode não ser um parâmetro satisfatório para caracterização do efeito da intensidade de vibração sobre o grau de aglomeração das partículas. Apesar de estarem utilizando dois leitos vibrofluidizados com diferentes características físicas para observar o

efeito do adimensional de vibração sobre a aglomeração, verificaram que a amplitude e a frequência de vibração são igualmente importantes na prevenção da aglomeração das partículas, e não exclusivamente o adimensional de vibração.

Gallas *et al.* (1992) estudaram a dinâmica de esferas de aço em leito vibrado (sem escoamento de ar) por meio do método da simulação da dinâmica molecular. Eles observaram qualitativamente diferenças entre o comportamento dinâmico do leito para um mesmo Γ obtido com duas combinações entre amplitude e frequência de vibração. Com apenas este par experimental, os autores afirmam que o adimensional de vibração não é um bom parâmetro para caracterizar o início da movimentação das partículas e nem as propriedades dinâmicas do leito.

Barker e Mehta (1993) apresentam uma revisão da literatura, na qual discutem aspectos referentes a possíveis mecanismos que causam a segregação de partículas de diferentes tamanhos em leitos vibrados. Apesar da grande quantidade de estudos sobre o assunto, os mecanismos que causam este tipo de segregação ainda não são bem compreendidos, gerando muita controvérsia. No entanto, os autores sugerem ainda que a interação entre a amplitude e a frequência de vibração deva ser investigada, para que se encontre o melhor parâmetro de controle para os leitos vibrados, que ajude a esclarecer o efeito da intensidade de vibração sobre os mecanismos da segregação.

Nenhum destes trabalhos citados teve como objetivo principal investigar a validade do adimensional de vibração (Γ) como um parâmetro de referência para a intensidade de vibração, mas servem de base para estudos mais abrangentes neste sentido. Apesar da grande quantidade de estudos

fluidodinâmicos em leitos vibrofluidizados (e vibrados), ainda existe uma grande lacuna a respeito do efeito dos parâmetros vibracionais sobre a dinâmica do leito e se estes efeitos podem ser representados somente pelo adimensional de vibração (Γ). Mesmo com os indícios citados de inconsistência na utilização adimensional de vibração, ele continua sendo utilizado muitas vezes isoladamente e sem muito critério para caracterizar o efeito da vibração sobre a estrutura do leito. Alguns elementos podem estar contribuindo para isto, e um deles é o fato de que grande parte dos trabalhos fundamentais para este leito se encontram em línguas vernáculas como o russo, o polonês, o romeno e o japonês, dificultando o acesso à comunidade científica. Gupta (1979) lista outros fatores que tornam difícil uma revisão crítica e comparativa da literatura para uma grande classe destes trabalhos em leitos vibrofluidizados, tais como: informações incompletas do procedimento experimental adotado e de certos termos utilizados, falta de especificações sobre o modo como a vibração foi aplicada e falta de informações sobre a base de comparação entre o leito vibrofluidizado e outros leitos de referência como o leito fixo e o fluidizado.

2.1.3 Regimes de Operação

Os leitos de material particulado submetidos à influência de vibração na direção vertical apresentam uma variedade de regimes de comportamento. Baseados em observação visual, Bratu e Jinescu (1971) definiram três regimes de operação para sistemas vibrados dependentes somente da grandeza da componente vertical de aceleração vibracional, que são:

- **leito vibrado** - quando $\Gamma < 1$, o leito comporta-se apenas como um leito

fluidizado simples e a vibração somente ajuda a melhorar a estabilidade e a homogeneidade do leito;

- **leito vibrofluidizado** - quando $\Gamma \approx 1$, ambos o escoamento de ar e a vibração contribuem para a fluidização e o comportamento do leito é influenciado pela grandeza relativa de ambos e,
- **leito fluidizado vibrado** - quando $\Gamma > 1$, o leito é essencialmente influenciado pelas forças vibracionais, as quais tendem a suspender o leito com a vibração; este comportamento aproxima-se de um modelo de cilindro empistonado e, nestas circunstâncias o ar é usado somente como um meio para transferência de calor e massa.

A nomenclatura proposta por Strumillo e Pakowski (1980) é mais simplificada, e está baseada na velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) para o leito submetido a qualquer intensidade de vibração. Assim eles classificam este tipo de leito como:

- **leito vibrofluidizado** - leito vibrado com aeração externa forçada para velocidades do ar (U) menores que a velocidade mínima de fluidização (U_{mf}), e
- **leito fluidizado vibrado** - leito submetido à vibração com aeração externa forçada para $U > U_{mf}$.

Estes dois casos incluem todas as possibilidades de leitos vibrados com escoamento de ar externo forçado.

Pakowski *et al.* (1984) apresentam outra classificação para os leitos vibrados, com base na faixa de condições operacionais, sendo:

- **leito vibrado** - para $\Gamma > 1$ e sem escoamento de ar;
- **leito vibrofluidizado** - para $\Gamma > 1$ e $U < U_{mf}$, e
- **leito fluido vibrado** - para qualquer Γ e $U > U_{mf}$.

Neste trabalho, optaremos por uma forma bastante simplificada de classificação dos leitos submetidos à vibração vertical (inclusive nesta revisão da literatura), visando principalmente facilitar a compreensão desta revisão e da análise dos resultados e universalizar a linguagem deste trabalho com os mais recentes que usualmente empregam este tipo de terminologia. Assim:

- **leito vibrado**: qualquer leito composto de material particulado que sofre a ação de uma aceleração vibracional exclusivamente vertical, para qualquer Γ e sem escoamento de ar forçado, e
- **leito vibrofluidizado (ou vibro-fluidizado)**: qualquer leito composto de material particulado que sofre a ação de uma aceleração vibracional exclusivamente vertical, para qualquer Γ e com escoamento de ar forçado.

Nesta classificação, estão compreendidos leitos com qualquer geometria (câmara circular, retangular e cônica, por exemplo) e qualquer exceção estará declarada no texto. Em alguns casos, a terminologia “leito vibrado” pode estar se referindo ao leito vibrofluidizado, no sentido que este último é um leito submetido à vibração e não deixa de ser um leito vibrado. Para distinguir um do outro, quando não houver escoamento de ar externo forçado o leito poderá ser chamado de leito vibrado (sem escoamento de ar).

2.1.4 Classificação das Partículas

Para facilitar a “comparação” e a melhor compreensão dos efeitos de algumas características físicas das partículas inertes sobre a fluidodinâmica dos leitos móveis, há a necessidade de classificá-las seguindo um padrão. O método mais frequentemente encontrado na literatura para classificação de partículas foi proposto por Geldart (1973) e ainda é considerado o mais claro e fácil de ser utilizado. Com o diagrama apresentado na Figura 2.1 o sólido pode ser classificado como pertencente a um grupo apenas conhecendo a sua densidade (ρ_s) e seu diâmetro médio (d_p). A principal característica deste método de classificação, é que as partículas são divididas em quatro grupos em função do seu tamanho (d_p) e da diferença de densidade entre o sólido e gás fluidizante ($\rho_s - \rho_g$). Estes parâmetros são colocados em um diagrama com escalas logarítmicas, delimitadas pelos grupos A, B, C e D. Estas quatro regiões foram obtidas utilizando como critério a transição do leito fixo para o fluidizado, por meio de resultados obtidos por inúmeros pesquisadores. A caracterização das partículas em cada grupo, na ordem crescente de tamanho das partículas, é a seguinte: Grupos C, A, B e D.

O **grupo C** é formado por partículas muito finas (pós), geralmente muito coesivas. Normalmente a fluidização é extremamente difícil para estes sólidos devido às forças interpartículas, superiores à força resultante da ação do escoamento de gás. Conseqüentemente, os fenômenos de transferência entre as partículas e o leito são muito pobres. A fluidização destes pós pode ser feita com o uso de agitação mecânica no leito, que elimina os canais preferenciais. Exemplos de sólidos desta natureza são os pós-faciais, a farinha e o amido.

Ao **grupo A** pertencem partículas com pequeno diâmetro médio e/ou

baixa densidade (abaixo de 1400 kg/m^3). Estes sólidos fluidizam facilmente e também formam leitos expandidos, isto é, o leito aumenta consideravelmente o seu volume antes de atingir o estado fluidizado. A mistura das partículas ocorre simultaneamente e é seguida de recirculação do gás e a altas velocidades do gás o *slugging* (regime pistonado com bolhas planas) é característico. Partículas deste tipo são geralmente utilizadas em processos de craqueamento catalítico (FCC).

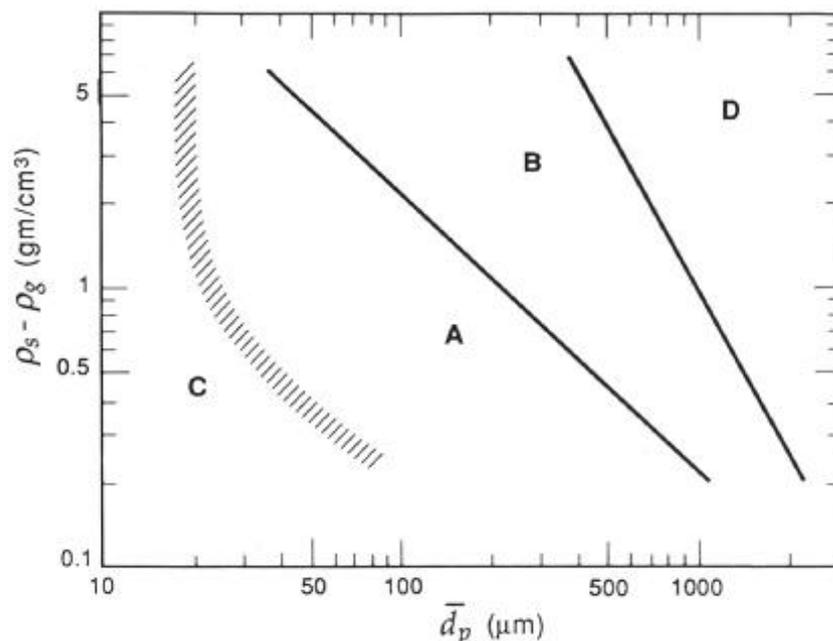


Figura 2.1: Diagrama de Geldart para classificação de partículas para o ar em condições ambientes; (adaptado de Geldart, 1973).

As partículas do **grupo B** são de tamanho grande, e o sólido com esta classificação, mais frequentemente utilizado é a areia com tamanho entre $0,4 \times 10^{-4} \text{ m}$ e $5 \times 10^{-4} \text{ m}$ e densidade entre 1400 kg/m^3 e 4000 kg/m^3 . Partículas deste grupo apresentam pouca expansão do leito e baixa retenção de gás. Em contraste com o grupo A, naturalmente ocorrem bolhas para este tipo de partícula, logo acima da velocidade mínima de fluidização. A velocidade de ascensão das bolhas é mais rápida

que a velocidade intersticial do gás e o *slugging* ocorre para altas velocidades de ar.

O **grupo D** é composto por partículas relativamente grandes e/ou muito densas. A fluidização destes sólidos é dificultada por causa da forma frequentemente irregular e do tamanho das partículas. As bolhas sobem mais lentamente que o gás que percola o leito, a fase densa tem alta porosidade e estes sólidos jorram facilmente, considerando que as do grupo B não. São indicadas para operação em leitos de jorro, devido à necessidade de altas velocidades de ar e podem ser utilizadas em algumas operações com líquidos pegajosos. A formação de canais preferenciais é característico para estes sólidos, e podem ser evitados pela inserção de agitação mecânica sobre a estrutura do leito. Partículas do grupo D são geralmente formadas por comprimidos, grãos, dentre outros.

2.2 Propriedades Fluidodinâmicas

O primeiro passo na investigação dos efeitos da vibração sobre a estrutura de leito fluidizado é estudar a sua curva característica. Uma curva característica corresponde à obtenção do comportamento da queda de pressão no leito em função da velocidade ou da vazão de ar que o percola (Garim, 1998).

Strumillo e Pakowski (1980) apresentam algumas curvas características para leitos vibrofluidizados (Figura 2.2). A forma destas curvas é dependente da relação das forças vibracionais e da dinâmica imposta pela percolação do fluido através do leito. A curva **a** é típica dos leitos fluidizados convencionais. Ao submeter um leito fluidizado à vibração vertical a curva **a** é amortecida resultando em uma curva do tipo **b**, sem nenhum ponto máximo de pressão. A curva **a** apenas se diferencia da curva **b** pela suavização na região de

transição entre o leito fixo e o leito fluidizado. Ainda, para acelerações vibracionais moderadas a curva **a** também é observada. Bratu e Jinescu (1971) relatam que sob certas condições vibracionais a curva **c** é obtida, mostrando dois patamares: no primeiro ponto de inflexão inicia-se o movimento das partículas, uma função da amplitude e da frequência de vibração. No segundo patamar, desenvolve-se a fluidização, isto é, o ar é suficiente para sustentar as partículas, reduzindo o efeito da vibração no sistema. As curvas do tipo **d** são tipicamente obtidas quando a vibração domina a dinâmica do leito. A região de transição entre o leito fixo e o fluidizado estende-se em uma ampla faixa de velocidade do fluido e a curva pode ser subdividida em três distintos segmentos de reta.

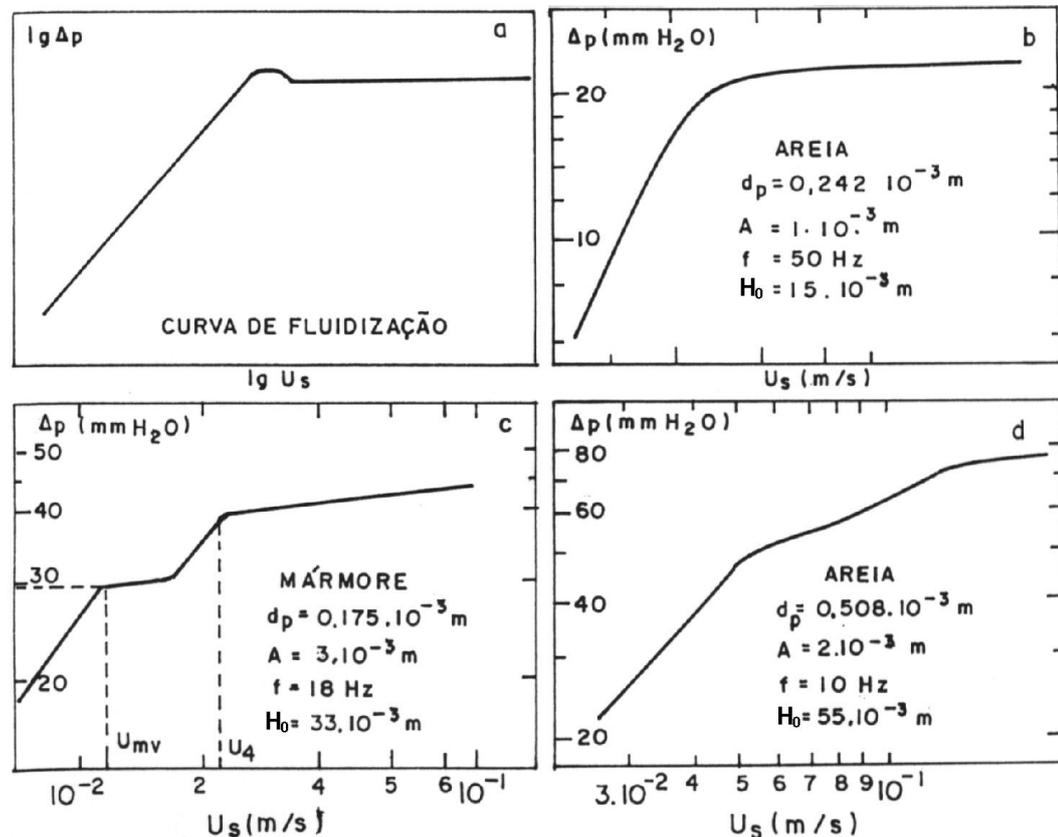


Figura 2.2: Tipos de curvas características: (a) leito fluidizado; (b, c, d) leito vibrofluidizado; escalas logarítmicas (adaptado de Strumillo e Pakowski, 1980).

Alguns autores, baseados nas observações de Strumillo e Pakowski (1980) fazem ainda as seguintes afirmações: Cardoso e Kieckbusch (1999) observaram que, no leito vibrofluidizado quando o ar escoar a velocidades muito baixas, e este por si só não tem condições de movimentar as partículas do leito, estas podem ser “fluidizadas” devido ao efeito da vibração; Bratu e Jinescu (1971) com obviedade afirmam que a vibração aumenta o número de parâmetros dos quais dependem a velocidade mínima de fluidização e a queda de pressão, aumentando as dificuldades experimentais na determinação destes parâmetros.

Para leitos vibrofluidizados, é importante analisar também as condições sob as quais a fluidização incipiente ocorre na presença simultânea de vibração e escoamento de ar (Bratu e Jinescu, 1971). A velocidade na qual ocorre a fluidização incipiente é geralmente chamada de velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) ou velocidade mínima de vibrofluidização (U_{mvf}), e a queda de pressão correspondente é geralmente chamada de queda de pressão na velocidade de mínima fluidização (Δp_{mf}). Observa-se em alguns trabalhos um conflito entre a nomenclatura e a definição da velocidade mínima de fluidização para os leitos vibrofluidizados. Para estes leitos muitas vezes a velocidade mínima de fluidização é chamada de velocidade mínima de vibrofluidização ou vice versa. Neste trabalho, tanto para o leito fluidizado quanto para o vibrofluidizado, a nomenclatura adotada será velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) simplificando novamente este tipo de terminologia, quando for possível (inclusive nesta revisão da literatura). O termo velocidade mínima de vibrofluidização (U_{mvf}) será adotado somente nos casos em que houver a possibilidade de confusão com a velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) ou quando houver comparação entre U_{mf} e U_{mvf} .

2.2.1 *Velocidade Mínima de Fluidização e Velocidade Mínima de Mistura*

Em um leito fluidizado convencional, a transição de leito fixo para fluidizado é facilmente perceptível em quase todos os casos, ocorrendo em uma pequena faixa de velocidade ou vazão de ar. Uma boa estimativa para determinação da U_{mf} é obtida por meio da intersecção de duas retas na curva de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar; uma tangente à curva de leito fixo e a outra tangente à curva de leito fluidizado (Figura 2.3). No entanto, para o leito vibrofluidizado, dependendo da faixa dos parâmetros vibracionais esta transição poderá ocorrer em uma considerável faixa de velocidade ou vazão de gás e, conseqüentemente, o uso da definição convencional torna-se questionável. Apesar disso, alguns autores, muitas vezes, ignoram este fato e utilizam a definição clássica para leitos fluidizados convencionais sem muito critério na determinação da U_{mf} .

Gupta e Mujumdar (1980a) observaram em seus experimentos que a velocidade mínima de fluidização obtida da forma como é definida para leitos fluidizados convencionais, aumentava em algumas situações com o aumento do adimensional de vibração (Γ), para uma amplitude de vibração constante. Os resultados por eles obtidos estão representados na Figura 2.4, onde a velocidade mínima de vibrofluidização (U_{mvf}) foi adimensionalizada na velocidade mínima de fluidização para o leito sem vibração (U_{mf}).

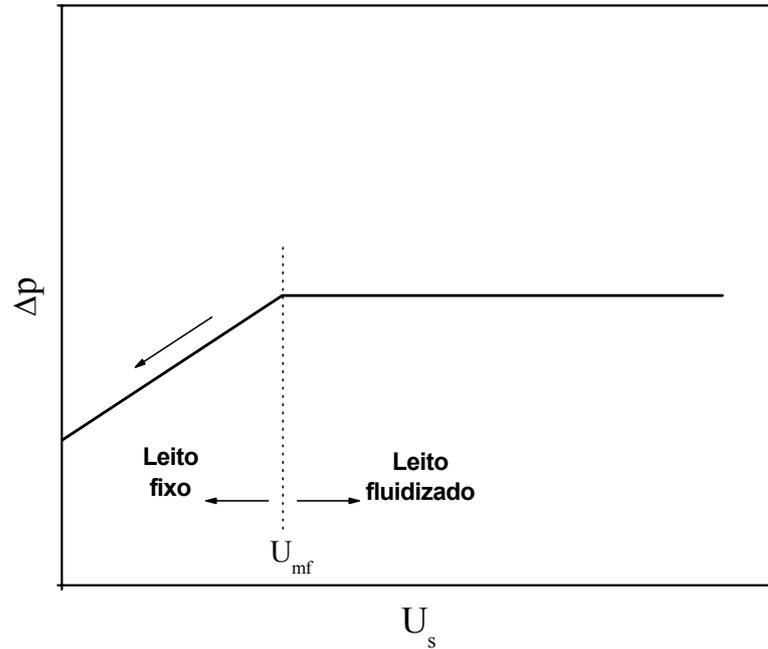


Figura 2.3: Representação de uma curva de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar para um leito fluidizado convencional.

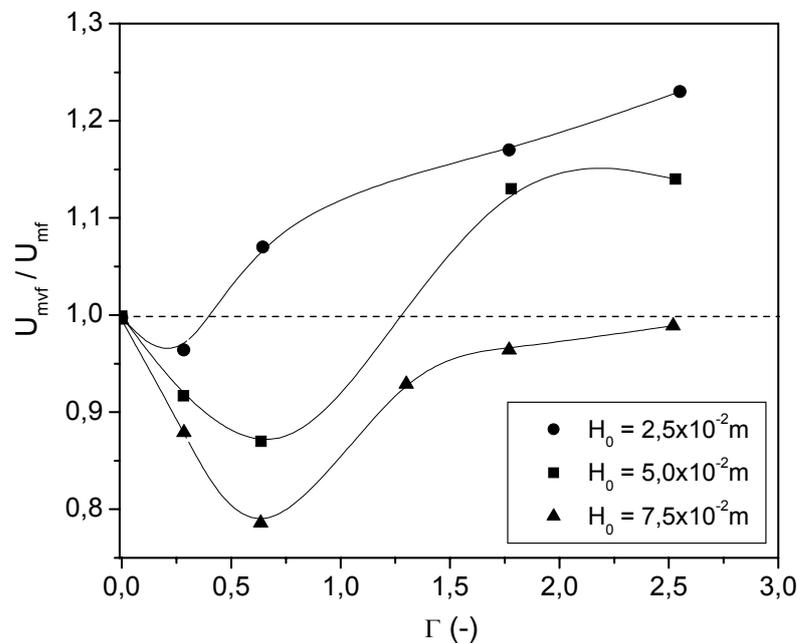


Figura 2.4: U_{mvf} / U_{mf} em função do adimensional de vibração, parametrizado na altura de leito estático e com U_{mf} obtido pela Equação 7 (vide página 24); inertes de polietileno; $d_p = 3,11 \times 10^{-3} m$; $A = 4,25 \times 10^{-3} m$; (adaptado de Gupta e Mujumdar, 1980a).

De acordo com os autores, os resultados apresentados na Figura 2.4

seriam fisicamente incoerentes, pois a U_{mf} deveria diminuir com o aumento do adimensional de vibração. Baseados nisto, sugerem que esta metodologia não é adequada, fazendo com que o conceito de velocidade mínima de fluidização para leitos vibrofluidizados necessitasse de uma nova definição. Desta forma, introduziram o conceito de velocidade mínima de mistura (U_{mm}), definida como a velocidade a partir da qual as partículas iniciam movimento umas com relação às outras no interior do leito, determinada visualmente. Experimentalmente eles chegaram à conclusão de que a velocidade mínima de mistura decresceu com o aumento da aceleração vibracional nas condições experimentais utilizadas, como pode ser visto na Figura 2.5. Observaram ainda que, para $\Gamma \geq 1$ não foi necessária nenhuma vazão de ar para manter os sólidos em movimento, portanto a vibração manteve o movimento das partículas e este estado foi definido como “pseudo-fluidização”.

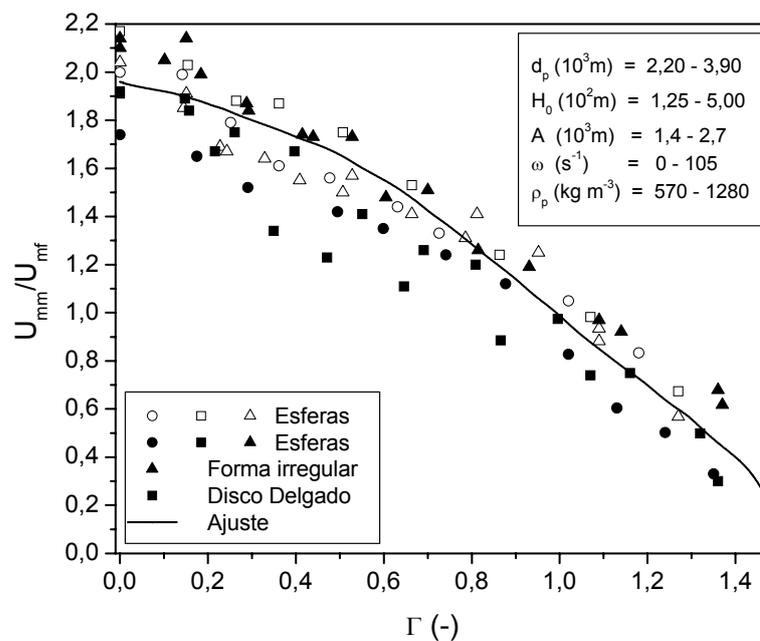


Figura 2.5: U_{mm}/U_{mf} em função do adimensional de vibração, parametrizado no tipo de partícula e com U_{mf} obtido pela Equação 7; (adaptado de Gupta e Mujumdar, 1980a).

Os resultados para U_{mm} (Figura 2.5) foram correlacionados pela seguinte equação empírica:

$$\frac{U_{mm}}{U_{mf}} = 1,952 - 0,275\Gamma - 0,686\Gamma^2 \quad (5)$$

Nesta equação, a velocidade mínima de fluidização para o leito sem vibração (U_{mf}) foi estimada pelo uso da correlação de Wen e Yu (1966), como segue:

$$U_{mf} = \frac{(\text{Re}_p)_{mf} \mu}{\rho_p d_p} \quad (6)$$

Essa equação clássica é bastante usada na literatura e aplica-se a partículas finas ou para $(\text{Re}_p)_{mf} < 20$, onde:

$$(\text{Re}_p)_{mf} = \sqrt{(33,7)^2 + 0,0408Ar} - 33,7, \text{ e} \quad (7)$$

$$Ar = \frac{\rho_g (\rho_p - \rho_g) g d_p^3}{\mu^2} \quad (8)$$

Assim, a Equação 5 pode ser utilizada para prever a velocidade mínima operacional de ar para um leito vibrofluidizado, nas condições descritas por Gupta e Mujumdar (1980a).

Khalid e Mujumdar (1982) constataram em seus experimentos, o aumento na velocidade mínima de fluidização para um leito vibrofluidizado e redução na velocidade mínima de mistura, ambos com o aumento da frequência de vibração (mantendo a amplitude constante). Eles utilizaram como partículas inertes peneiras moleculares, sílica gel e esferas de vidro. Porém, advertem que a técnica de medida da U_{mm} de forma visual como foi sugerida por Gupta e Mujumdar (1980a) é muito subjetiva e dependente do observador.

Partindo do princípio de que U_{mf} poderia não ser um parâmetro apropriado para o leito vibrofluidizado, Mujumdar (1984) realizou alguns experimentos para testar a validade da utilização da U_{mm} em leitos fundos ($H_0 = 12,5 \times 10^{-2}$ m), ao contrário de Gupta e Mujumdar (1980a) que estudaram leitos mais rasos. Para partículas de polietileno e peneiras moleculares, Mujumdar (1984) verificou que a U_{mm} diminuiu com o aumento da intensidade de vibração mais expressivamente até $\Gamma = 0,4$, e após este valor a redução foi mais suave. Quando Γ atingiu 1,4, a redução na U_{mm} foi cerca de 20% da U_{mf} determinada pela correlação de Wen e Yu (1966) (Equação 7). Mujumdar (1984) também alerta que a U_{mm} só pôde ser determinada visualmente e de maneira subjetiva, como consequência os resultados desta natureza deveriam ser considerados com cautela.

Garim e Freire (1994) verificaram o aumento da velocidade mínima de fluidização com o aumento da intensidade de vibração, em um leito com partículas de vidro tipo “ballotini” e para Γ entre 0,0 e 1,0. Mesmo assim, afirmaram que não puderam determinar a U_{mm} devido à dificuldade na visualização do momento em que as partículas começavam a se movimentar umas com relação às outras. No entanto, sugeriram que a medida da U_{mm} seria provavelmente o método mais apropriado para este tipo de leito.

Daleffe (2002) também percebeu em alguns casos, o aumento da velocidade mínima de fluidização com o aumento da intensidade de vibração, em um leito vibrofluidizado retangular. As condições experimentais por ele estudadas estão descritas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Parâmetros experimentais utilizados por Daleffe (2002).

Parâmetro	Unidade	Valor
d_p	$[x10^{-3} \text{ m}]$	1,10; 1,55 e 1,85
T	$[^{\circ}\text{C}]$	40; 50 e 60
ϕ	$[-]$	0; 0,0009; 0,0018; 0,0036; 0,0054 e 0,0072
Γ	$[-]$	0,00; 0,50; 1,00 e 1,50
f	$[\text{Hz}]$	0,0 6,4; 9,1 e 11,1
A e H_0	$[x10^{-3} \text{ m}]$	3,0 e 80,0

Legenda: A - amplitude de vibração; d_p - diâmetro das partículas; f - frequência de vibração; H_0 - altura de leito estático; T - temperatura do ar na entrada do leito; Γ - adimensional de vibração e ϕ - grau de saturação de glicerol (volume de glicerol por volume de poros no leito estático).

Daleffe (2002) determinou a U_{mm} de forma semelhante a que foi definida inicialmente por Gupta e Mujumdar (1980a) e observou que a U_{mm} foi pouco influenciada pela variação do adimensional de vibração, nas condições descritas na Tabela 2.1. Esta variação ficou muito próxima do erro experimental, mas mesmo assim mostrou uma tendência à redução com o aumento da intensidade de vibração. Deve-se ressaltar que a variação do adimensional de vibração se deu pela variação da frequência vibracional, para uma amplitude de vibração constante. Notadamente, a influência da frequência foi muito pequena nestas condições experimentais, e devido a limitações físicas, o autor não pôde estudar a influência dos parâmetros vibracionais em níveis maiores aos que foram estudados neste equipamento. Ele também fez um estudo semelhante na presença de líquido (glicerol) e obteve o mesmo comportamento descrito para o leito seco. De qualquer forma, sugeriu que a determinação da velocidade mínima de fluidização para os leitos vibrofluidizados seria mais facilmente determinada utilizando as curvas

características e o desvio padrão da queda de pressão, associadas à técnica de observação visual, buscando um equilíbrio entre estas três.

No Quadro 2.2 estão sumarizadas algumas correlações obtidas por diversos autores para determinar a velocidade mínima de vibrofluidização (U_{mvf}), baseadas em diferentes conjuntos de dados. Erdész (1990) afirma que apesar de algumas destas correlações serem encontradas com frequência na literatura, não apresentam as condições experimentais completas utilizadas para sua obtenção ou validação.

Correlações para velocidade mínima de fluidização em leito fluidizado podem ser encontradas em Couderc (1985). Este autor reúne várias correlações de diversos autores dispostas em tabelas com os detalhes das condições utilizadas em cada caso. Lippens e Mulder (1993) apresentam mais de 30 correlações de diversos autores para o número de Arquimedes e o quociente entre número de Arquimedes e Reynolds na mínima fluidização. Este quociente é equivalente à medida direta da velocidade mínima de fluidização para leitos fluidizados.

Quadro 2.2: Correlações para velocidade mínima de vibrofluidização - U_{mvf} .

Correlação	Γ	Tipo*	ρ_p [kg/m ³]	d_p [x10 ⁻³ m]	H_0 [x10 ⁻² m]	d_L [x10 ⁻² m]	Autores	
$U_{mvf} = U_{mf} \left[1 - \frac{1+EL}{2\pi j} \Gamma \right]$	0-15 ^a	A, B	2660 983 1050	0,175 - 0,450 0,175 - 0,450 0,250 - 0,500	3,3 e 7,0	5,0	Bratu e Jinescu (1972)	(9)
$U_{mvf} = 6,9 \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{0,63} \left(\frac{1}{v_g} \right)^{0,33} d_p^{0,88} (1-c\Gamma),$ sendo $\ln c = 0,7 \times 10^{-3} f^{1,28} \sqrt{H_0/d_p}$	0-30 ^b	B	1380 865	0,28 - 0,63	2,0 - 20,0	5,0 - 25,0	Mushtayev <i>et al.</i> (1973)	(10)
$U_{mvf} = U_{mf} [1 - 0,09\Gamma]$	0-30 ^b	B	1380 865	0,28 - 0,63	2,0 - 20,0	5,0 - 25,0	Mushtayev <i>et al.</i> (1974)	(11)
$U_{mvf} = U_{mf} \sqrt{1 - \Gamma / \Gamma_{LVF}}$ $\Gamma_{LVF} = \Gamma \left(\frac{1}{1 - \Delta P \cdot a_L / m_p \cdot g} \right)$	0-3 ^c	B, D	1450	2,5	12,6	10,8	Ringer e Mujumdar (1984)	(12)
$U_{mvf} = 0,8 U_{mf} \left(\frac{\Delta p_{mf}}{\Delta p_{mvf}} \right)^{2/3}$	0-13,4 ^d	B, D	2630 1050 2165 1588	0,15 - 0,50 2,75 0,50 0,50	6,0 - 14,0	10,8	Erdész <i>et al.</i> (1986)	(13)
$U_{mvf} = j_1 \left(\frac{A\omega^2}{g} \right)^{-j_2}$, sendo j_1 e j_2 constantes experimentais.	1-20 ^e	C, A	1987	polidisperso	4,8 - 20,0	16,0	Jinescu <i>et al.</i> (2000)	(14)

*Classificação de Geldart; ^aA entre 0,0 e 3,0x10⁻³ m e f entre 0 e 35 Hz; ^bA entre 0,5 x10⁻³ e 3,0x10⁻³ m e f entre 0 e 60 Hz; ^cA entre 0,00 e 4,25x10⁻³ m e f entre 0 e 14 Hz; ^dA = 1,85 x10⁻³ e f entre 0 e 42 Hz; ^eA = 2,1x10⁻³ m e f entre 11 e 50 Hz.

O modelo apresentado por Bratu e Jinescu (1972) na Equação 9 é baseado na colisão entre a partícula sólida e a superfície de vibração, onde EL é o coeficiente de colisão elástica e j é a razão entre o tempo ascendente e descendente da partícula. Bratu e Jinescu (1972) conduziram experimentos para validar seu modelo e obtiveram 0,09 para o coeficiente $\frac{1+EL}{2\pi j}$, afirmando que para $\Gamma < 1$ a vibração não afetaria a velocidade mínima de fluidização. Isto contrasta com as observações de Mushtayev *et al.* (1973) que mostraram que a vibração tem efeito relevante sobre a velocidade mínima de fluidização, mesmo para $\Gamma < 1$. Com base na Equação 10, Mushtayev *et al.* (1974) obtiveram experimentalmente o valor de 0,09 para o coeficiente $\ln c = 0,7 \times 10^{-3} f^{1,28} \sqrt{H_0 / d_p}$ e verificaram que o primeiro termo da Equação 10 foi aproximadamente o valor de U_{mf} , simplificando a correlação para forma apresentada na Equação 11.

Jinescu *et al.* (2000) estudaram o comportamento fluidodinâmico em leito vibrofluidizado para o persulfato de potássio em pó polidisperso, e obtiveram a Equação 14 para velocidade mínima de vibrofluidização. Eles observaram redução na velocidade mínima de vibrofluidização em até 30%, em relação aos leitos fluidizados convencionais.

Daleffe (2002) também estudou a influência do grau de saturação de glicerol, do tamanho das partículas inertes, dos parâmetros vibracionais e da temperatura sobre a velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) em leito vibrofluidizado (e fluidizado), utilizando as mesmas condições operacionais apresentadas na Tabela 2.1.

A Figura 2.6 apresenta a influência do adimensional de vibração por meio da variação da frequência de vibração, mantendo a amplitude em um valor fixo e sem a presença de glicerol. Estas curvas para o leito vibrofluidizado são semelhantes à curva do tipo b (vide Figura 2.2). De uma forma geral, o autor verificou que a variação de Γ (por meio da variação da frequência) praticamente não influenciou o comportamento dinâmico do leito sob o ponto de vista da velocidade mínima de fluidização, apresentando apenas uma pequena tendência ao aumento. Verificou também uma pequena tendência à suavização da região de transição entre o leito fixo e o fluidizado quando foi inserida a vibração no leito, nestas condições operacionais.

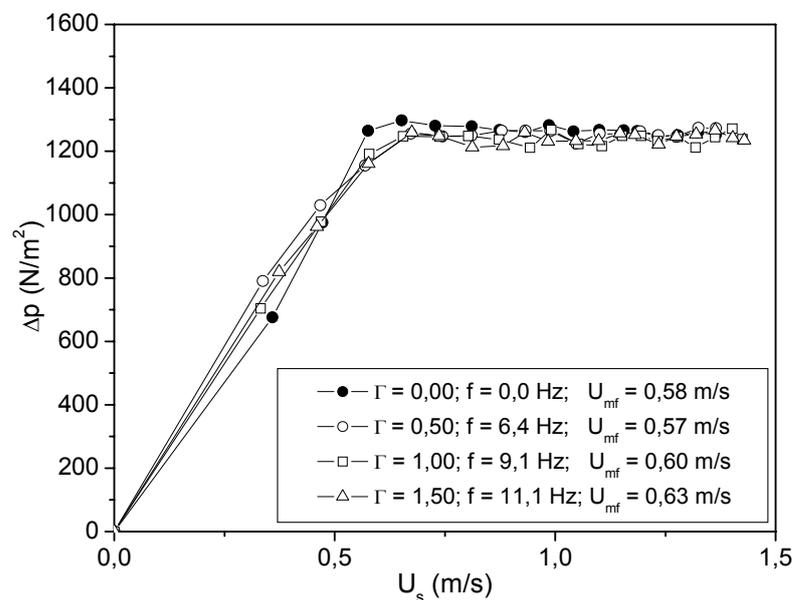


Figura 2.6: Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, parametrizado em Γ ; $\phi = 0,0000$; $A = 3,0 \times 10^{-3}$ m; $T = 40$ °C; $d_p = 1,10 \times 10^{-3}$ m (adaptado de Daleffe, 2002).

Na análise da influência do diâmetro das partículas inertes sobre a velocidade mínima de fluidização (Figura 2.7), Daleffe (2002) obteve valores de

U_{mf} distintos para cada diâmetro utilizado, sem a presença de glicerol e em leito fluidizado. Constatou que a U_{mf} aumentou com o aumento do diâmetro dos inertes, comportamento esperado, já que quanto maior for o tamanho das partículas inertes maior será a velocidade de ar requerida para iniciar e manter suspensas as partículas no leito.

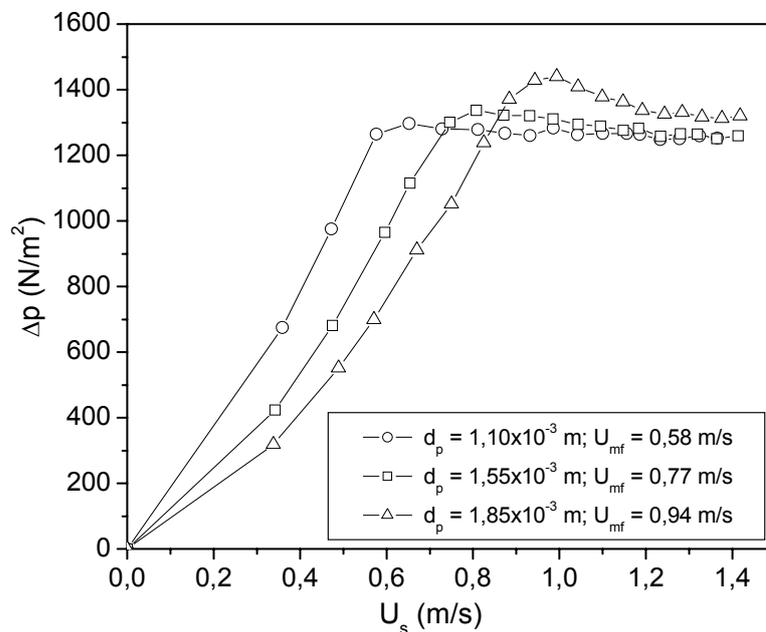


Figura 2.7: Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado em d_p ; $\phi = 0,0000$; $\Gamma = 0,00$; $T = 40$ °C; (adaptado de Daleffe, 2002).

Analisando a Figura 2.8, para o leito sob efeito de vibração, Daleffe (2002) observou comportamento qualitativamente semelhante ao apresentado na Figura 2.7 quanto à velocidade mínima de fluidização, isto é, a U_{mf} aumentou com o aumento do tamanho das partículas. Nestas figuras, nota-se que a U_{mf} aumentou com a imposição da vibração no leito, para um mesmo tamanho de partícula.

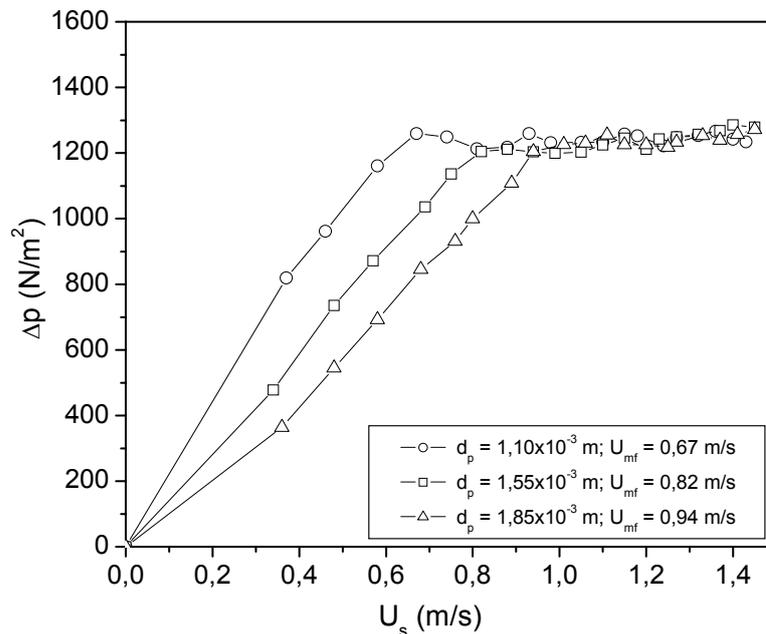


Figura 2.8: Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado em d_p ; $\phi = 0,0000$; $f = 11,1$ Hz; $\Gamma = 1,50$; $T = 40$ °C; (adaptado de Daleffe, 2002).

2.2.2 Perda de Carga no Leito

Muitos estudos foram realizados com o objetivo de avaliar a perda de carga que o leito sofre quando submetido simultaneamente à vibração e percolação do ar nas partículas. A Figura 2.2 ilustra algumas curvas de queda de pressão no leito agrupadas por Strumillo e Pakowski (1980). Fundamentado em experimentos desta natureza, vários modelos empíricos foram propostos para prever a queda de pressão no leito vibrofluidizado, e alguns exemplos estão apresentados no Quadro 2.3.

Outras correlações para determinação de $(\Delta p_{mf})_{LVF}$ obtidas por diversos pesquisadores, podem ser encontradas nos trabalhos de Pakowski *et al.* (1984), Erdész *et al.* (1986) e Erdész (1990).

Quadro 2.3: Correlações para queda de pressão na mínima fluidização, para o leito vibrofluidizado - $(\Delta p_{mf})_{LVF}$.

Correlação	Γ	Tipo*	ρ_p [kg/m ³]	d_p [x10 ⁻³ m]	H_0 [x10 ⁻² m]	d_L [x10 ⁻² m]	Autores	
$(\Delta p_{mf})_{LVF} = (\Delta p_{mf})_{LF} \left(\frac{A\omega^2}{g} \right)^{-n}$, sendo $n = 0,15 + 2,42 \times (d_p \rho_p)$, válida p/ $\Gamma > 1$	0-15 ^a	A, B	2660 983 1050	0,175 - 0,450 0,175 - 0,450 0,250 - 0,500	3,3 e 7,0	5,0	Bratu e Jinescu (1969; 1971 e 1972)	(15)
$(\Delta p_{mf})_{LVF} = (\Delta p_{mf})_{LF} \left(\frac{A\omega^2}{g} \right)^{-n}$, sendo $n = 0,41 + 1,96 \times (d_p \rho_p)$	0-30 ^b	B	1380 865	0,28 - 0,63	2,0 - 20,0	5,0 - 25,0	Mushtayev <i>et al.</i> (1972)	(16)
$(\Delta p_{mf})_{LVF} = 1,967 [\rho_p H_0 (1 - \varepsilon)] (d_p)^{0,11} \left(\frac{H_0}{d_L} \right)^{0,18} (\Gamma)^{0,51}$	0-30 ^b	B	1380	0,14 - 0,63	2,0 - 20,0	5,0 - 25,0	Chevilenko <i>et al.</i> (1979)	(17)
$\frac{(\Delta p_{mf})_{LVF}}{(\Delta p_{mf})_{LF}} = 1 - 0,0935 \left(\frac{d_p}{H_0} \right)^{0,946} (\Gamma)^{0,606} (\varphi)^{1,637}$	0-4,8 ^c	B, D	960 1040 1128 1200	3,11 e 3,83 2,20 0,91 - 3,90 2,20 - 3,90	1,25 - 10,0	20 x 20	Gupta e Mujumdar (1980a)	(18)
$\frac{(\Delta p_{mf})_{LVF}}{(\Delta p_{mf})_{LF}} = (1,06 - 0,03452\Gamma + 0,00056\Gamma^2 - 0,00007\Gamma^3)$ Válida para $U_s = U_{mf}$ e $\Gamma > 1,5$	0-13,4 ^d	B	-	-	10,0 - 12,0	10,8	Erdész e Ormós (1984)	(19)
$(\Delta p_{mf})_{LVF} = m_1 \left(\frac{A\omega^2}{g} \right)^{-m_2}$, sendo m_1 e m_2 constantes experimentais.	1-20 ^e	C, A	1987	polidisperso	4,8 - 20,0	16,0	Jinescu <i>et al.</i> (2000)	(20)

*Classificação de Geldart; ^aA entre 0,0 e 3,0x10⁻³ m e f entre 0 e 35 Hz; ^bA entre 0,5 x10⁻³ e 3,0x10⁻³ m e f entre 0 e 60 Hz; ^cA entre 0,0 e 4,2x10⁻³ e f entre 0 e 42 Hz; ^dA entre 0,60x10⁻³ e 1,85x10⁻³ m e ω entre 0 e 267 s⁻¹; ^eA = 2,1x10⁻³ m e f entre 11 e 50 Hz.

Segundo Gupta e Mujumdar (1980a), os experimentos feitos por Mushtayev *et al.* (1972) para obtenção da queda de pressão na mínima fluidização no leito vibrofluidizado (Equação 17), mostraram melhora na circulação das partículas no leito para adimensional de vibração menor do que a unidade, uma condição desejável do ponto de vista energético.

Gupta e Mujumdar (1980a) estudaram a influência da frequência de vibração (por meio da frequência angular de vibração - ω) sobre a queda de pressão no leito (Figura 2.9). Neste exemplo, as curvas mostram formas semelhantes às apresentadas na Figura 2.2, e exibem claramente como se dá a transição entre os regimes de leito fixo e fluidizado, na presença ou não de vibração. Propositalmente, a Figura 2.9 (tal como a Figura 2.2) não apresenta graficamente os pontos experimentais, facilitando a visualização da forma das curvas.

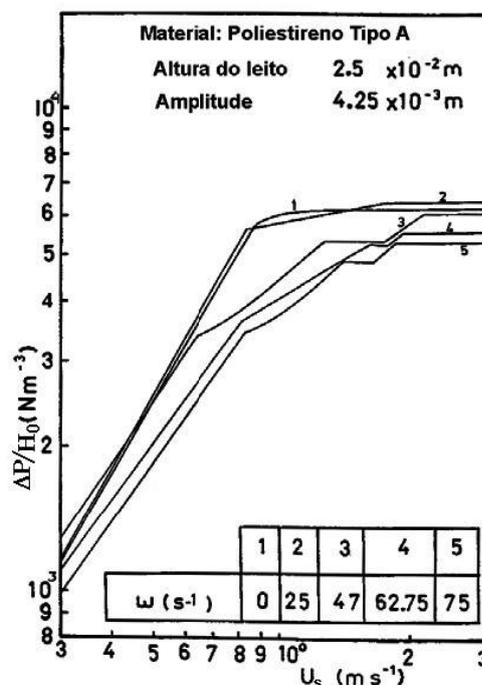


Figura 2.9: $\Delta p/H_0$ em função da velocidade superficial do ar, parametrizado na frequência angular de vibração; escala logarítmica (adaptado de Gupta e Mujumdar, 1980a).

Gupta e Mujumdar (1980a) constataram em toda a faixa experimental estudada, que a queda de pressão no leito vibrofluidizado foi sempre menor que para o leito fluidizado. Em determinadas condições experimentais, verificaram a redução na queda de pressão em até 35%, como consequência da vibração. De uma forma geral, eles concluíram que a densidade das partículas utilizadas no estudo não afetou significativamente os valores de $(\Delta p_{mf})_{LVF}$ obtidos, os quais foram mais dependentes da altura estática do leito e do adimensional de vibração (por meio da frequência angular de vibração). Já as partículas esféricas foram mais afetadas pela vibração do que as de forma irregular. Notaram também que o efeito da amplitude de vibração sobre a queda de pressão aumentou e tornou-se mais significativo com o aumento da frequência angular de vibração, neste caso, para ω maiores que 40 s^{-1} e amplitudes de vibração entre $1,60 \times 10^{-3}$ e $4,25 \times 10^{-3}$ m. Alguns dos resultados obtidos por Gupta e Mujumdar (1980a) foram correlacionados pela expressão apresentada na Equação 18 (Quadro 2.3). Esta equação foi obtida utilizando somente altas frequências angulares de vibração, acima das quais Gupta e Mujumdar (1980a) perceberam efeito significativo sobre a queda de pressão (acima de 40 s^{-1}). De acordo com os autores, um melhoramento desta equação poderia ser conseguido com a inclusão da relação entre densidades (ρ_p/ρ_g).

Erdész e Ormós (1984) estudaram a queda de pressão na velocidade mínima de fluidização $(\Delta p_{mf})_{LVF}$ em um leito vibrofluidizado, em função do adimensional de vibração. Obtiveram a Equação 19 (Quadro 2.3) a partir da correlação dos dados apresentados na Figura 2.10, via regressão polinomial. Os autores verificaram compactação do leito para Γ entre 0 e 1,5 por meio do

aumento da queda de pressão na mínima fluidização (Figura 2.11). Por isso, não recomendam a utilização da Equação 19 neste intervalo de Γ , nas condições estudadas. Para valores de Γ maiores que 1,5, verificaram redução da queda de pressão na mínima fluidização. O valor de Δp_{mf} foi maior para maiores alturas de leito estático, mas em compensação, a redução da queda de pressão foi mais acentuada com o aumento da intensidade de vibração, conforme apresentado na Figura 2.11.

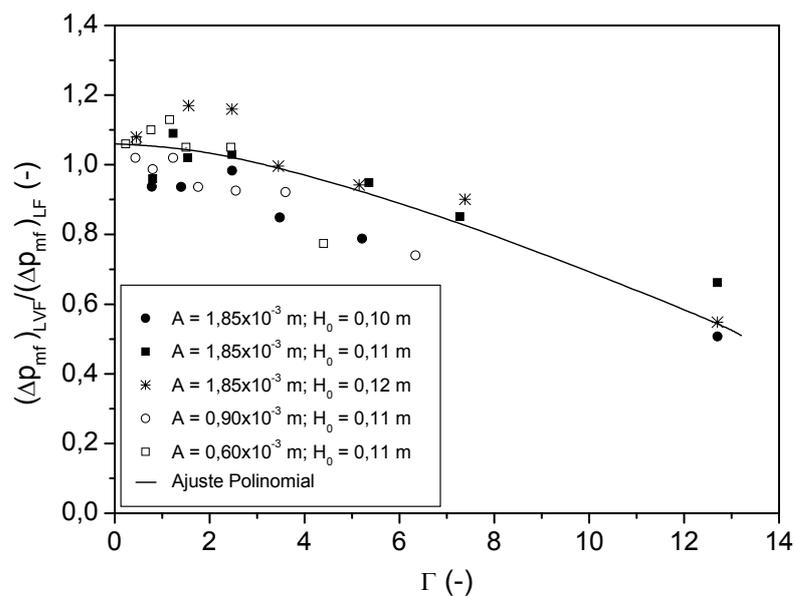


Figura 2.10: Efeito do adimensional de vibração sobre $(\Delta p_{mf})_{LVF}/(\Delta p_{mf})_{LF}$, parametrizado em A e H_0 ; (adaptado de Erdész e Ormós, 1984).

Deve-se acrescentar que, Erdész e Ormós (1984) determinaram U_{mf} de forma visual, observando o início da fluidização do leito, técnica semelhante à definida por Gupta e Mujumdar (1980a) para determinação de U_{mm} . Utilizando este valor subjetivo para U_{mf} , determinaram a queda de pressão na mínima fluidização.

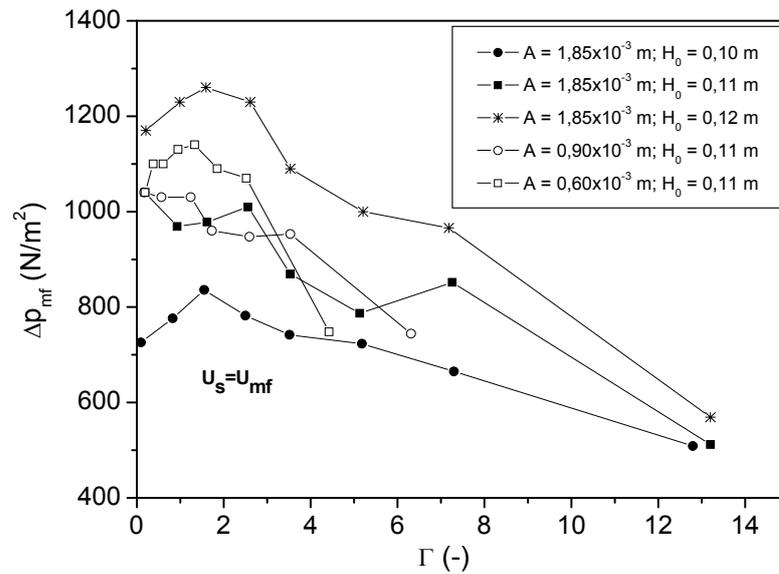


Figura 2.11: Efeito do adimensional de vibração sobre (Δp_{mf}) parametrizado em A e H_0 ; (adaptado de Erdész e Ormós, 1984).

Camargo (1998) estudou a influência da altura do leito estático na queda de pressão em um leito vibrofluidizado retangular de acrílico. A Figura 2.12 ilustra o resultado obtido para o leito formado por partículas inertes de vidro com $d_p = 0,7 \times 10^{-3} \text{ m}$ ($\rho_p = 2500 \text{ kg/m}^3$). Nesta situação o autor observou que o aumento da altura estática de inertes tornou maiores os valores da queda de pressão (Δp) e da queda de pressão na mínima fluidização (Δp_{mf}), ocasionado pelo aumento da resistência à passagem de ar pelo leito. Nestas condições estudadas, a altura de leito de partículas parece não ter influência significativa na velocidade mínima de fluidização, como mostrado na Figura 2.12.

Jinescu *et al.* (2000) por meio do estudo do comportamento fluidodinâmico do leito vibrofluidizado com persulfato de potássio em pó polidisperso, obtiveram uma correlação empírica para $(\Delta p_{mf})_{LVF}$ (vide a Equação 20 no Quadro 2.3). Nestas condições operacionais, a perda de carga foi reduzida de 20 a 30% em torno da velocidade mínima de fluidização, em relação aos leitos fluidizados convencionais.

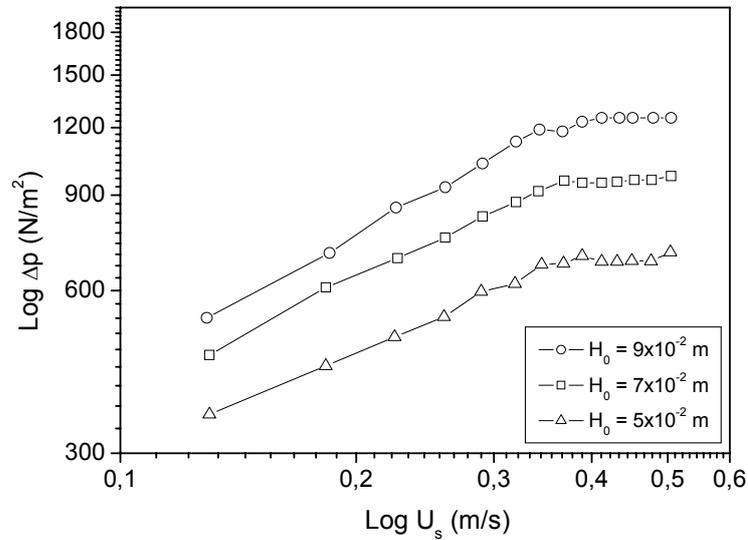


Figura 2.12: Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, parametrizado na altura de leito estático; esferas de vidro; $d_p = 0,7 \times 10^{-3}$ m; $f = 10$ Hz; $A = 1,98 \times 10^{-2}$ m; $\Gamma = 1,27$ (adaptado de Camargo, 1998).

Daleffe (2002) também estudou o comportamento da queda de pressão no leito vibrofluidizado em diversas condições operacionais (Tabela 2.1), sendo que algumas situações foram mostradas nas Figuras 2.6, 2.7 e 2.8. De uma forma global, verificou que a temperatura praticamente não influenciou o comportamento da queda de pressão no leito sem glicerol, independente do diâmetro de partícula utilizado no trabalho. Para o menor diâmetro de partícula ($1,10 \times 10^{-3}$ m), o aumento da frequência de vibração praticamente não influenciou o comportamento da queda de pressão (Figura 2.6). Para o maior diâmetro de partícula utilizado ($1,85 \times 10^{-3}$ m), o aumento da frequência de vibração provocou a expansão do leito na região de leito fluidizado, contribuindo para redução nos valores de queda de pressão, principalmente próximo a U_{mf} . No leito fluidizado, o aumento do diâmetro das partículas reduziu a queda de pressão na região de leito fixo e a aumentou na região de leito fluidizado (Figura 2.7). Na região de leito fixo, o aumento do diâmetro das partículas tornou maior a porosidade no leito

estático e facilitou a passagem de ar, atrasando também o início da fluidização. De acordo com o autor, as partículas maiores requerem maiores vazões de ar para iniciarem seu movimento e serem mantidas suspensas, aumentando também a queda de pressão, principalmente próximo à U_{mf} . Já no leito vibrofluidizado (Figura 2.8), o aumento do diâmetro das partículas reduziu a queda de pressão na região de leito fixo, e praticamente não a influenciou na região fluidizada. Nestas condições, a vibração somada ao escoamento de ar pode ter facilitado a suspensão das partículas na região fluidizada, atenuando o efeito do tamanho das partículas. Todas estas situações apresentadas foram para o leito seco, sem glicerol.

2.2.3 Porosidade do Leito

A porosidade do leito vibrofluidizado (ε) é um parâmetro auxiliar frequentemente utilizado para prever o movimento das partículas e a perda de carga no leito.

Em um leito vibrado (sem escoamento de ar), Kröll (1955) encontrou que a porosidade média do leito de partículas é dependente das condições vibracionais e das propriedades das partículas. Ele obteve para um leito composto por areia do mar ($d_p = 1,3 \times 10^{-4}$ m), a redução na porosidade com o aumento da aceleração vibracional, até o ponto em que ocorreu uma inversão no comportamento, tendo como consequência a expansão contínua do leito. Para idênticos valores de amplitudes de vibração, a expansão do leito foi maior para maiores frequências de vibração. Paralelamente observou que partículas de licopódio em pó ($d_p = 0,3 \times 10^{-4}$ m), quando vibradas a 30 Hz compactaram-se sobre uma grande faixa de amplitudes de vibração. A observação destes comportamentos o levou a concluir que existe diferença no

comportamento dinâmico de leitos compostos de partículas muito pequenas (pó) quando comparado com leitos compostos de partículas maiores. (Eccles 1990).

Chlenov e Mikhailov (1965) utilizando leitos vibrados (sem escoamento de ar) com areia de quartzo (d_p entre $2,10 \times 10^{-4}$ e $3,55 \times 10^{-4}$ m e H_0 de $4,0 \times 10^{-2}$ m) em uma câmara cilíndrica vibrada constataram que, a fração de vazios foi dependente da aceleração vibracional imposta ao leito. Na Figura 2.13 é possível observar o comportamento da porosidade do leito com Γ , parametrizado na frequência de vibração. Os autores verificaram que, quando a aceleração vibracional foi menor que a aceleração gravitacional, ocorreu a compactação do leito. Por outro lado, quando a aceleração vibracional superou a gravitacional, a porosidade aumentou e ocorreu a expansão do leito. Já para um valor constante de aceleração vibracional, a maior expansão do leito ocorreu para maiores amplitudes e menores frequências de vibração.

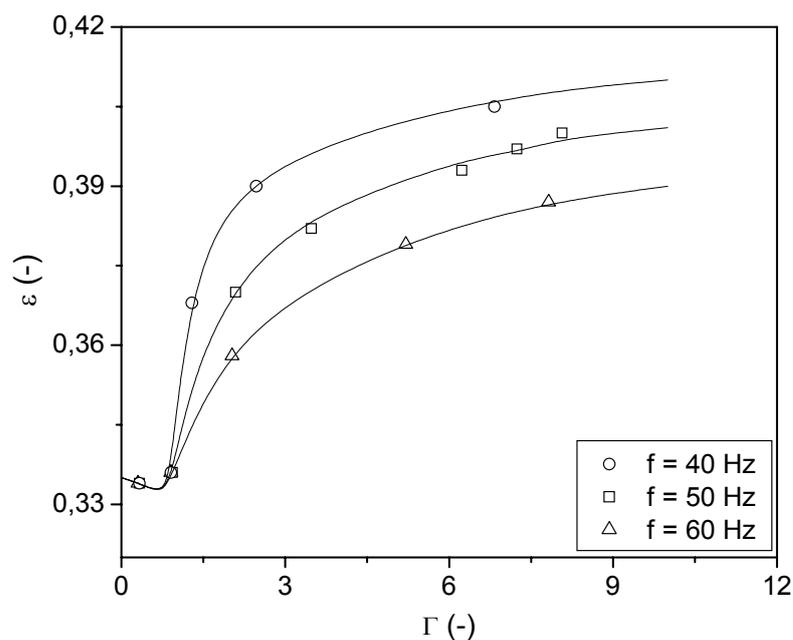


Figura 2.13: Porosidade do leito em função do adimensional de vibração, parametrizado em f ; areia de quartzo; (adaptado de Chlenov e Mikhailov, 1965).

Alguns pesquisadores apresentam correlações para descrever condições específicas com relação à obtenção da porosidade. A influência de fatores individuais na obtenção da porosidade foi levada em consideração na correlação obtida por Bakhman *et al.* (1970), que segue:

$$\varepsilon = 0,395 \left(\frac{\rho_g d_p \omega}{\nu_g} \right)^{-0,073} \left(\frac{A}{d_p} \right)^{0,006} \left(\frac{m_p}{d_L^3 \rho_p} \right)^{0,138} (\Gamma)^{0,094} \quad (21)$$

Esta equação foi obtida em um leito cilíndrico vibrofluidizado, utilizando carboneto de silicone em pó na seguinte faixa de parâmetros: $\rho_p = 3300 \text{ kg/m}^3$, d_p entre $0,8 \times 10^{-4}$ e $1,6 \times 10^{-4}$ m, f entre 30 e 60 Hz, A entre $0,1 \times 10^{-3}$ e $0,3 \times 10^{-3}$ m e $\frac{m_p}{d_L^3 \rho_p}$ entre 0,2 e 0,1 (Strumillo e Pakowski, 1980 e Pakowski *et al.*, 1984).

Chevilenko *et al.* (1979) verificaram a influência de uma resina de PVC granulada, sobre a porosidade do leito vibrofluidizado e obtiveram a seguinte correlação:

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon} = 1 - \exp \left[-0,54 \left(\frac{U_s}{U_{mvf}} - 1 \right) (\Gamma)^{0,75} \left(\frac{U_s}{U_{mvf}} \right) \right] \quad (22)$$

As condições operacionais para obtenção desta equação foram as mesmas utilizadas na obtenção da Equação 17. Sem informar como foi definido U_{mvf} nesta equação, verificaram que para altas vazões de ar, a porosidade deixou de ser uma função dos parâmetros vibracionais. Isto é, a porosidade do leito vibrofluidizado tornou-se a mesma do leito sem vibração, a altas vazões de ar (Pakowski *et al.*, 1984).

Embora existam diversos trabalhos que investiguem a porosidade

em leito vibrofluidizado, ainda não há um consenso a respeito da real influência da amplitude, da frequência e do adimensional de vibração sobre a porosidade do leito.

Outras correlações obtidas por diversos pesquisadores para porosidade podem ser encontradas também nos trabalhos de Pakowski *et al.* (1984), Erdész *et al.* (1986) e Erdész (1990).

Deve-se acrescentar que grande parte das correlações existentes na literatura para o leito vibrofluidizado não apresenta uma definição clara das condições sob as quais os experimentos foram realizados. Mesmo assim, este equacionamento é importante, pois faz parte da base teórica existente para este equipamento, além de ajudar na descrição dos fenômenos envolvidos, podem indicar alguns dos parâmetros envolvidos no processo.

2.2.4 Desvio Padrão da Queda de Pressão

As flutuações de pressão no leito são estudadas há algum tempo como ferramenta auxiliar na determinação do regime de comportamento em leitos fluidizados borbulhantes (Verloop e Heertjes, 1974). Estas flutuações captadas por transdutores de pressão podem ser analisadas para obtenção, por exemplo, da velocidade mínima de fluidização em leito fluidizado (Puncochar *et al.*, 1985) ou identificar regimes de fluidização por associação com os regimes de escoamento já conhecidos para fluidização (Kage *et al.*, 2000). Puncochar *et al.* (1985) constataram que o desvio padrão de flutuações de pressão apresenta uma relação linear com a velocidade do gás, e que a velocidade na qual o desvio padrão das flutuações é zero corresponde à velocidade mínima de fluidização (U_{mf}).

Wilkinson (1995) utilizou a metodologia sugerida por Puncochar *et al.* (1985) em uma coluna de fluidização com distribuidor de placa perfurada, com a tomada de pressão localizada no pleno do leito (abaixo da placa distribuidora) ao invés do corpo da coluna. Uma descrição quantitativa do regime de escoamento pode ser obtida, por meio da análise de séries temporais das flutuações de pressão medidas no leito (Johnsson *et al.*, 2000 e Felipe e Rocha, 2004). Este tipo de amostragem das flutuações de pressão por meio de transdutores normalmente é feito de modo contínuo e em tempo real, identificando e monitorando os diferentes regimes de fluidização no leito.

Alguns autores também utilizam transdutores de pressão para medir a queda de pressão “pontual” no leito, que usualmente é representada graficamente em função da velocidade superficial do ar ou da vazão, e chamada muitas vezes de curva característica do leito. Assim, cada ponto de pressão é a média de um conjunto de pontos de pressão obtidos em um determinado intervalo de tempo, de onde se pode obter estatisticamente o desvio padrão. Nestes casos, a tomada de pressão é normalmente feita no pleno do leito e a queda de pressão é obtida para velocidades de ar decrescentes (Bratu e Jinescu, 1971). Por meio do uso de transdutores para medida da queda de pressão no leito e do cálculo do desvio padrão, é possível inferir as flutuações que ocorreram em um determinado período de tempo como consequência da dinâmica do leito, as quais geralmente não são detectadas visualmente nos manômetros de coluna de água (Garim, 1998).

Garim (1998) apresenta uma metodologia de análise das curvas características por meio das curvas de desvio padrão da medida da queda de pressão no leito. Em seu trabalho, utilizou esferas inertes de vidro tipo “ballotini”

com $d_p = 1,10 \times 10^{-3}$ m e $\rho_p = 2439$ kg/m³, H_0 entre 0,07 e 0,11 m, intervalo de Γ entre 0,00 a 1,41 com A entre 0,00 e $1,95 \times 10^{-3}$ m e f entre 0,0 e 11,7 Hz, para um leito vibrofluidizado retangular. A taxa de amostragem do transdutor foi de 200 Hz por um intervalo de tempo de 1 segundo. Por meio da utilização das curvas obtidas de desvio padrão da queda de pressão (δp), obteve uma boa representação das mudanças que ocorrem na resistência do leito devido à permeabilidade, ao movimento das partículas e à formação de bolhas originárias do escoamento do ar através do leito, e verificou o efeito da vibração sobre o sistema. Constatou que o comportamento do desvio padrão foi independente da altura do leito de partículas para o leito fluidizado e aumentou com o aumento de Γ .

A Figura 2.14 apresenta o desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar, representando um exemplo em que Garim (1998) determinou as condições nas quais a vibração imposta foi predominante em relação à força exercida pelo escoamento do ar através do leito. Para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 0,10$), ele constatou que o comportamento do desvio padrão da queda de pressão (δp) foi praticamente o mesmo para o leito fluidizado. Para Γ até 0,36, observou que o efeito do escoamento de ar foi predominante até a velocidade em torno de 0,30 m/s, momento aproximado em que se iniciou a fluidização das partículas. A partir daí, a dinâmica do leito foi bastante dependente da força vibracional inserida no sistema. Para $\Gamma = 0,83$, houve uma grande diferença nos valores de desvio padrão da queda de pressão (δp) em toda extensão de U_s , em comparação ao leito fluidizado. Isto indica que a força vibracional exerce maior influência nas características fluidodinâmicas do leito do que a força exercida pelo escoamento de ar.

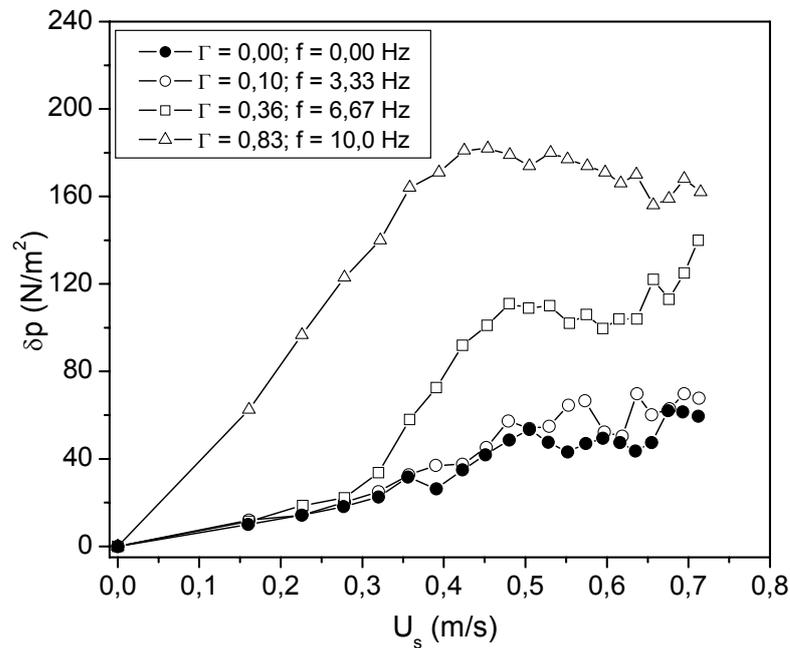


Figura 2.14: Desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, parametrizado em Γ ; esferas de vidro; $H_0 = 0,09$ m; $A = 1,95 \times 10^{-3}$ m; $d_p = 1,10 \times 10^{-3}$ m; (adaptado de Garim, 1998).

Camargo e Freire (2002) realizaram medidas semelhantes às feitas por Garim (1998), utilizando um leito vibrofluidizado cilíndrico de acrílico, preenchido com partículas inertes esféricas de vidro com $d_p = 0,70 \times 10^{-3}$ m e $\rho_p = 2600$ kg/m^3 , H_0 entre 0,07 e 0,11 m e amplitude fixa em 0,01 m. A taxa de amostragem do transdutor também foi de 200 Hz por um intervalo de tempo de 1 segundo. Além do que Garim (1998) havia observado, os autores concluíram que o desvio padrão do leito aumentou com o aumento da altura de leito estático em leito vibrofluidizado, nas condições estudadas. Quando a aceleração vibracional tornou-se igual à aceleração gravitacional ($\Gamma = 1,00$), as flutuações de pressão apresentaram pouca dependência com a velocidade do ar. Na Figura 2.15 Camargo e Freire (2002) compararam seu trabalho com o de Garim e Freire (1999), e observaram que para Γ maior que 1 o aumento da velocidade do ar

resultou em diminuição do desvio padrão. Já para Γ menor que 1, houve inicialmente um leve aumento no desvio padrão e posteriormente o mesmo atingiu um patamar onde permaneceu praticamente constante. Deve-se salientar que a comparação apresentada na Figura 2.15 foi meramente ilustrativa e teve caráter qualitativo, em virtude dos diferentes valores empregados para os parâmetros.

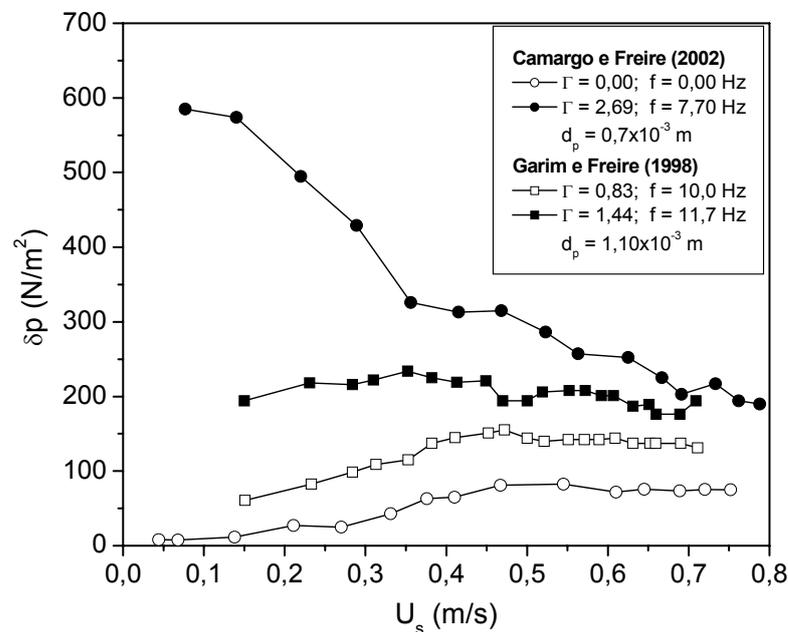


Figura 2.15: Desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, parametrizado em Γ ; esferas de vidro; $H_0 = 7,0 \times 10^{-2}$ m; (adaptado de Camargo e Freire, 2002).

Daleffe (2002) e Daleffe e Freire (2004) realizaram um estudo bastante amplo analisando o comportamento dinâmico do leito vibrofluidizado (e fluidizado) retangular, por meio do desvio padrão da queda de pressão no leito (δp). As condições operacionais utilizadas estão descritas na Tabela 2.1, sendo que o desvio padrão foi obtido em todas as condições apresentadas para uma taxa de amostragem de 100 Hz, em um intervalo de tempo de 3 segundos.

De uma forma geral, os autores verificaram na ausência de vibração que, quando o leito se comportava como um leito fixo ou estava totalmente aglomerado devido ao glicerol, o desvio padrão apresentado foi muito pequeno e praticamente independente dos parâmetros de ensaio. Ainda na ausência de vibração, quando o leito se comportava como um leito fluidizado o desvio padrão foi significativo, principalmente a altas velocidades de ar. O desvio padrão da queda de pressão observado foi intensificado na presença de vibração, inclusive na região de leito fixo.

A Figura 2.16 ilustra o efeito do adimensional de vibração sobre a queda de pressão no leito, tal como havia sido apresentado na Figura 2.6, acrescido agora do desvio padrão da queda de pressão. Na Figura 2.16, sem o efeito da vibração, Daleffe e Freire (2004) verificaram que o início da fluidização coincidiu com a região onde ocorreu o aumento súbito do desvio padrão da queda de pressão, comportamento que não foi observado sob o efeito da vibração, independente das condições estudadas. Em todos os casos estudados em leito fluidizado, os autores verificaram que o desvio padrão da queda de pressão pode ser uma ferramenta auxiliar na determinação da velocidade mínima de fluidização.

Com base ainda na Figura 2.16, Daleffe e Freire (2004) verificaram que o adimensional de vibração não apresentou influência significativa sobre as curvas de queda de pressão. Eles verificaram um comportamento diferente por meio das curvas de desvio padrão da queda de pressão, onde a dinâmica do leito foi nitidamente influenciada pelo adimensional de vibração. Nestas condições, o aumento da frequência de vibração intensificou a movimentação das partículas.

De uma forma geral, concluíram que este tipo de análise do desvio padrão da queda de pressão pode fornecer informações adicionais sobre o comportamento fluidodinâmico do leito, além de auxiliar na determinação do momento em que se inicia a movimentação das partículas.

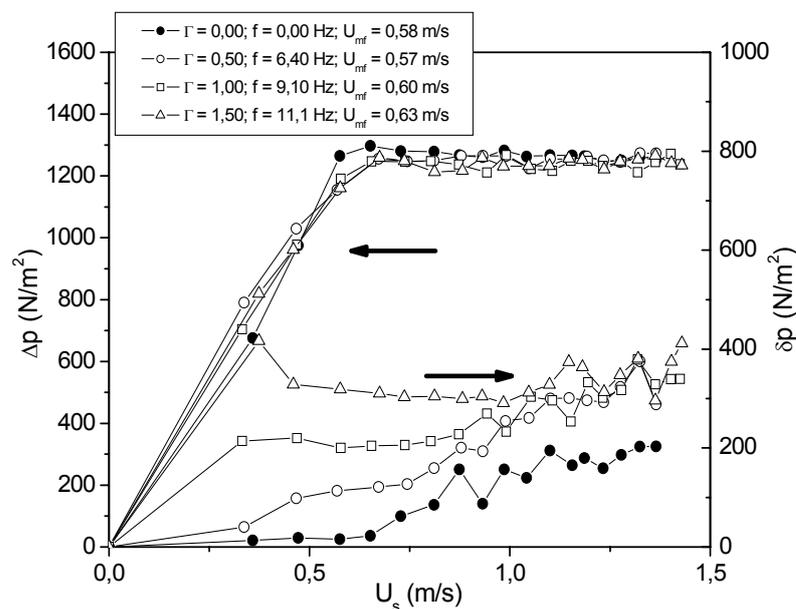


Figura 2.16: Queda de pressão no leito e desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar, parametrizado em Γ ; $d_p = 1,10 \times 10^{-3}$ m; $T = 40^\circ$ C; $\phi = 0,0000$; (adaptado de Daleffe e Freire, 2004).

2.3 Secagem de Pastas

Freire (1992) fez um breve relato sobre a situação da secagem de pastas no Brasil e as instituições que mais desenvolveram pesquisas voltadas a este tipo de secagem. O autor afirma que apesar dos inúmeros trabalhos publicados, a secagem ainda não deixa de ser uma “arte”, uma vez que esta é uma operação bastante complexa, devido principalmente à diversidade de pastas com características distintas.

Weltman (1996) define em termos reológicos uma pasta como sendo

um sistema sólido-líquido constituído ou de partículas microscópicas ou de partículas coloidais dispersas em uma fase líquida. Strumillo *et al.* (1983) classificam os materiais pastosos nos seguintes grupos:

- **duros** - tortas de filtração, precipitados, etc.;
- **fofos** - pastas de amido, polpas em geral, etc.;
- **emulsões** - leite natural, maionese, etc.;
- **suspensões** - leite de cal, $\text{Al}(\text{OH})_3$ em água, enxofre em água, etc., e
- **soluções** - sangue, salmoura, açúcar em água, etc.

Em uma descrição simplificada, a secagem de pastas em leitos “móveis” utilizando partículas inertes como suporte envolve alguns importantes passos: a alimentação do material a ser seco e sua distribuição quase uniforme na superfície das partículas (formação de um filme); a secagem do filme pelo ar quente, tornando-o friável; colisões entre as partículas e entre as partículas e a parede do equipamento provocando fraturas e o desprendimento do filme seco; o transporte pneumático do pó seco com o ar quente e a coleta como produto, usualmente em um ciclone (Kachan, 1988).

Quando se utiliza pasta com constituição líquida como leite, sangue, extratos vegetais entre outras, a alimentação é feita normalmente por meio de um sistema bomba-bico atomizador e esta operação já é bem estabelecida. Já os processos de transferência que ocorrem nas outras etapas são objeto de intensa investigação. Os trabalhos existentes na literatura tratam destes fenômenos de transferência, mas ainda não foi possível encontrar um modelo bem estabelecido para secagem em leito fluidizado, muito menos para o vibrofluidizado.

A maioria dos estudos realizados e publicados sobre secagem em leito vibrofluidizado trata da secagem de material particulado nas mais diversas formas (pedaços, fatias, grãos, pós, sementes entre outros), sem a utilização de inertes como suporte e avaliando principalmente a dinâmica do leito durante o processo, a cinética da secagem e a qualidade do produto final. Alguns exemplos destes tipos de materiais estão apresentados no Quadro 2.4.

Quadro 2.4: Alguns tipos de materiais secos em leito vibrofluidizado.

Material (forma)	Referência
Açúcar (cristais)	Ereshchenko (1965)
Ácido adípico (pó cristalino)	Moris (2002) Moris e Rocha (2003a)
Ácido cítrico (pó cristalino)	Dong <i>et al.</i> (1991) Pan <i>et al.</i> (1991)
Albumina (pó)	Liu <i>et al.</i> (1998)
Alumina (esferas)	Shuhong <i>et al.</i> (1994)
Arroz (farelo)	Fito <i>et al.</i> (1975) Fito <i>et al.</i> (1977)
Arroz (grãos com cascas, tipo paddy)	Soponronnarit <i>et al.</i> (2000)
Arroz (grãos cozidos)	Ramesh e Srinivasa Rao (1996) Ramesh <i>et al.</i> (1996)
Banana (fatias)	Cardoso (1998) Cardoso e Kieckbusch (1999)
Carbonato de cálcio (pó)	Pakowski e Strumillo (1980)
Cebola (fatias - anéis)	Finzer (1984)
Cenoura (pedaços)	Sinz e Lund (1974) Pan <i>et al.</i> (1997b) Brod <i>et al.</i> (1998) Pan <i>et al.</i> (1998) Brod (1999) Pan <i>et al.</i> (1999)
Chá verde (folhas)	Shah e Goyel (1980) Shah e Goyel (1995)

Cloreto de sódio (cristais)	Pan <i>et al.</i> (1991) Li e Pan (1996) Borde <i>et al.</i> (1996)
Ervilha (grãos)	Sinz e Lund (1974)
Lactose (granulada)	Valchář <i>et al.</i> (1967)
Leite (pó)	Hahne (2001) Cruz (2004)
Madeira (serragem)	Moreno <i>et al.</i> (2000)
Milho (grãos)	Sinz e Lund (1974) Mujumdar (1984) Dong <i>et al.</i> (1991)
Nabo (pedaços)	Alvarez <i>et al.</i> (2002)
Ovo (casca triturada)	Brod (1999) Brod <i>et al.</i> (2000) Brod (2003)
Papoula (sementes)	Stakić <i>et al.</i> (1996)
Persulfato de potássio (pó cristalino)	Jinescu <i>et al.</i> (1998)
Raiz de Konjac ou Moyu (fatias)	Pan <i>et al.</i> (1997a)
Sílica gel (granulada)	Gupta <i>et al.</i> (1980) Khalid e Mujumdar (1982) Dong <i>et al.</i> (1991) Borde <i>et al.</i> (1996)
Soja (farinha)	Alvarez e Reyes (1998)
Soja (grãos)	Kieckbusch e Finzer (1990)
Vegetais (sementes)	Pang <i>et al.</i> (1996)

No entanto, um número pequeno de trabalhos reserva-se aos estudos fluidodinâmicos e de secagem de pastas utilizando partículas inertes como suporte em leito vibrofluidizado. Os estudos fluidodinâmicos na presença de pastas e suspensões são importantes, para compreender qual é o efeito que um material com constituição líquida tem sobre a dinâmica do leito, e servem de base para fundamentar o processo de secagem.

Chevilenko *et al.* (1979) mostraram a dependência da velocidade mínima de vibrofluidização com a concentração de água, esta última definida

como razão da massa de água por massa de inertes secos em um leito vibrofluidizado (Figura 2.17). Por meio desta figura, perceberam que o aumento da concentração de água no leito provocou o aumento na velocidade mínima de vibrofluidização e esse aumento foi atenuado pelo aumento da amplitude de vibração, para uma frequência vibracional constante (Pakowski *et al.*, 1984).

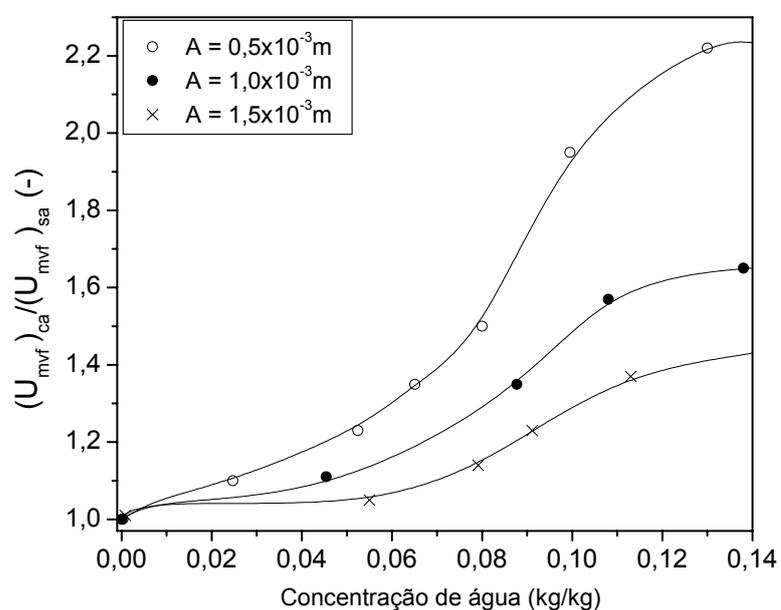


Figura 2.17: $(U_{mvf})_{ca} / (U_{mvf})_{sa}$ em função da concentração de água no leito, parametrizada em A; (adaptado de Pakowski *et al.*, 1984).

Na Figura 2.17, $(U_{mvf})_{ca}$ e $(U_{mvf})_{sa}$ referem-se respectivamente a velocidade mínima de vibrofluidização para o inerte recoberto com água e velocidade mínima de vibrofluidização para o inerte seco. Algumas das condições operacionais utilizadas por Chevilenko *et al.* (1979) estão detalhadas no Quadro 2.3.

Erdész e Ormós (1986) estudaram a secagem de pastas com partículas inertes em um leito vibrofluidizado de vidro, com geometria cilíndrica e diâmetro da coluna de 0,11 m. As partículas inertes utilizadas foram a areia de quartzo e a

alumina. Utilizaram como pastas o Rigeococin, que é uma base para material veterinário centrifugado (umidade inicial de 35%) e um gel de hidróxido de alumínio (umidade inicial de 75%), para uma massa de inertes de 1 kg e adimensional de vibração (Γ) entre 0,00 a 9,10. Os autores não apresentaram qualquer informação sobre quais foram as amplitudes e frequências de vibração empregadas neste trabalho. Sem apresentar qualquer representação gráfica dos resultados, concluíram que a eficiência da secagem pode ser melhorada pelo aumento da intensidade de vibração, justamente por aumentar a eficiência da transferência de calor e de umidade e melhorar a taxa de remoção da pasta seca que recobre os inertes, evitando o crescimento descontrolado deste filme. Em função da melhora da fluidização como efeito da vibração, notaram que a vazão de ar também pode ser reduzida consideravelmente, sendo esta necessária somente para transportar a umidade. Conseqüentemente, a eficiência da secagem pode ser aumentada com a manutenção da vazão. Observaram também que o aumento do tamanho e da densidade das partículas inertes (de areia para alumina) pode melhorar consideravelmente a eficácia da operação de secagem. Eles atribuíram essa melhora ao efeito abrasivo das partículas de alumina provocado pela alta força de inércia em função da sua densidade, e pela melhor distribuição do material sobre a superfície esférica da mesma em comparação com a areia de quartzo, que é formada por cristais pequenos e irregulares.

Novy e Kieckbusch (1988) estudaram a secagem de leite em pó reconstituído em um leito vibrofluidizado de PVC, com geometria cilíndrica e diâmetro da coluna de 0,145 m. As partículas inertes foram esferas de vidro ($d_p = 4 \times 10^{-3}$ e $17,5 \times 10^{-3}$ m). As concentrações utilizadas de leite reconstituído foram

entre 10 e 40% em massa para temperaturas entre 35 e 70°C no tempo total de até 50 minutos. Os autores descreveram o sistema de vibração utilizado, mas não especificaram quais condições vibracionais foram utilizadas, deixando claro que a vibração foi apenas um coadjuvante no processo. Analisando os parâmetros citados, observaram que o diâmetro dos inertes apresentou maior influência sobre a taxa de secagem e que as influências da temperatura do ar e da concentração do leite na alimentação do leito, tiveram efeito desprezível. As esferas de maior tamanho praticamente não “perceberam” o escoamento de ar, mas apresentaram menor tempo de secagem e menor aglomeração, devido à intensa movimentação com a vibração. Observaram também que o aumento da concentração de leite na água aumentou a tendência de formação de canais preferenciais e de blocos rígidos (para partículas de menor diâmetro), dificultando o processo de secagem. Quando adicionaram a pasta com menor concentração de leite (cerca de 10%) sobre as partículas, notaram primeiro o completo recobrimento das mesmas, mas não houve o desprendimento posterior do filme de leite. Isto não ocorreu para as demais concentrações utilizadas. Embora não tenham citado o efeito dos parâmetros vibracionais sobre o processo, dificultando comparações com outros trabalhos, os autores deixaram visível que a mesma teve um papel fundamental no processo, evitando aglomerações e movimentando as partículas de grande diâmetro ($17,5 \times 10^{-3}$ m).

Pan *et al.* (1995) secaram bactérias fotossintéticas em um leito vibrofluidizado cilíndrico, de acrílico, com diâmetro de 0,24 m e altura de 0,55 m. Utilizaram como partículas de suporte uma distribuição de farelo de trigo polidisperso (material poroso com $\rho_p = 290$ kg/m³) e areia do mar polidispersa (material não poroso com $\rho_p = 1300$ kg/m³), e como pasta uma suspensão de

bactérias fotossintéticas altamente sensíveis à temperatura. A temperatura do ar na entrada do leito foi mantida constante em 85°C e o tempo total de secagem foi de aproximadamente 30 minutos. Pan *et al.* (1995) verificaram inicialmente, que para o sólido poroso foi possível saturar o leito com pasta até umidade em torno de 50% (base úmida) sem que ocorressem aglomerações durante a operação, enquanto que para o recobrimento da areia com pasta foi possível saturar cerca de 20% (base úmida). Também constataram que a secagem em leito vibrofluidizado (batelada e contínuo) permitiu o processamento de pastas com menor exigência de vazão de ar, quando comparado com o leito fluidizado convencional e que a vibração mecânica facilitou a fluidização, minimizou a segregação e reduziu o atrito entre as partículas. Da mesma forma que no caso anterior, a vibração foi utilizada somente como um coadjuvante no processo, sendo que os autores não forneceram detalhes sobre as condições vibracionais utilizadas.

Para uma melhor compreensão do processo de secagem envolvendo pastas e suspensões em leitos com partículas inertes, é fundamental a caracterização do comportamento fluidodinâmico sob diversos aspectos. Para a caracterização do comportamento fluidodinâmico de leitos “móveis” simulando a presença de um líquido, se utiliza geralmente o glicerol alimentado em batelada. O glicerol é utilizado justamente por ter baixo poder de evaporação nas condições experimentais normalmente utilizadas, cuja viscosidade praticamente não muda no tempo desde que mantidas estas condições. Alguns trabalhos publicados na literatura apresentam a influência do glicerol sobre o comportamento fluidodinâmico em leito de jorro (Patel *et al.*, 1986; Schneider e Bridgwater, 1993; Passos e Mujumdar, 2000; Spitzner Neto, 2001 e Bacelos *et al.*, 2005), em

leito fluidizado (Passos e Mujumdar, 2000; Passos e Massarani, 2001; Daleffe, 2002 e Daleffe e Freire, 2004) e em leito vibrofluidizado (Malhotra *et al.*, 1984; Daleffe, 2002 e Daleffe e Freire, 2004). Por concisão, a seguir serão apresentados alguns dos trabalhos sobre o efeito do glicerol no comportamento dinâmico apenas dos leitos vibrofluidizados (e fluidizados).

Malhotra *et al.* (1984) estudaram o comportamento fluidodinâmico de partículas inertes de vidro recobertas com glicerol em um leito vibrofluidizado retangular (0,20 x 0,05 m). As partículas inertes foram esferas de vidro tipo “ballotini” ($d_p = 0,353 \times 10^{-3}$ e $0,667 \times 10^{-3}$ m e $\rho_p = 2500$ kg/m³) para H_0 entre 0,095 e 0,12 m. O leito foi operado a temperatura ambiente, com amplitude de vibração de $4,25 \times 10^{-2}$ m, frequência de vibração entre 0 e 16 Hz, Γ entre 0,0 e 4,0, grau de saturação de glicerol (volume de glicerol por volume de poros no leito estático) de 0,0000, 0,0108 e 0,0216. Quantificaram originalmente o volume de glicerol alimentado no leito por meio da concentração de glicerol (massa de glicerol por massa de inertes secos) e não pela saturação de glicerol (ϕ). Para permitir comparações com o trabalho de Daleffe e Freire (2004), a concentração de glicerol foi “convertida” em saturação de glicerol, forma habitualmente encontrada na literatura especializada. Inicialmente, Malhotra *et al.* (1984) observaram o regime fluidizado para valores de saturação de glicerol (ϕ) até 0,0216 mesmo sem a ajuda da vibração, só que esta foi caracterizada pelo aparecimento de canais preferenciais (*channelling*) e de má qualidade (instável). Acima desta saturação de glicerol, não conseguiram fluidizar o material sem a ajuda de intensa vibração ($\Gamma > 4$). Para o leito sem a adição de líquido, observaram compactação das partículas com o aumento da intensidade de

vibração até Γ próximo de 2. Acima deste valor o leito começou a se expandir.

Alguns dos resultados obtidos por Malhotra *et al.* (1984) estão apresentados nas Figuras 2.18, 2.19 e 2.20. Em leito fluidizado, Malhotra *et al.* (1984) notaram que o aumento da saturação de glicerol (ϕ) de 0,0108 para 0,0216 retardou o início da fluidização de 0,26 m/s para 0,34 m/s. A adição de vibração sobre o leito fluidizado na presença de glicerol “suavizou” a região de transição entre leito fixo e fluidizado, e a queda de pressão observada para o leito vibrofluidizado foi sempre maior até o início da fluidização nesta configuração de leito.

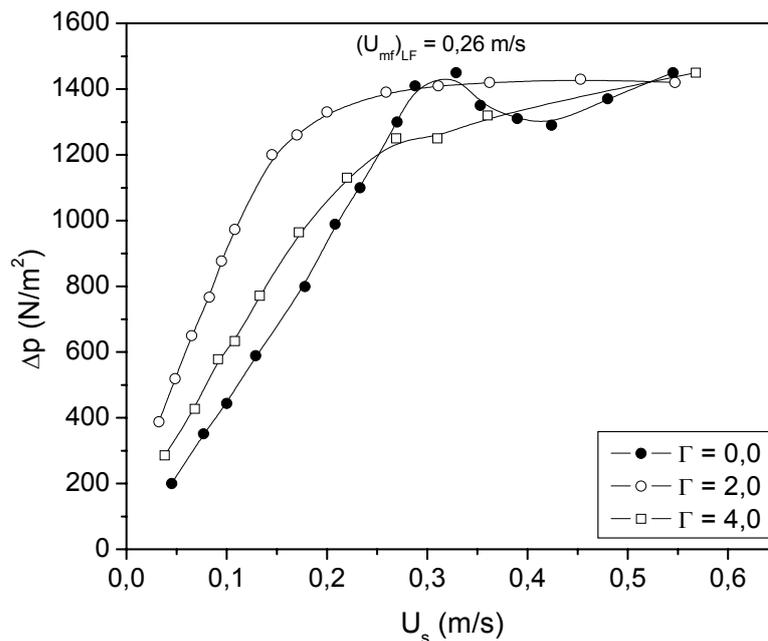


Figura 2.18: Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, parametrizado em Γ ; esferas de vidro; $d_p = 3,53 \times 10^{-2}$ m; $H_0 = 0,095$ m; $\phi = 0,0108$; (adaptado de Malhotra *et al.*, 1984).

O aumento do grau de aderência em função do aumento do volume de glicerol (comparando as Figuras 2.18 e 2.19) provocou um afastamento entre as curvas de queda de pressão para o leito vibrofluidizado, principalmente após o

início da fluidização. Assim, para saturação de glicerol de 0,0216, o aumento do adimensional de vibração (por meio da frequência vibracional) teve maior influência sobre a dinâmica do leito, que para saturação de 0,0108. Para saturação de glicerol de 0,0216 no leito fluidizado (Figura 2.19), eles verificaram que a fluidização tornou-se irregular, com a movimentação monotônica das partículas e bloqueio da passagem do ar. Com a aplicação da vibração, a formação de canais preferenciais à passagem de ar foram quase imperceptíveis.

Malhotra *et al.* (1984) também estudaram a influência do diâmetro médio das partículas inertes sobre a dinâmica do leito (Figura 2.20). Por meio de comparação entre as Figuras 2.18 e 2.20, observaram que o aumento do tamanho das partículas inertes na presença de glicerol no leito fluidizado retardou o início da fluidização de 0,26 m/s para 0,53 m/s.

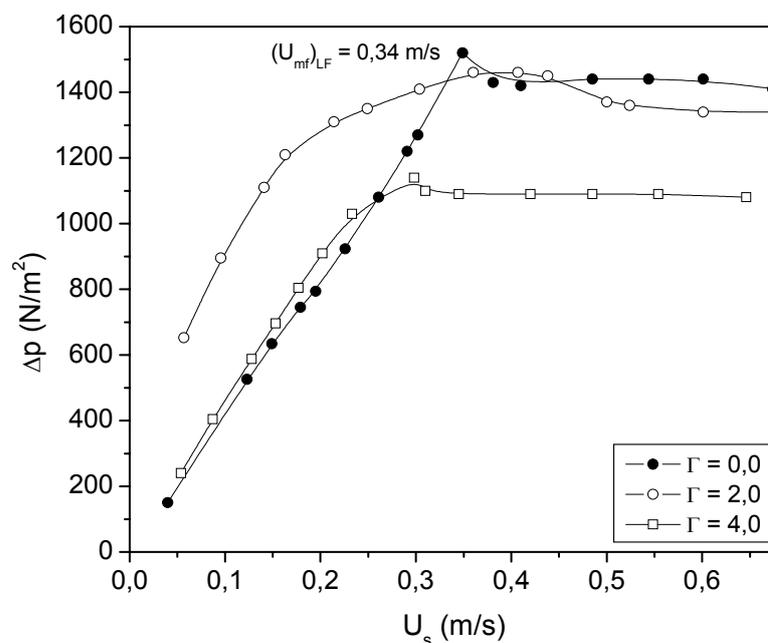


Figura 2.19: Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, parametrizado em Γ ; esferas de vidro; $d_p = 3,53 \times 10^{-2}$ m; $H_0 = 0,095$ m; $\phi = 0,0216$; (adaptado de Malhotra *et al.*, 1984).

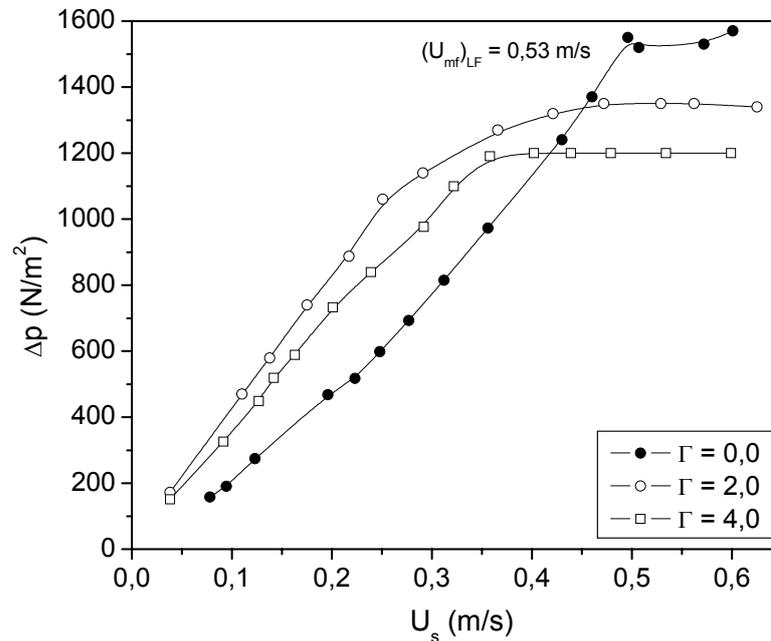


Figura 2.20: Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, parametrizado em Γ ; esferas de vidro; $d_p = 6,67 \times 10^{-2}$ m; $H_0 = 0,095$ m; $\phi = 0,0108$; (adaptado de Malhotra *et al.*, 1984).

Dando continuidade a este tipo de trabalho, Daleffe (2002) e Daleffe e Freire (2004) estudaram mais amplamente o comportamento fluidodinâmico do leito vibrofluidizado (e fluidizado) com partículas inertes recobertas com glicerol. O intervalo de parâmetros estudado já foi descrito anteriormente na Tabela 2.1. Daleffe e Freire (2004) apresentam nas Figuras 2.21 e 2.22 uma comparação entre os dados de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar obtidos por eles e por Malhotra *et al.* (1984). Embora os parâmetros utilizados nestes dois estudos não sejam os mesmos, eles estão na mesma faixa de grandeza e a comparação mostrou um comportamento consistente nos resultados.

Por meio da Figura 2.21, os autores perceberam que, quando o sistema foi operado sob vibração em ambos os trabalhos, ocorreu a expansão do leito na região de leito fixo. Na transição para o regime fluidizado apareceu um “pico” na

curva de queda de pressão, o qual foi causado provavelmente por uma ruptura brusca nas pontes líquidas formadas entre as partículas recobertas com o glicerol, aderidas umas às outras. Após a fluidização incipiente, a queda de pressão em ambos os casos permaneceu em patamares praticamente constantes, um comportamento típico do regime fluidizado. Ainda, a partir da Figura 2.21, Daleffe e Freire (2004) observaram uma grande diferença quantitativa entre seus resultados e os obtidos por Malhotra *et al.* (1984), devido provavelmente à diferença no diâmetro das partículas entre os dois trabalhos. Malhotra *et al.* (1984) usaram partículas do tipo B de Geldart e Daleffe e Freire (2004) do tipo D. Apesar das curvas obtidas para os dois trabalhos apresentarem um deslocamento entre si em cada configuração de leito, o comportamento qualitativo foi similar em ambos os casos. Comentário semelhante pode ser feito para os resultados apresentados na Figura 2.22.

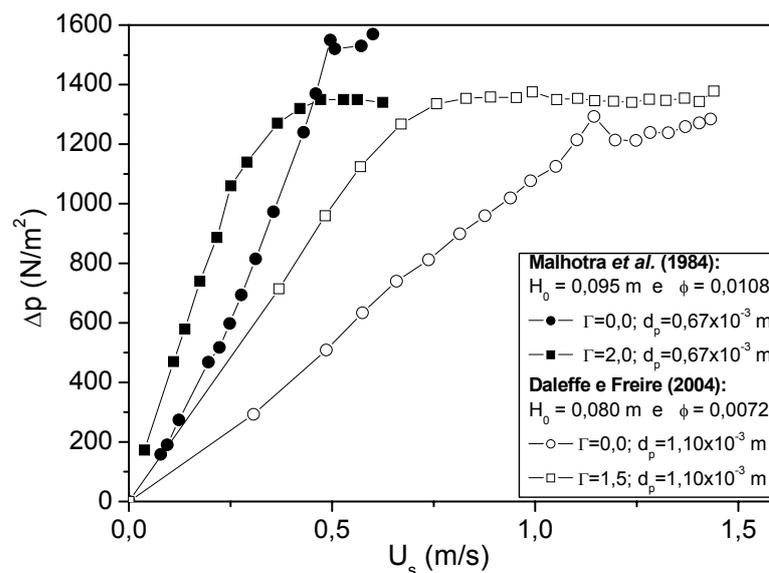


Figura 2.21: Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar; (adaptado de Daleffe e Freire, 2004).

A Figura 2.22 apresenta os dados obtidos por Malhotra *et al.* (1984) para partículas com diâmetro quase três vezes menor que o utilizado por Daleffe e Freire (2004). Novamente, as curvas obtidas para os dois tamanhos de partículas apresentaram um comportamento qualitativo semelhante, e o deslocamento nas curvas foi atribuído, provavelmente, às diferenças no tamanho destas partículas. Analisando os resultados apresentados nas Figuras 2.21 e 2.22, Daleffe e Freire (2004) perceberam que sob o efeito da vibração ocorreu uma suavização na região de transição entre os regimes fixo e fluidizado.

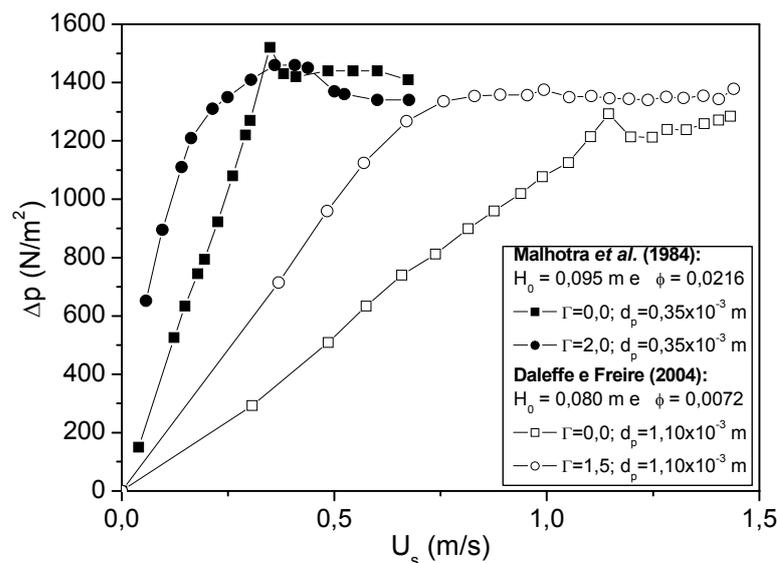


Figura 2.22: Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar; (adaptado de Daleffe e Freire, 2004).

Daleffe e Freire (2004) analisaram também o efeito da adição de diferentes quantidades específicas de líquido no comportamento fluidodinâmico do leito. A queda de pressão no leito e o desvio padrão da queda de pressão foram obtidos para o leito fluidizado (Figura 2.23) e vibrofluidizado (Figura 2.24) em diferentes graus de saturação de glicerol (ϕ). Verificaram por meio da Figura 2.23,

que o aumento do grau de saturação causou a redução na queda de pressão até ϕ igual a 0,0018. A partir deste valor, o comportamento da queda de pressão não foi significativamente influenciado por ϕ . O aumento do volume de glicerol no leito fez com que fosse aumentada também a aderência entre as partículas inertes, promovendo a aglomeração do leito. Neste caso, a formação de canais preferenciais favoreceu a percolação do ar, provocando a redução da queda de pressão no leito com o aumento da permeabilidade. Este efeito foi predominante até o ponto onde houve o rompimento do leito e iniciou-se a fluidização.

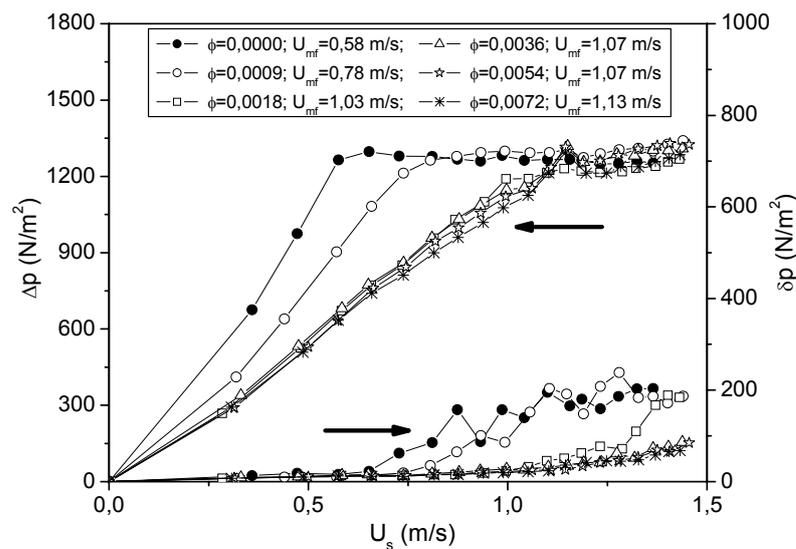


Figura 2.23: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função da velocidade superficial do ar, parametrizado em ϕ ; $\Gamma = 0,00$; $d_p = 1,10 \times 10^{-3}$ m; (adaptado de Daleffe e Freire, 2004).

Analisando o desvio padrão da queda de pressão (Figura 2.23), Daleffe e Freire (2004) verificaram que na região de leito fixo o desvio padrão praticamente não se alterou com ϕ e o aumento do volume de glicerol retardou o início da fluidização do leito, devido ao aumento do grau de aderência das partículas. Com o aumento do grau de saturação de glicerol, verificaram que

houve um prolongamento na região de leito fixo, e nestas condições a fluidização se caracterizou pela movimentação irregular das partículas e formação de canais preferenciais à passagem de ar.

Na Figura 2.24, sob o efeito da vibração, Daleffe e Freire (2004) verificaram que o comportamento das curvas de queda de pressão obtidas com glicerol foi muito semelhante ao caso apresentado na ausência de glicerol ($\phi = 0,0000$). Nestas condições, verificaram que a vibração dominou a dinâmica do leito mesmo para altos graus de saturação de líquido. A queda de pressão após U_{mf} apresentou uma leve tendência ao aumento com o aumento de ϕ . Os autores afirmam que as leves oscilações verificadas na queda de pressão após a U_{mf} podem ter sido causadas pelas flutuações na medida da queda de pressão no leito em função da vibração e da movimentação das partículas, refletidas também nos valores de desvio padrão. Comparando as Figuras 2.23 e 2.24, notaram que a vibração atenuou o efeito da adição de líquido sobre o desvio padrão da queda de pressão.

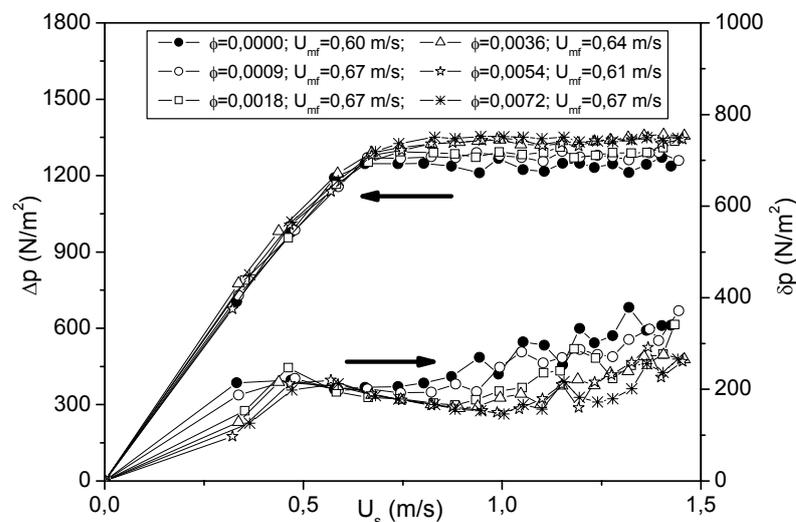


Figura 2.24: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função da velocidade superficial do ar, parametrizado em ϕ ; $\Gamma = 1,00$; $d_p = 1,10 \times 10^{-3}$ m; (adaptado de Daleffe e Freire, 2004).

Daleffe e Freire (2004) analisaram ainda a influência de Γ (por meio da frequência de vibração) e do tamanho das partículas inertes sobre a fluidodinâmica do leito na presença de glicerol. Alguns comentários a respeito da influência destes parâmetros foram apresentados para as Figuras 2.21, 2.22, 2.23 e 2.24. Apreciações mais detalhadas podem ser encontradas em Daleffe (2002) e Daleffe e Freire (2004).

2.4 Distribuição Granulométrica e Segregação

2.4.1 Leito Fluidizado

Em alguns processos industriais, como a secagem por exemplo, ocorre o processamento de material particulado com uma ampla faixa de distribuição granulométrica. Mesmo que o material apresente características uniformes inicialmente, durante o processamento pode ocorrer a variação do tamanho e do peso específico das partículas. Durante a secagem de pastas em leitos compostos de partículas inertes, também podem ocorrer aglomerações de duas ou mais partículas devido à formação de pontes líquidas e/ou sólidas, formando pequenos agrupamentos (*clusters*) e promovendo um aumento na distribuição de tamanho das partículas (Chen *et al.*, 1991).

Nos leitos fluidizados gás-sólido, a presença de misturas de partículas com diferentes densidades e/ou tamanhos tende a provocar a segregação vertical (Beeckmans *et al.*, 1985). A ocorrência da segregação pode ser intencional em alguns casos, como nos processos de separação de partículas. Na maioria dos processos industriais, entretanto, a segregação é indesejada, pois pode afetar a circulação das partículas e tornar a fluidização irregular (instável), reduzindo a

eficiência da transferência de calor e massa no processo. Deve-se considerar também, que o material particulado muitas vezes apresenta características adesivas, coesivas e pastosas, o que pode prejudicar ainda mais a fluidização neste tipo de leito. Wu e Baeyens (1998) comentam que um leito pode ser chamado de “bem fluidizado” quando todas as partículas estão completamente suportadas pelo gás, mas podem estar segregadas no sentido de que a composição local não corresponde com a da média global.

Rowe *et al.* (1972) introduziram um estudo quantitativo da segregação para misturas binárias de partículas em um leito fluidizado gás-sólido. Eles utilizaram misturas binárias de partículas com mesmos tamanhos e diferentes densidades e misturas binárias com diferentes tamanhos e mesmas densidades. Concluíram que a segregação aumentou na proporção de $\left(\frac{\rho_{He}}{\rho_{Li}}\right)^{2,5}$ e de $\left(\frac{(d_p)_{gr}}{(d_p)_{pe}}\right)^{0,2}$, sendo ρ_{Li} e ρ_{He} as densidades das partículas leves e das pesadas da mistura e $(d_p)_{gr}$ e $(d_p)_{pe}$ os diâmetros médios das partículas grandes e das pequenas da mistura, respectivamente. Os autores também propuseram mecanismos para segregação de partículas. Afirmaram que, para uma distribuição de partículas de mesma densidade em meio a um escoamento de gás, é provável que a segregação aconteça quando houver uma diferença significativa entre a força de arraste por unidade de massa entre diferentes partículas. Partículas tendo maiores valores de força de arraste por unidade de massa (partículas menores) tendem a migrar para superfície do leito enquanto as que possuem menores valores de força de arraste por unidade de massa

(partículas maiores) migram para o fundo do leito, junto à placa distribuidora (Rowe *et al.*, 1972; Cheung *et al.*, 1974 e Chiba *et al.*, 1980).

Gibilaro e Rowe (1974) propuseram um modelo analítico para predição de padrões de segregação em mistura de partículas binárias com diferentes densidades. Propuseram dois mecanismos de mistura para as partículas. No primeiro, a mistura é ocasionada pela elevação de bolhas que causam perturbações no leito. A elevação das bolhas no leito fluidizado promove um “escoamento” das partículas fazendo com que estas se misturem. A elevação das partículas pelas bolhas não é simétrica, devido a diferenças nos tamanhos das bolhas e instabilidades no leito. No segundo mecanismo, ocorre uma circulação (convectiva) misturando as partículas, induzida pelo arraste de algumas partículas para o interior da bolha. Quando estas bolhas alcançam a parte superior do leito, “explodem” e arremessam as partículas sobre a superfície do leito.

Outros mecanismos envolvendo a influência da densidade, da forma e do tamanho das partículas na mistura e a segregação durante a fluidização de sólidos polidispersos, foram detalhados também por Cheung *et al.* (1974), Nienow *et al.* (1978a), Nienow *et al.* (1978b), Nienow e Cheeseman (1980), Naimer *et al.* (1982), Fan *et al.* (1990), Barghi (1997) e Formisani *et al.* (2001).

Dentre os inúmeros trabalhos presentes na literatura que estudaram a mistura e a segregação de partículas em leitos fluidizados gás-sólido, destacam-se os que dão ênfase a mínima velocidade superficial de gás necessária para fluidizar uma mistura de sólidos com diferentes tamanhos (Goossens *et al.*, 1971; Cheung *et al.*, 1974; Chiba *et al.*, 1979; Thonglimp *et al.*, 1984; Noda *et al.*, 1986; Formisani, 1991 e Gauthier *et al.*, 1999). Mesmo assim, não existe ainda um consenso sobre

qual deve ser o melhor critério para identificar a velocidade mínima de fluidização de uma mistura de sólidos com diferentes tamanhos (Gauthier *et al.*, 1999).

Algumas das formas de relacionar a velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) para uma mistura binária de partículas de diferentes tamanhos e/ou densidades, com as propriedades de cada um dos componentes sólidos da mistura, são geralmente propostas com base nas equações originalmente desenvolvidas para predição da U_{mf} de um sólido monodisperso (tamanho uniforme). Um exemplo é a equação proposta por Wen e Yu (1966) já descrita anteriormente na Equação 7, como segue:

$$(\text{Re}_p)_{mf} = \sqrt{(33,7)^2 + 0,0408Ar} - 33,7, \text{ e} \quad (7)$$

com a U_{mf} dada pela equação 6, como segue:

$$U_{mf} = \frac{(\text{Re}_p)_{mf} \mu}{\rho_p d_p} \quad (6)$$

Esta equação é freqüentemente utilizada como ponto de partida para determinar U_{mf} de uma distribuição de sólidos, pois é bastante simplificada e não necessita da determinação da esfericidade da partícula e da porosidade do leito na condição de mínima fluidização (Formisani, 1991).

Em um leito fluidizado, Goossens *et al.* (1971) aplicaram a Equação 6 adaptada para misturas de partículas binárias, na qual a velocidade mínima de fluidização para mistura $(U_{mf})_m$ foi determinada para velocidades de ar decrescentes. Com este propósito, assumiram que a “densidade média da mistura” de partículas $(\rho_p)_m$ e o “diâmetro médio da mistura” de partículas $(d_p)_m$, fossem determinados por:

$$\frac{1}{(\rho_p)_m} = \frac{X_{pe}}{(\rho_p)_{pe}} + \frac{X_{gr}}{(\rho_p)_{gr}} \quad (23)$$

$$\frac{1}{(d_p)_m} = \frac{X_{pe}}{(d_p)_{pe}} + \frac{X_{gr}}{(d_p)_{gr}} \quad (24)$$

sendo X , ρ_p e d_p a fração mássica, a densidade e o diâmetro das partículas, respectivamente. O sub-índice “m” significa mistura, “pe” significa partículas pequenas e “gr” partículas grandes (Noda *et al.*, 1986).

Substituindo-se ρ e d_p da Equação 6 por $(\rho_p)_m$ e $(d_p)_m$ definidos nas Equações 23 e 24, Goossens *et al.* (1971) obtiveram a seguinte equação para determinação da $(U_{mf})_m$:

$$(U_{mf})_m = \frac{(\text{Re}_p)_{mf} \mu}{(\rho_p)_m (d_p)_m}, \quad (25)$$

com $(\text{Re}_p)_{mf}$ dado pela equação 7.

Posteriormente, Cheung *et al.* (1974) apresentaram uma correlação para a velocidade mínima de fluidização de uma mistura de partículas $(U_{mf})_m$ em um leito fluidizado. Dados próprios e de outros autores foram correlacionados, ambos obtidos com misturas binárias de partículas de mesmas densidades. A correlação proposta para prever a $(U_{mf})_m$, levou em consideração as características básicas para cada um dos diâmetros da partícula (uniformes), como segue:

$$(U_{mf})_m = (U_{mf})_{pe} \left(\frac{(U_{mf})_{gr}}{(U_{mf})_{pe}} \right)^{(X_{gr})^2}, \quad (26)$$

sendo $(U_{mf})_{gr}$ a velocidade mínima de fluidização para as partículas grandes da mistura e $(U_{mf})_{pe}$ para as partículas pequenas da mistura e X_{gr} a fração mássica das

partículas grandes na mistura. Foram realizados ensaios para 16 misturas binárias e usadas como partículas o vidro em pó, esferas de bronze, açúcar peletizado e esferas de vidro tipo “ballotini”. O diâmetro das partículas variou entre $0,096 \times 10^{-3}$ e $1,305 \times 10^{-3}$ m e a relação $(d_p)_{pe}/(d_p)_{gr}$ entre 0,15 e 0,85. Para estas condições experimentais, verificaram um desvio padrão máximo de 7% entre os dados experimentais e os preditos por meio da Equação 26.

Uma série de correlações e definições para velocidade mínima de fluidização de misturas de partículas com diferentes densidades e/ou tamanhos, obtidas por diversos pesquisadores podem ser encontradas nos trabalhos de Thonglimp *et al.* (1984), Formisani (1991), Wu e Baeyens (1998) e Lin *et al.* (2002).

Gauthier *et al.* (1999) estudaram a influência da distribuição granulométrica sobre o regime de fluidização em leito fluidizado. Eles utilizaram como partículas inertes areia de rio, classificadas nos grupos B e D de Geldart e em cinco diâmetros médios de Sauter ($d_s = 0,282 \times 10^{-3}$, $0,450 \times 10^{-3}$, $0,900 \times 10^{-3}$, $1,425 \times 10^{-3}$ e $1,800 \times 10^{-3}$ m). As distribuições estudadas para cada d_s , foram as seguintes:

- **de referência** - foi obtida a partir de duas peneiras sucessivas em uma faixa muito estreita; a média da abertura entre as duas peneiras determinou seu diâmetro médio;
- **mistura do tipo binária** - foi composta da mistura de dois diâmetros médios de partículas, cada um com cerca de 50% em massa;
- **mistura do tipo Gaussiana** - foi preparada a partir da mistura de cinco diâmetros médios de partículas, sendo que a representação da fração

mássica (X) em função do diâmetro médio da partícula (d_p) seguiu um perfil gaussiano (na forma de um sino); a fração máxima ficou centrada próximo ao diâmetro médio de referência, representando cerca de 1/3 da massa total de partículas e nos extremos, cerca de 10% da massa total, e

- **mistura do tipo plana** - foi obtida da mistura de seis diâmetros médios de partículas em proporções quase iguais, seguindo um perfil plano levemente crescente da fração mássica (X) como função do diâmetro médio da partícula (d_p).

Em cada caso, as misturas tiveram o mesmo volume de superfície ou diâmetro médio de Sauter (d_s) como referência, definido como:

$$d_s = \frac{1}{\sum_i X_i/d_{pi}}, \quad (27)$$

sendo X_i a fração mássica das partículas tendo d_{pi} como diâmetro médio. O d_p para cada caso foi obtido pelo método tradicional de peneiramento, em duas peneiras sucessivas numa faixa muito estreita, das quais calcularam o diâmetro médio.

Gauthier *et al.* (1999) apresentam também a forma típica de uma curva de queda de pressão no leito em função da velocidade de gás, para partículas de tamanho uniforme e uma mistura binária de partículas (Figura 2.25). Para uma partícula de referência com tamanho uniforme, a velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) corresponde à intersecção de duas retas na curva de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar; uma tangente à curva de leito fixo e a outra tangente à curva de leito fluidizado, tal qual havia sido definido anteriormente.

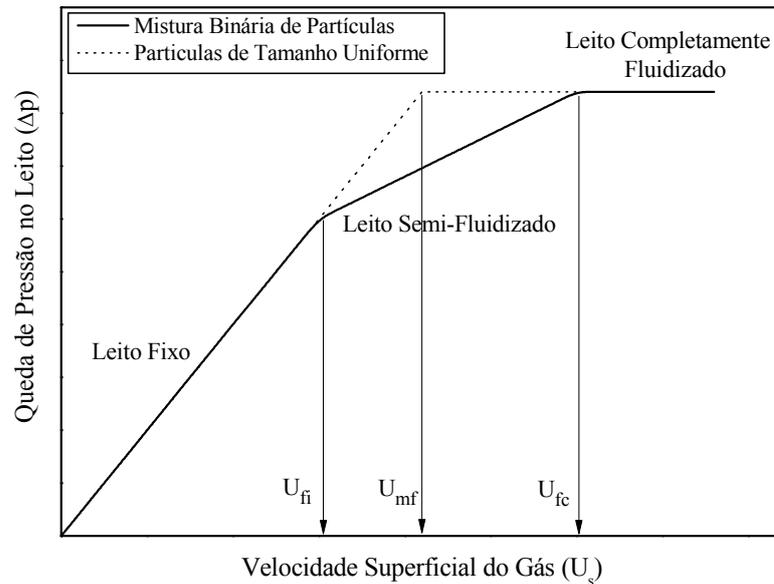


Figura 2.25: Representação de uma curva de queda de pressão total no leito em função da velocidade de um gás, para uma mistura binária de partículas e para partículas de tamanho uniforme (adaptado de Gauthier *et al.*, 1999).

Para uma mistura de partículas (Figura 2.25), o limite entre o estado fixo e o fluidizado não costuma ser definido por meio de um único ponto, mas sim por uma região estendida delimitada normalmente por dois pontos distintos: o primeiro definido como velocidade de fluidização incipiente (U_{fi}), correspondendo ao primeiro ponto de ruptura em Δp como função de U_s , quando as primeiras partículas iniciam a fluidização; o segundo definido como velocidade de completa fluidização (U_{fc}), quando todas as partículas estão completamente fluidizadas (Chen e Keairns, 1975; Delebarre *et al.*, 1994; Tannous *et al.*, 1998 e Gauthier *et al.*, 1999). Gauthier *et al.* (1999) designam o domínio de velocidades entre U_{fi} e U_{fc} como “domínio de transição” e acrescentam que a extensão deste domínio é dependente do tipo de distribuição de partículas empregada. Noda *et al.* (1986), Formisani (1991) e Formisani *et al.* (2001) adotaram uma nomenclatura diferente. No lugar da velocidade de

fluidização incipiente (U_{fi}) eles definiram a velocidade mínima de mistura segregada, já que neste ponto inicia-se a fluidização apenas das partículas menores e/ou menos densas; no lugar de velocidade de fluidização completa (U_{fc}) definiram a velocidade mínima de mistura completa, pois a partir deste ponto toda a mistura de partículas é mantida suspensa pelo gás, apesar de não necessariamente estarem completamente misturadas.

Gauthier *et al.* (1999) apresentaram algumas conclusões para uma coluna fluidizada com diâmetro interno de 0,14 m e altura de 1,10 m. Os autores repararam que as distribuições Gaussianas fluidizaram quase exatamente nas mesmas velocidades que as partículas de referência, mostrando neste caso que, a influência de uma mistura de partículas com grandes diferenças de tamanhos só que em pequenas proporções, foi insignificante. Assim, a velocidade mínima de fluidização para a distribuição Gaussiana poderia ser estimada por meio de uma boa correlação proposta para partículas de tamanho uniforme. Ao contrário, a mistura plana e a binária apresentaram comportamentos fluidodinâmicos muito distintos dos das partículas de referência, embora tenham sido similares um para com o outro.

Gauthier *et al.* (1999) notaram que a transição entre o regime fixo e fluidizado foi bastante dependente da distribuição de partículas utilizada. A mistura Gaussiana praticamente não segregou e o seu comportamento foi semelhante ao das partículas de referência (uniformes). As misturas binária e plana segregaram em todos os casos, e isto provavelmente ocorreu por serem misturas com grandes diferenças de tamanhos entre as partículas, as quais também estão presentes em proporções semelhantes.

2.4.2 Leito Vibrofluidizado e Vibrado

O leito vibrofluidizado é considerado um dos equipamentos mais indicados para secagem de material particulado com características adesivas, coesivas e pastosas. Neste equipamento, a vibração pode facilitar a fluidização tanto pela energia fornecida para impulsionar verticalmente as partículas a se moverem quanto pela redução da formação de aglomerados no leito, devido à quebra das pontes líquidas e/ou sólidas quando na presença de pastas. Na literatura existem muitos trabalhos que analisaram o comportamento fluidodinâmico dos leitos vibrofluidizados gás-sólido com partículas inertes de tamanho uniforme. São raros os trabalhos que se dedicaram a estudar o efeito de uma distribuição de partículas sobre a fluidodinâmica de leitos vibrofluidizados gás-sólido, principalmente analisando o fenômeno da segregação. Pan *et al.* (1995), Jinescu *et al.* (2000), Wank *et al.* (2001) e Moris *et al.* (2002) estudaram o comportamento de um leito vibrofluidizado utilizando de alguma forma material particulado polidisperso. Porém, nenhum destes trabalhos tinha como objetivo avaliar a ocorrência de segregação granulométrica, além do que, em alguns dos trabalhos não foi estabelecido um mesmo diâmetro médio entre as distribuições para que se tivesse uma referência de comparação (tal como o diâmetro médio de Sauter).

Misturas de materiais particulados com diferentes propriedades, freqüentemente segregam quando submetidos à agitação ou à uma vibração. Um exemplo bastante conhecido deste comportamento é o chamado “Efeito Castanha do Pará” ou “*Brazil Nut Effect*” (Rosato *et al.*, 1987). Quando partículas de diferentes tamanhos são submetidas a uma vibração vertical em um leito vibrado (sem escoamento de ar), pode ocorrer a migração das partículas

maiores da parte inferior da mistura para a superfície do leito (Bridgwater, 1976 e Williams, 1976). Este efeito tem intrigado muitos pesquisadores desde o início do século passado e mesmo com o grande número de estudos neste sentido, a base fenomenológica para o entendimento do mecanismo desta segregação ainda permanece indefinida (Rosato *et al.*, 1987).

Dentre as diferentes linhas de pesquisa sobre os possíveis mecanismos envolvidos neste tipo de segregação, as mais estudadas são a do “Efeito de Percolação” e a da “Convecção Granular”. A primeira considera que, em uma mistura de partículas com diferentes tamanhos submetida a uma vibração, ocorra uma reorganização geométrica, aonde as partículas menores vão preenchendo os espaços vazios logo abaixo das maiores, empurrando as maiores para a superfície. A força da gravidade faz com que todas as partículas migrem para o fundo do leito, mas só as pequenas conseguem preencher estes espaços vazios gerados pelas maiores, fazendo com que estas permaneçam na superfície (Williams, 1976; Rosato *et al.*, 1987; Jullien *et al.*, 1992). Já a segunda, considera que quando a mistura é vibrada, as partículas se movem em um escoamento convectivo induzido pela vibração; partículas individuais se movem para cima pelo meio da mistura, até a superfície, e descendem pelas laterais. Se uma partícula grande se mover até a superfície, esta não consegue manter o ciclo convectivo, já que as correntes de escoamento são muito estreitas ao longo da parede para movê-las para baixo. (Knight *et al.*, 1993; Shinbrot e Muzzio, 1998). Existem outros mecanismos em estudo, como o da condensação, da difusão granular, da reorganização controlada, da entropia (na ausência de gravidade) e a inercial (Hong *et al.*, 2001). Além da influência do tamanho das

partículas, outros fatores também podem influenciar os mecanismos que levam a segregação em leitos vibrados, dentre estes a densidade, a forma, as propriedades e o ângulo de repouso dos sólidos, o gradiente de temperatura granular, características físicas do equipamento, parâmetros vibracionais e cargas eletrostáticas (Akiyama e Nishiyama 1994; Huerta e Suárez, 2004).

Para os leitos vibrados, existem linhas de pesquisa bem desenvolvidas analisando o efeito da vibração sobre a segregação de materiais polidispersos. Mesmo assim, os trabalhos existentes são pouco esclarecedores e deixam muitas dúvidas sobre como ocorre de fato a segregação granulométrica neste tipo de leito. Isso se deve em parte, à complexidade dos fenômenos envolvidos e ao grande número de variáveis presentes, além do que, alguns destes estudos apresentam resultados contraditórios e que muitas vezes são até questionados ou criticados por estudos subsequentes (Barker *et al.*, 1993; Jullien *et al.*, 1993 e Jullien *et al.*, 1995). Deve-se ressaltar também que a maior parte destes estudos adota o adimensional de vibração como um parâmetro universal, fazendo pouca distinção do efeito da amplitude e da frequência na dinâmica do leito.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Partículas

As partículas usadas neste trabalho foram esferas de vidro tipo “ballotini”, esferóides de polipropileno e cilindros elípticos de poliestireno. O vidro foi escolhido por ser um material inerte e atóxico amplamente utilizado na literatura e em trabalhos no Centro de Secagem do DEQ/UFSCar, facilitando comparações com outros trabalhos. A esfericidade da partícula de vidro é muito próxima a 1. A densidade foi determinada por picnometria a água, em um picnômetro da marca Vidrolex de 50 ml calibrado e uma balança analítica GEHAKA modelo BG400, com precisão de 5×10^{-6} kg. A densidade média obtida para a partícula de vidro foi de 2.500 kg/m^3 .

O polipropileno e o poliestireno foram escolhidos por serem inertes, atóxicos, de baixo custo e mais leves que o vidro, além de não “lascarem” evitando o desprendimento de resíduos. O poliestireno é um cristal claro, que acumula eletricidade estática, funde a $160 \text{ }^\circ\text{C}$ e possui densidade de 1.050 kg/m^3 (Narimatsu, 2000). As partículas de poliestireno utilizadas foram escolhidas também por apresentarem um formato diferente do esférico, neste caso um cilindro elíptico com esfericidade igual a 0,82 (com os semi-eixos $a = 1,00 \times 10^{-3} \text{ m}$ e $b = 0,75 \times 10^{-3} \text{ m}$, altura de $3,50 \times 10^{-3} \text{ m}$ e volume de $8,25 \times 10^{-9} \text{ m}^3$) e diâmetro volumétrico equivalente (d_e) igual a $2,51 \times 10^{-3} \text{ m}$. Já o polipropileno é um material inodoro, flexível e acumula eletricidade estática. Possui ponto de fusão igual a $150 \text{ }^\circ\text{C}$, densidade igual a 935 kg/m^3 e esfericidade igual a 0,93

(Narimatsu, 2000). O diâmetro médio das partículas foi obtido por peneiramento, com a média obtida a partir da abertura de duas peneiras sucessivas em uma faixa muito estreita.

Maiores detalhes sobre as partículas utilizadas, diâmetro médio, diâmetro médio de Sauter (para misturas de partículas), altura de leito estático e massa de inertes serão apresentados na Metodologia Experimental.

3.1.2 Glicerol

O líquido utilizado para simular a presença de uma “pasta” foi o glicerol (com pureza mínima de 99,5%). O glicerol é uma substância orgânica, líquida, incolor ou ligeiramente amarelada, viscosa, adocicada e um triálcool com fórmula química $C_3H_8O_3$. Também é conhecida como glicerina e 1, 2, 3 – Propanotriol, possuindo massa molecular de 0,09209 kg/mol, ponto de fusão de 17,9°C e de ebulição de 290°C, ambos a pressão atmosférica. É muito solúvel em água e álcool e tem densidade igual a 1258 kg/m³ a 25°C (Perry e Green, 2000). Outras propriedades físicas do glicerol podem ser encontradas nas Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3.

O glicerol tem variada aplicação em farmacologia, sendo utilizado também para conservar a umidade de certas substâncias (umectante), para extração de essências diversas, para formar lubrificantes e líquidos incongeláveis, para indústria de conservas e de explosivos, e é empregado ainda em medicina (Argentiére, 1996). O termo pasta aparece entre aspas porque o glicerol não pode ser considerado como tal segundo a definição dada no Capítulo 2, portanto será tratado neste trabalho de agora em diante, apenas como um líquido.

Tabela 3.1: Viscosidade do glicerol (Schneider e Bridgwater, 1993).

Temperatura [°C]	20	30	40	50	60	70	80	100
Viscosidade [mPa.s]	1400	600	300	180	100	60	35	15

Tabela 3.2: Densidade do glicerol (Windholz, 1996).

Temperatura [°C]	15	20	25
Densidade [kg/m ³]	1264,4	1261,3	1258,3

Tabela 3.3: Pressão de vapor do glicerol (Lide, 1998 e Perry e Green, 2000).

Temperatura [°C]	96,0	125,5	153,8	167,2	198,0	220,1	240,0	263,0	290,0
Pressão de vapor [mmHg]	0,0075	1	5	10	40	100	200	400	760

3.2 Equipamentos

A Figura 3.1 apresenta uma visão geral do leito vibrofluidizado utilizado nos experimentos. O ar é fornecido ao sistema por meio de um soprador da marca IBRAM de 7,5 cv (1), o qual passa por uma válvula “by-pass” que auxilia no ajuste da vazão de ar. A vazão é obtida por meio da queda de pressão monitorada por uma placa de orifício (4) previamente calibrada, utilizando um Venturi como padrão ($Q = 0,09587\sqrt{\Delta h}$, com Q em m³/min e Δh em cm de água). A placa de orifício está conectada a um manômetro de coluna em U com água (5) e a um transdutor de pressão (6) (Auto Tran Incorp. 0 a 5 psi). Mediu-se a perda de carga no pleno do leito (12) logo abaixo da placa distribuidora de ar, com um manômetro de coluna em U com água e um transdutor de pressão (Auto Tran Incorp. 0 a 1 psi). Os manômetros serviram apenas para calibrar o sistema de

aquisição de dados e monitorar a queda de pressão na linha. Também foi obtida uma equação que representasse a queda de pressão provocada pela placa distribuidora (localizada entre o pleno e o leito). Esta equação foi utilizada para descontar a contribuição da queda de pressão da placa distribuidora, da queda de pressão provocada pelo conteúdo do leito.

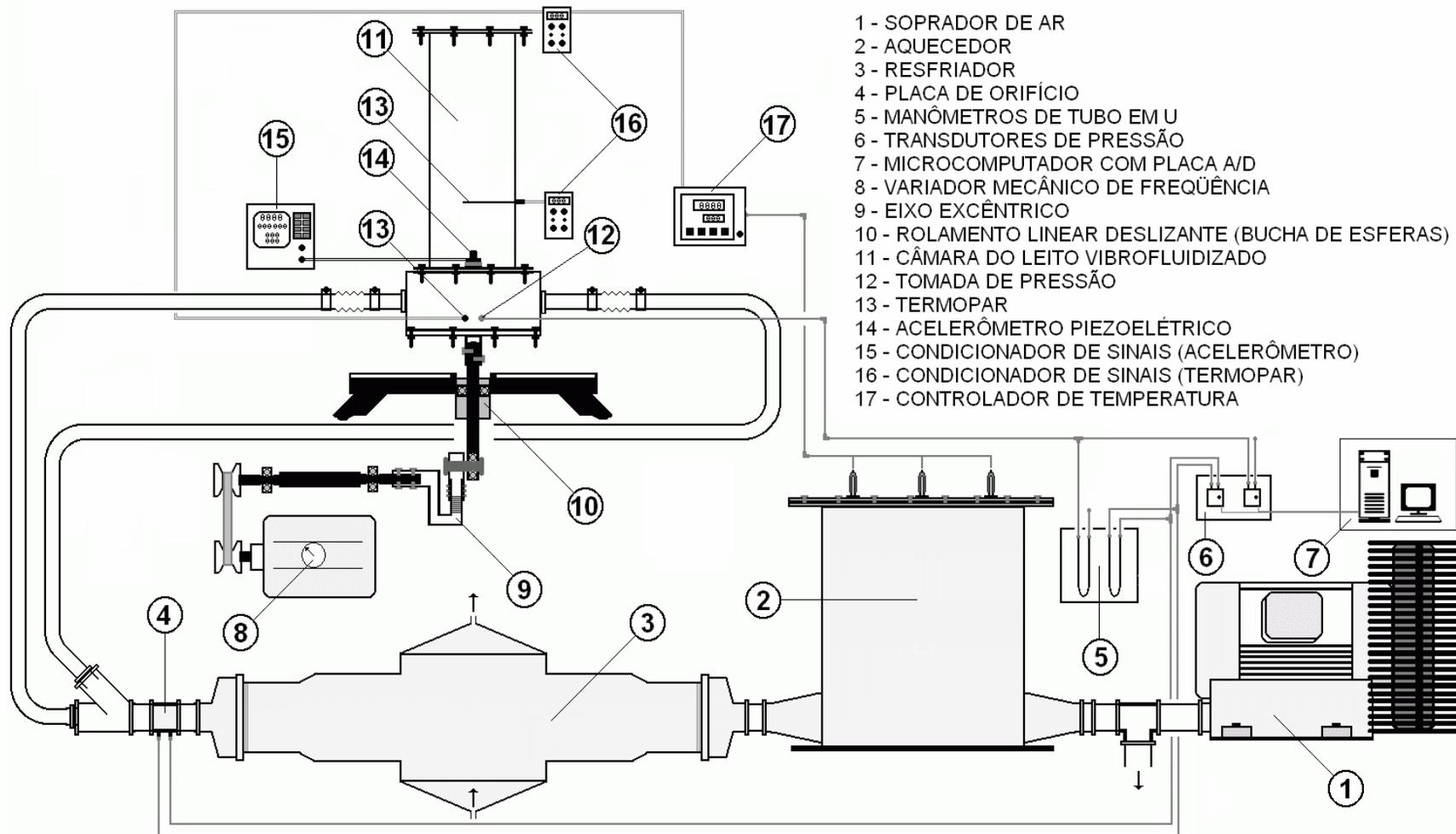


Figura 3.1: Esquema geral do secador de leito vibrofluidizado.

A temperatura do ar injetado no sistema é mantida constante por meio de um aquecedor a resistências elétricas (2) (totalizando 3900 watts), ligadas a um controlador de temperatura Flyever FE50RP (17). Para auxiliar na manutenção da temperatura principalmente em dias muito quentes, necessitou-se de um resfriador a água (3), o qual amenizou o aquecimento natural do ar provocado pelo soprador e pelo atrito do ar na tubulação. O ar atmosférico é injetado em contracorrente por meio de duas entradas no pleno do leito com o objetivo de homogeneizá-lo, logo abaixo da placa distribuidora de ar. Este distribuidor consiste de uma placa de 2×10^{-3} m de espessura com furos de $0,8 \times 10^{-3}$ m de diâmetro, resultando numa área livre de aproximadamente 50%.

O leito vibrofluidizado utilizado é composto por uma câmara de vidro (11) com seção circular, facilitando a visualização dos eventos, com 0,114 m de diâmetro e 0,500 m de altura. Na saída do leito adaptou-se uma tela para evitar a elutriação das partículas, principalmente quando a fluidização no leito se tornava irregular. Para monitorar a temperatura, foram inseridos dois termopares tipo J (13) com bainha de 0,005 m, um no corpo do leito e o outro no pleno, calibrados em um bloco calibrador de termopar (DB-35L) com resolução de 0,1 °C e precisão de 0,5 °C.

As vibrações foram impostas na câmara do leito por meio de uma haste ligada a um mecanismo excêntrico (9), que converte o movimento rotacional produzido por um motor WEG de 0,5 HP para movimento senoidal vertical no leito. Este motor possui um variador de velocidade Ringcogne modelo RXM-750 (8) possibilitando obter a frequência necessária, monitorada por um tacômetro óptico Minipa MDT-2244A.

A amplitude de vibração era ajustada manualmente no próprio mecanismo excêntrico. A aceleração, a velocidade e o deslocamento com o qual o sistema reage à vibração imposta foram monitorados por um acelerômetro piezelétrico Brüel & Kjør modelo 4371 (14) (previamente calibrado). Este envia o sinal para um amplificador de sinais Brüel & Kjør modelo 2525 (15), previamente ajustado ao acelerômetro, informando os valores na escala de amplitude em RMS ou de 0 a pico, diretamente. Para uma boa operacionalidade do equipamento, o sistema vibracional foi colocado em uma base independente da mesa que detém a célula de medida, evitando que as vibrações provocadas pelo motor influenciassem o leito. A Figura 3.2 apresenta uma fotografia do equipamento esquematizado na Figura 3.1. A Figura 3.3 (a) mostra em detalhe a câmara do leito, a Figura 3.3 (b) os computadores utilizados na aquisição de dados e a Figura 3.3 (c) o soprador de ar e o aquecedor elétrico, estes localizados na casa de sopradores externa ao laboratório.



Figura 3.2: Fotografia do leito vibrofluidizado esquematizado na Figura 3.1.

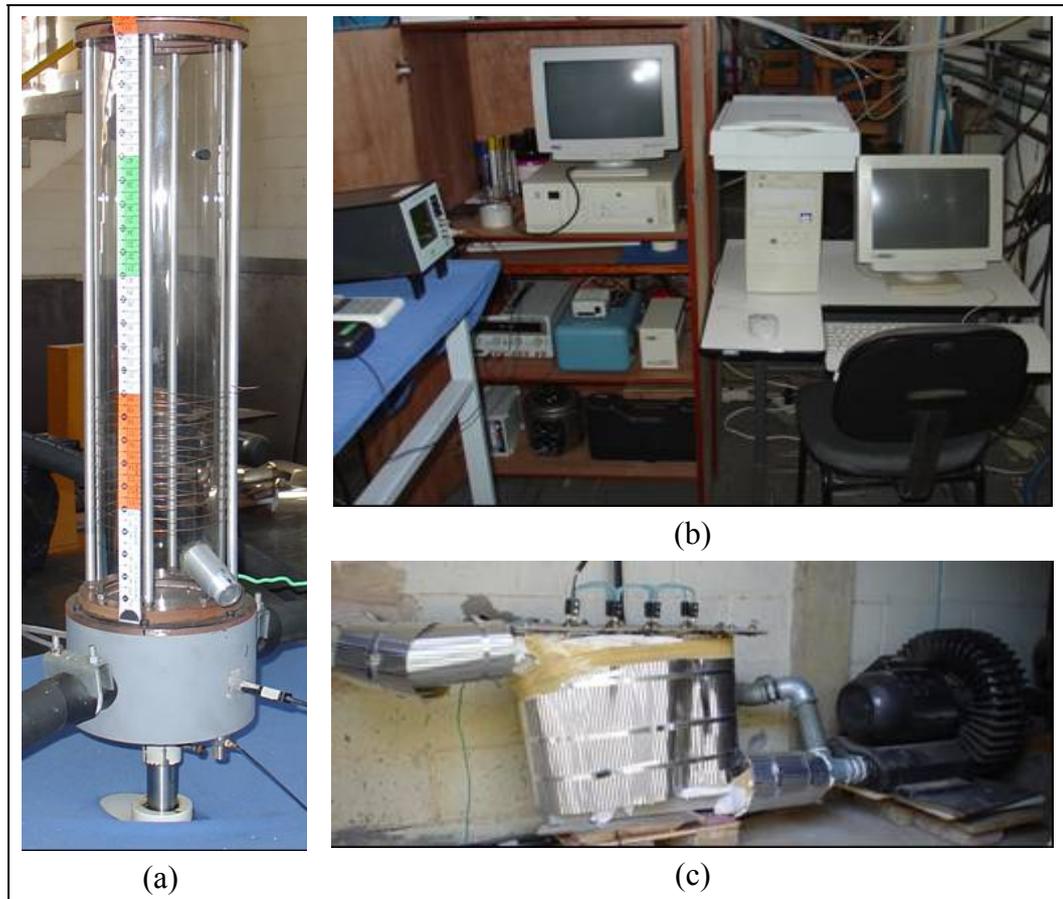


Figura 3.3: Detalhes fotográficos do equipamento mostrado na Figura 3.2: (a) câmara do leito; (b) computadores utilizados na aquisição de dados; (c) soprador de ar e aquecedor elétrico.

Tanto a placa de orifício (4) quanto a tomada de pressão (12) feita na base do leito (Figura 3.1) foram conectados a transdutores de pressão, ligados a uma placa analógico-digital (A/D) para aquisição de dados. Nos testes fluidodinâmicos preliminares utilizou-se uma placa (padrão ISA) da Lynx Tecnologia Ltda., instalada em um microcomputador PC 486 DX. Para possibilitar rapidez, agilidade e precisão na coleta de dados, adquiriu-se uma placa de aquisição A/D PCI-6024E da *National Instruments*, a qual foi instalada em um microcomputador AMD *Athlon™* XP 1800⁺. Para aquisição dos dados de queda de pressão e vazão, desenvolveu-se um *software* em “linguagem G” (Gráfica) utilizando o *Labview 7 Express™*. Para o desenvolvimento deste *software*, foi necessário treinamento em aquisição de dados usando o *Labview*,

oferecido pela DEM/USP. Na Figura 3.4 é apresentado o “painel frontal” do *software* desenvolvido, que é a interface entre o usuário e o sistema de aquisição.

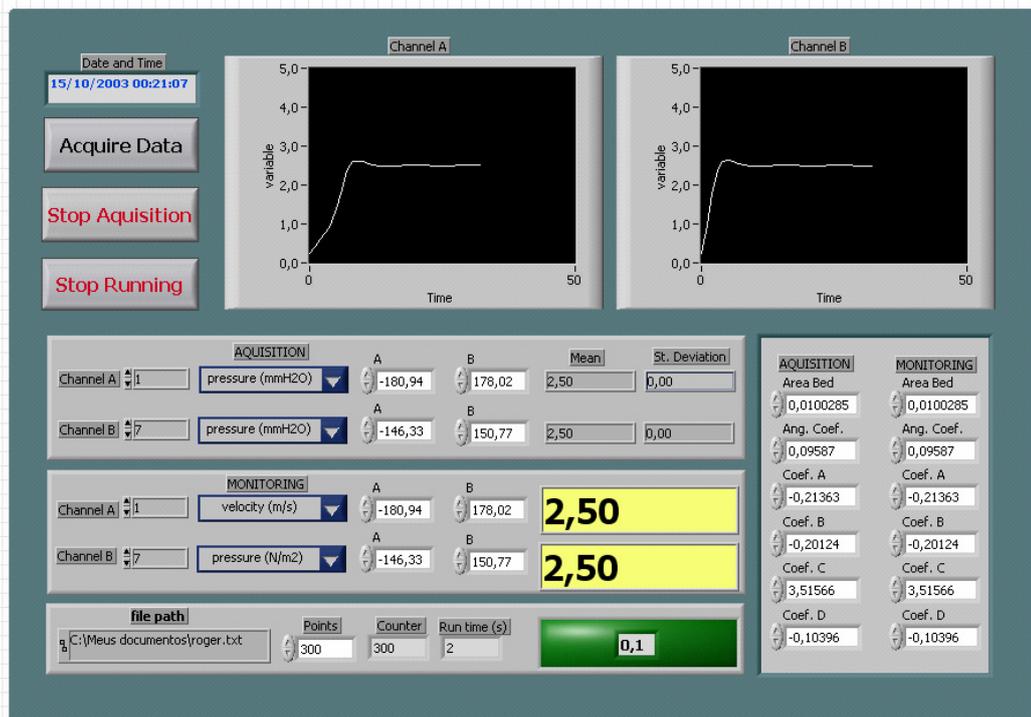


Figura 3.4: “Painel Frontal” do *software* desenvolvido em Labview.

Na Figura 3.5 é apresentado o “diagrama de blocos”, local onde são inseridos os comandos da programação, uma espécie de “algoritmo” gráfico. Desenvolveu-se este *software* para que o usuário pudesse a partir de uma tela inicial (painel frontal) executar os principais comandos da aquisição de sinais, como a inclusão de novos valores de calibração da placa de orifício e da placa distribuidora, escolha dos canais para aquisição, a escolha da quantidade de pontos, etc. Também é possível escolher o tipo de resultado a ser apresentado nos gráficos, nos *displays* e para armazenamento em arquivo, tais quais as tensões emitidas pelos transdutores (útil para calibração), queda de pressão em mmH₂O, queda de pressão em N/m² e de velocidade superficial do ar em m/s.

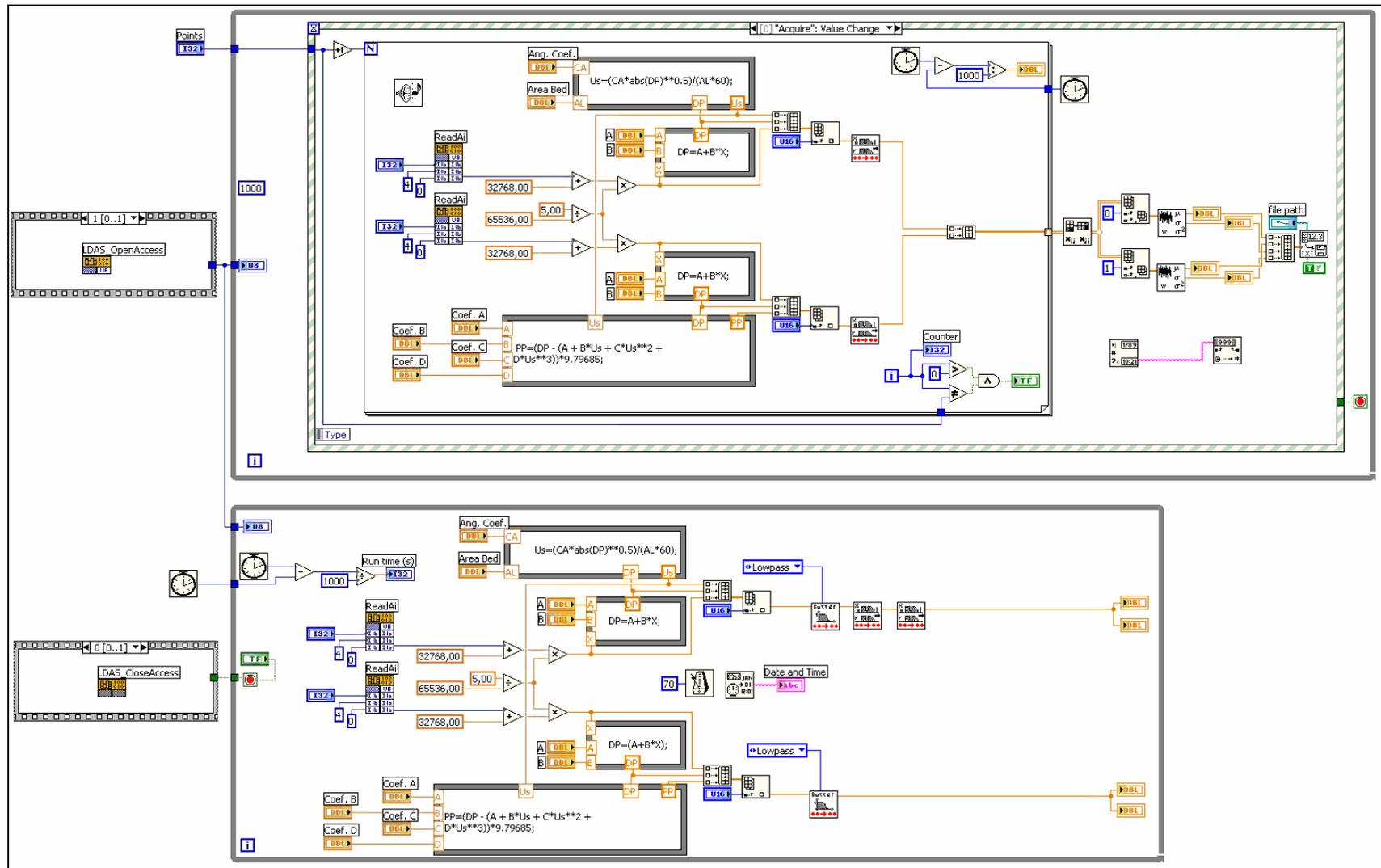


Figura 3.5: "Diagrama de blocos" do software desenvolvido em Labview.

Desta forma, foi possível coletar os dados e tratá-los com maior rapidez, eficiência e qualidade em comparação ao que era feito até então, agilizando e flexibilizando os experimentos realizados neste trabalho.

Para os experimentos de segregação, fez-se uma adaptação no leito para minimizar cargas eletrostáticas provocadas pelo atrito entre as partículas e entre estas e a parede do leito, principalmente nos dias em que a umidade do ar estava muito baixa. Para minimizar o aparecimento destas cargas, instalou-se circundando a câmara de vidro um fio de cobre aterrado, em helicóide com espaçamento aproximado de $1,0 \times 10^{-2}$ m entre cada volta (Figura 3.6). Outra técnica que poderia ser utilizada era o umedecimento prévio do ar, e que foi descartada neste trabalho devido principalmente a necessidade de aquisição de um umidificador, da sua instalação na corrente de ar e das dificuldades operacionais.



Figura 3.6: Fotografia do leito vibrofluidizado com o fio de cobre aterrado circundando o leito, minimizando as cargas eletrostáticas.

Para efetuar a coleta de partículas ao longo do plano vertical do leito, foram testadas duas formas básicas, uma por meio de sonda e a outra por sucção. Primeiro, por meio de uma sonda inserida pela parte superior do leito, tentou-se coletar as partículas em várias camadas ao longo do eixo vertical. Como o leito é estreito (0,114 m de diâmetro) e relativamente alto (0,500 m de altura), durante a coleta ocorria a mistura das partículas entre as camadas, e esta perturbação no leito tornou a técnica pouco confiável. Também não foi possível a colocação de sondas na parede lateral do leito já que o mesmo é de vidro e tem pouca área disponível, considerando as dimensões de cada sonda para uma medida representativa. De qualquer forma, uma sonda lateral não intrusiva poderia coletar apenas as partículas mais próximas à parede. Se fosse utilizada uma sonda com penetração e que coletasse uma amostra representativa, esta também poderia provocar perturbação no leito misturando as partículas, indesejável neste tipo de estudo.

Com estas dificuldades verificadas, optou-se por tentar retirar as partículas em cada camada no leito por sucção, como sugeriu San José *et al.* (1994) que confirmou a eficácia do método de coleta de partículas por sucção controlada, em comparação ao método da sonda.

Foram feitas algumas tentativas de sucção após algumas adaptações em um aspirador de pó Electrolux A10, até que se obtivesse uma condição estável de sucção. Para isto, reduziu-se o diâmetro da entrada do tubo de sucção (Figura 3.7) aumentando-se a perda de carga, reduzindo o poder de sucção e conseqüentemente minimizando a perturbação no leito. Necessitou-se ainda, instalar um filtro de flanela de baixa porosidade no interior do aspirador para aumentar a perda de carga e tornar a sucção mais suave.



Figura 3.7: Fotografia do tubo de sucção adaptado, fixado à mangueira de conexão que é ligada ao aspirador de partículas.

Para aquisição de imagens utilizou-se uma câmera digital Sony DSC-V1, com resolução efetiva de 5.0 mega pixels e lente profissional Carl Zeiss® Vario-Sonnar®, acoplada em um tripé para sustentação e com um sistema de iluminação adequado. Com estas imagens, pode-se determinar a porosidade média e registrar o comportamento do leito, complementando a análise dos resultados.

Com estas adaptações, estudou-se a influência da distribuição granulométrica de partículas inertes sobre o comportamento fluidodinâmico em leitos fluidizado, vibrado e vibrofluidizado e a ocorrência de segregação, para quatro distribuições de partículas, sem a presença de glicerol.

3.3 Metodologia Experimental

Realizaram-se testes estruturais em todo o sistema montado, apresentado na Figura 3.1. Estes testes envolveram a variação da amplitude e da frequência de vibração em diversos níveis. Por meio da combinação entre estas

variáveis, em alguns casos obteve-se adimensionais de vibração superiores a 15. Estes valores extremos de adimensional de vibração puderam ser obtidos apenas em condições favoráveis entre a amplitude e a frequência de vibração. Obteve-se boa estabilidade estrutural do leito para adimensional de vibração até 6, para qualquer combinação de amplitude e frequência de vibração. Para operar com boa estabilidade estrutural e evitar possíveis danos ao equipamento, neste trabalho não será utilizado adimensional de vibração superior a 6.

3.1.1 Fluidodinâmica

A principal forma de avaliação da influência da vibração sobre a estrutura de um leito fluidizado é a obtenção de sua curva característica, que fornece a informação da queda de pressão no leito em função da velocidade do ar que o percola. Para cada experimento, a curva característica foi obtida após o estabelecimento das condições operacionais (A , f , Γ , ϕ , d_p , H_0 , etc.), seguido pela expansão total do leito de partículas inertes. Depois de alcançado o regime, os valores de queda de pressão no leito foram obtidos simultaneamente com a velocidade de ar decrescente, metodologia já clássica reportada por Bratu e Jinescu (1971), por exemplo.

O sistema de aquisição de dados desenvolvido para coleta da queda de pressão no leito, também fornece os valores de desvio padrão da queda de pressão. Cada ponto de queda de pressão foi obtido por meio da média aritmética de 500 pontos coletados no intervalo de 3 segundos, evitando *aliasing**.

A padronização das medidas com a velocidade de ar decrescente foi

* O Teorema de Amostragem ou Teorema de Nyquist determina que um sinal deva ser coletado a uma taxa de amostragem pelo menos duas vezes superior a maior componente de frequência presente no sinal, garantido assim que o sinal seja representativo (evitando *aliasing*); na prática, recomenda-se a utilização de 2,5 a 5,0 vezes a máxima frequência presente no sinal.

escolhida, dentre vários fatores: facilidade de homogeneizar o líquido nas partículas; manter a temperatura constante; minimizar aglomerações no leito quando na presença de líquido; facilitar a comparação com diversos autores que escolheram o mesmo método; evitar danos às resistências elétricas pelo excesso de aquecimento provocado pela falta de ar até que se iniciassem os experimentos.

Para obtenção do comportamento fluidodinâmico na presença de glicerol no leito, seguiu-se o mesmo procedimento sem o líquido. Alcançado o regime permanente, adicionou-se o glicerol à mesma temperatura sobre as partículas no leito, aguardou-se de 3 a 5 minutos para assegurar que os inertes estivessem homogeneamente recobertos com o líquido e obteve-se a curva característica igualmente decrescendo a velocidade do ar no leito. Para algumas condições experimentais, foram feitas réplicas das curvas justamente para testar a reprodutibilidade dos dados obtidos, principalmente quando o glicerol era adicionado no leito e sob a influência da vibração.

Para a determinação da velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) para o leito fluidizado e vibrofluidizado, utilizou-se a metodologia clássica empregada em leitos fluidizados convencionais. Isto é, por meio da intersecção de duas retas na curva de queda de pressão no leito em função de U_s , uma tangente à curva de leito fixo e a outra tangente à curva de leito fluidizado. Apesar de Gupta e Mujumdar (1980a) afirmarem que esta técnica de medida pode não ser adequada para os leitos vibrofluidizados, até o momento não existe um consenso sobre qual é a melhor forma de determinar o ponto onde as partículas iniciam sua suspensão neste leito. Mesmo assim, a velocidade mínima de mistura definida por estes autores, além de ser subjetiva (Khalid e Mujumdar, 1982; Mujumdar, 1984 e

Garim e Freire, 1994) não é adotada de um modo universal, como se pode observar em trabalhos mais recentes (Camargo, 1998; Moris *et al.* 2002; Moris e Rocha, 2003b e Daleffe e Freire, 2004). Assim, para o leito vibrofluidizado será utilizada a velocidade mínima de fluidização efetiva, onde estão “computados” os efeitos dinâmicos do escoamento assim como os efeitos vibracionais.

3.1.2 Ensaio Fluidodinâmicos Preliminares

Os ensaios fluidodinâmicos preliminares foram realizados sem a presença de líquido, e o comportamento do leito foi analisado em função do adimensional de vibração (por meio da variação da frequência de vibração), do tipo, forma e diâmetro das partículas inertes, para uma única amplitude de vibração. Os valores dos parâmetros experimentais desta parte do trabalho estão expostos na Tabela 3.4.

As partículas usadas aqui foram esferas de vidro tipo “ballotini”, esferóides de polipropileno e cilindros elípticos de poliestireno. O diâmetro médio das partículas foi obtido por peneiramento, com a média obtida a partir da abertura de duas peneiras sucessivas em uma faixa muito estreita. O maior diâmetro de partícula escolhido para estes experimentos ($17,00 \times 10^{-3}$ m para o vidro), foi um caso limite onde a fluidização iniciava-se próximo à máxima velocidade de ar fornecida pelo soprador. Para todas as partículas, trabalhou-se com altura estática de inertes de $10,0 \times 10^{-2}$ m, escolhida justamente por apresentar boa estabilidade na fluidização, para as dimensões deste equipamento. Para todas as medidas utilizando partículas com $d_p = 17,00 \times 10^{-3}$ m, houve a necessidade de trocar o manômetro de coluna de água por um de mercúrio, para possibilitar a aferição da velocidade de ar, uma vez que esta excedia o limite do manômetro

anterior. Com a combinação destas variáveis, foram realizados 45 experimentos e as réplicas apenas para o maior tamanho de partícula (um caso limite).

Tabela 3.4: Valores dos parâmetros utilizados nos ensaios preliminares.

Parâmetro	Unidade	Incerteza na medida	Material	Valores
d_p	$[x10^{-3} \text{ m}]$	$\pm 0,005x10^{-3}$	vidro	1,10; 1,50; 2,19; 3,67; 4,38 e 17,00
m_p	[kg]	$\pm 0,0001$	vidro	1,775
d_p	$[x10^{-3} \text{ m}]$	$\pm 0,005x10^{-3}$	PP	2,60 e 3,67
m_p	[kg]	$\pm 0,0001$	PP	0,615
d_e^*	$[x10^{-3} \text{ m}]$	$\pm 0,005x10^{-3}$	PS	2,51 (a = 1,00; b = 0,75; h = 3,50)
m_p	[kg]	$\pm 0,0001$	PS	0,815
Γ	[-]	$\pm 0,005$	-	0,00; 1,00; 2,00; 4,00 e 6,00
H_0	$[x10^{-2} \text{ m}]$	$\pm 0,05x10^{-2}$	-	10,0
A	$[x10^{-2} \text{ m}]$	$\pm 0,05x10^{-2}$	-	1,0
f	[Hz]	$\pm 0,005$	-	0,00; 5,00; 7,10; 10,00 e 12,90
U_s	[m/s]	$\pm 5\%$	-	0,00 a 5,21

*diâmetro equivalente ao de uma esfera. **Legenda:** A - amplitude de vibração; d_e - diâmetro equivalente; d_p - diâmetro das partículas; f - frequência de vibração; H_0 - altura de leito estático; m_p - massa de partículas; PP - polipropileno; PS - poliestireno; U_s - velocidade superficial do ar e Γ - adimensional de vibração.

3.1.3 Análise Fluidodinâmica do Leito Fluidizado e Vibrofluidizado

Foram realizados novos testes fluidodinâmicos, visando analisar os efeitos da variação da amplitude, da frequência e do adimensional de vibração sobre a fluidodinâmica do leito, em diversos níveis. Com a realização destes testes, verificou-se a possibilidade de não universalidade do adimensional de vibração, isto é, detectou-se inconsistência para alguns comportamentos dinâmicos no leito, usando um mesmo adimensional de vibração obtido de diferentes combinações entre a frequência e a amplitude de vibração. Sendo assim, optou-se pela realização

de experimentos fluidodinâmicos mais abrangentes e na presença de glicerol. Por concisão, não serão apresentados os resultados para estes testes, uma vez que os experimentos fluidodinâmicos foram realizados com maior rigor e em uma ampla faixa de parâmetros. Nestes experimentos fluidodinâmicos foram analisadas as influências da amplitude, da frequência e do adimensional de vibração, do diâmetro das partículas inertes e do grau de saturação de líquido.

Os valores dos parâmetros experimentais utilizados estão apresentados na Tabela 3.5. As partículas inertes utilizadas nesta parte do trabalho foram as esferas de vidro tipo “ballotini”. Esta partícula foi escolhida por ser inerte e atóxica, sendo amplamente utilizada na literatura e em trabalhos no Centro de Secagem do DEQ/UFSCar, facilitando comparação futura dos resultados encontrados. Devido a grande quantidade de dados programados para as partículas de vidro, não foi possível realizar os experimentos fluidodinâmicos para as partículas de polipropileno e de poliestireno. Estes polímeros também acumulam muita carga eletrostática podendo influenciar no processo.

Por meio dos testes preliminares com as partículas inertes, escolheu-se por motivos práticos trabalhar com diâmetros médios de $1,10 \times 10^{-3}$, $2,19 \times 10^{-3}$ e $3,67 \times 10^{-3}$ m. Acima do maior diâmetro, a fluidização não era satisfatória na presença de glicerol, dificultando a análise da velocidade mínima de fluidização. Abaixo do menor diâmetro, haveria a necessidade de mudanças no equipamento montado, além do que, a partícula mudaria de classificação segundo Geldart (1973), mudando significativamente seu comportamento dinâmico. Além de não fazer parte do escopo deste trabalho este tipo de estudo, dificultaria a análise da influência do diâmetro das partículas sobre o comportamento dinâmico do leito.

Tabela 3.5a: Valores dos parâmetros vibracionais utilizados nos experimentos fluidodinâmicos.

A [m]	f [Hz]	Γ [-]
0,000	0,00	0,00
0,003	9,10	1,00
0,009	5,25	
0,015	4,07	
0,021	3,44	
0,003	12,87	2,00
0,009	7,43	
0,015	5,76	
0,021	4,86	
0,003	18,20	4,00
0,009	10,51	
0,015	8,14	
0,021	6,88	

Tabela 3.5b: Valores dos demais parâmetros utilizados nos experimentos fluidodinâmicos.

Parâmetro	Unidade	Incerteza na medida	Valores				
ϕ	[-]	$\pm 0,00001$	0,0000	0,0009	0,0018	0,0036	0,0072
m_g	[$\times 10^{-3}$ kg]	$\pm 0,0001 \times 10^{-3}$	0,000	0,453	0,906	1,812	3,624
d_p	[$\times 10^{-3}$ m]	$\pm 0,005 \times 10^{-3}$	1,10; 2,19 e 3,67				
H_0	[$\times 10^{-2}$ m]	$\pm 0,05 \times 10^{-2}$	9,0				
m_p	[kg]	$\pm 0,0001$	1,500				
T	[°C]	$\pm 0,5$	50				
ρ_p	[kg/m ³]	± 5	2500				
d_L	[m]	$\pm 0,0005$	0,114				
a_L	[m ²]	$\pm 0,0000005$	0,010207				

Legendas: a_L - área da seção transversal do leito; A - amplitude de vibração; d_L - diâmetro do leito; d_p - diâmetro das partículas; f - frequência de vibração; H_0 - altura de leito estático; m_g - massa de glicerol; m_p - massa de partículas; T - temperatura; Γ - adimensional de vibração; ρ_p - densidade da partícula e ϕ - grau de saturação de glicerol.

Estes experimentos foram conduzidos a 50 °C, temperatura escolhida em testes preliminares, a qual conferia ao leito recoberto com líquido uma fluidização estável na maior parte do tempo, exceto em condições limites de aglomeração. Devido aos extremos valores de A e f utilizados em alguns casos, trabalhou-se com adimensionais de vibração de 0,00; 1,00; 2,00 e 4,00, para amplitudes entre 0,000 e 0,021 m e frequências entre 0,00 e 18,20 Hz.

O grau de saturação de glicerol (ϕ) foi representado pelo quociente entre o volume de glicerol e o volume de poros no leito estático (V_g/V_p), considerando desprezíveis as perdas por evaporação, fixação de líquido nas paredes e arraste pela corrente de ar. Foram utilizados graus de saturação de 0,0000; 0,0009; 0,0018; 0,0036 e 0,0072, com a alimentação ao sistema na forma de batelada. Para graus de saturação de glicerol maiores que 0,0072 nas condições dos experimentos, observou-se grande instabilidade na fluidização, fator limitante para os ensaios aqui realizados. Com a combinação destas variáveis, foram realizados 195 experimentos e mais 20 réplicas.

3.1.4 Efeito da Distribuição de Partículas sobre a Fluidodinâmica e a Segregação

Nestes experimentos, o leito foi operado com vibração e aeração (vibrofluidizado), com vibração (vibrado) e com aeração e sem vibração (fluidizado). Para assegurar a qualidade dos dados obtidos, foram obtidas réplicas de todos os experimentos. A estrutura básica do leito e as adaptações necessárias para estes experimentos estão descritas no item 3.2. Alguns dos valores dos parâmetros experimentais utilizados nesta parte do trabalho estão na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Valores dos parâmetros utilizados nos experimentos de segregação.

Parâmetro	Unidade	Incerteza na medida	Valores
d_p	[x10 ⁻³ m]	± 0,005x10 ⁻³	1,29; 2,18 e 3,67
m_p	[kg]	± 0,0001	1,600
H_0	[x10 ⁻² m]	± 0,05x10 ⁻²	10,0
T	[°C]	± 0,5	40
Γ	[-]	± 0,005	0,00 e 2,00
A	[x10 ⁻² m]	± 0,05x10 ⁻²	0,0; 0,3 e 0,9
f	[Hz]	± 0,005	0,00; 7,43 e 12,87

Legenda: A - amplitude de vibração; d_p - diâmetro dos inertes; f - frequência de vibração; H_0 - altura de leito estático; m_p - massa de partículas; T - temperatura e Γ - adimensional de vibração.

Foram utilizadas quatro distribuições de tamanhos de partículas inertes, conforme a Tabela 3.7. Para compor as quatro distribuições de inertes, empregaram-se partículas com três diâmetros médios de peneira, compostas para que contivessem o mesmo diâmetro médio de Sauter (d_s) em cada distribuição, conforme a definição:

$$d_s = \frac{1}{\sum_i X_i/d_{pi}} \quad (27)$$

sendo X_i a fração mássica das partículas tendo d_{pi} como diâmetro médio.

A partícula de referência foi obtida por peneiramento a partir de duas peneiras sucessivas em uma faixa muito estreita; a média da abertura entre as duas peneiras determinou seu diâmetro médio. A mistura do tipo binária foi composta da mistura de dois diâmetros médios de partículas, neste caso, a de maior tamanho na maior fração, com $d_s = d_p$ de referência (2,18x10⁻³ m). A mistura do tipo plana foi obtida por meio da mistura de três diâmetros médios de partículas em proporções crescentes com o diâmetro, seguindo um perfil plano levemente

crescente da fração mássica (X) como função do diâmetro médio da partícula (d_p) e com $d_s = d_p$ de referência. A mistura do tipo Gaussiana foi preparada a partir da mistura de três diâmetros médios de partículas, sendo que a representação da fração mássica (X) em função do diâmetro médio da partícula (d_p) seguiu um perfil gaussiano (na forma de um sino); a fração máxima ficou centrada próximo ao diâmetro médio de referência, com $d_s = d_p$ de referência.

Tabela 3.7: Descrição da distribuição de tamanho das partículas, para $d_s = 2,18 \times 10^{-3}$ m.

Tipo	X_i [%]	d_p [$\times 10^{-3}$ m]	Peneiras [$\times 10^{-3}$ m]
referência	100,00	2,18	2,00-2,36
binária	37,10	1,29	1,18-1,40
	62,90	3,67	3,35-4,00
plana	24,89	1,29	1,18-1,40
	32,80	2,18	2,00-2,36
	42,31	3,67	3,35-4,00
gaussiana	18,00	1,29	1,18-1,40
	57,00	2,18	2,00-2,36
	25,00	3,67	3,35-4,00

Foram realizados alguns testes para determinar os intervalos dos parâmetros vibracionais a serem utilizados. Escolheram-se diferentes combinações entre amplitude (A) e frequência de vibração (f), de modo que combinadas fornecessem um mesmo valor de adimensional de vibração (Γ), (Tabela 3.6).

Os experimentos fluidodinâmicos foram realizados seguindo o procedimento padrão descrito no item 3.1.1. Nestes experimentos, determinou-se a velocidade de fluidização completa (U_{fc}) como sendo a mínima velocidade em que todas as partículas da mistura estão suspensas pelo ar (Gauthier *et al.*, 1999).

Nos experimentos de segregação, para garantir que todas as partículas

estivessem realmente suportadas pelo ar, manteve-se a velocidade superficial de ar 10% acima da velocidade de fluidização completa. As amostras foram coletadas por sucção por meio de um aspirador de partículas adaptado (San José *et al.*, 1994), de forma que se pudesse coletar uniformemente e com pouca perturbação no leito, uma quantidade representativa de partículas (aproximadamente 0,16 kg).

Os experimentos de segregação foram realizados da seguinte forma: compôs-se a mistura de partículas e após ajustarem-se os parâmetros de ensaio, adicionou-se a mistura no leito. Manteve-se o leito operando a uma velocidade 10% acima da U_{fc} por 6 minutos. Neste período, fez-se a aquisição de vídeos e fotografias digitais, para serem utilizados na complementação da análise dos resultados. Os vídeos foram utilizados para determinar a porosidade média do leito, por meio da determinação visual da altura média do leito. Os sólidos foram coletados com o leito estático, após os 6 minutos de operação, onde tanto o fornecimento de ar quanto a vibração já haviam sido instantaneamente cessados. Os sólidos foram coletados em três posições axiais medidas em relação à base do leito; em 0,00, 0,05 e 0,10 m, para toda seção transversal em cada posição axial. Fez-se a análise granulométrica por peneiramento, estabelecendo a composição de cada tamanho de partícula em cada uma das posições axiais.

Nesta etapa do trabalho foram realizados 18 experimentos fluidodinâmicos e mais 18 réplicas, para as misturas de partículas em leito fluidizado e vibrofluidizado. Foram realizados também 15 experimentos e mais 15 réplicas, avaliando a segregação em leito fluidizado, vibrofluidizado e vibrado.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos neste trabalho, seguindo uma estrutura semelhante à deste capítulo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo foi dividido em três partes, apresentadas na seguinte seqüência: no item 4.1 serão discutidos os resultados obtidos para os ensaios fluidodinâmicos preliminares, com ênfase nas partículas inertes; no item 4.2 serão analisados o comportamento fluidodinâmico do leito fluidizado e vibrofluidizado, dando ênfase aos parâmetros vibracionais e, no item 4.3 será examinado o efeito da distribuição de partículas sobre a dinâmica do leito fluidizado, vibrado e vibrofluidizado, com ênfase na segregação das partículas.

Estes resultados serão apresentados graficamente de forma padronizada, mantendo sempre que possível a mesma escala para permitir melhor interpretação dos resultados, fazendo-se uma ressalva ao item 4.1. Neste item, as partículas empregadas apresentam uma grande variação de tamanho, e em algumas situações, a escala da velocidade superficial do ar teve que ser redimensionada, para facilitar a interpretação dos resultados. Mesmo assim, não houve a necessidade de redimensionar a escala da queda de pressão. Nos itens 4.2 e 4.3 todas as curvas características e de desvio padrão serão apresentadas com a mesma escala, exceto nos casos onde a manutenção de uma mesma escala prejudicaria a visualização dos gráficos, quanto à velocidade superficial de ar. Mesmo assim, não houve a necessidade de redimensionar a escala da queda de pressão, nestes casos.

4.1 Ensaios Fluidodinâmicos Preliminares

Nesta primeira etapa do trabalho, serão exibidos os valores

experimentais da queda de pressão em função da velocidade superficial de ar e desvios padrões correspondentes, para seis diâmetros médios de partículas inertes de vidro, dois de polipropileno e um de poliestireno. Estes resultados foram obtidos em cinco níveis de adimensional de vibração, mantendo a amplitude constante em $1,0 \times 10^{-2}$ m (vide Tabela 3.4), que combinados resultaram em 45 experimentos e mais réplicas para as partículas de vidro de maior diâmetro, estas escolhidas por se tratarem de um caso extremo, devido à sua grande dimensão.

Para avaliar a reprodutibilidade dos ensaios fluidodinâmicos preliminares, foram obtidas réplicas das curvas características e desvios padrões correspondentes, em leito fluidizado (Figura 4.1) e em leito vibrofluidizado (Figura 4.2), ambos para as partículas de vidro com diâmetro de $17,00 \times 10^{-3}$ m.

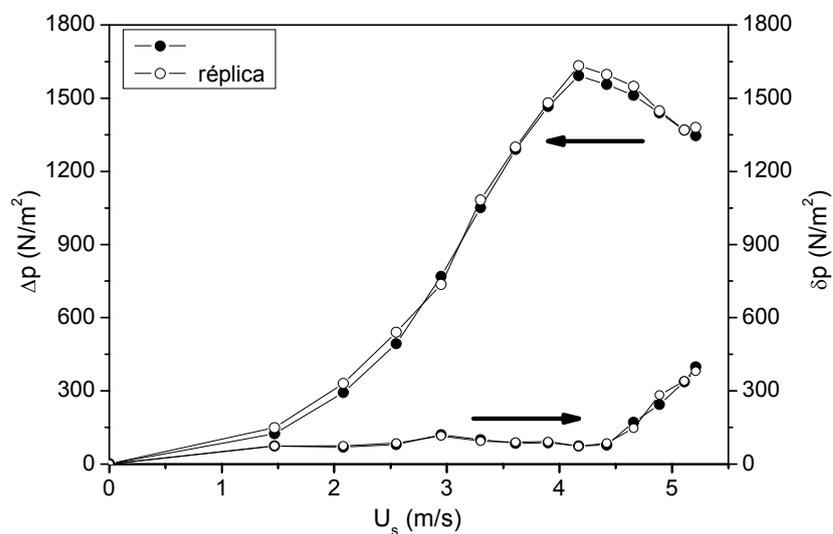


Figura 4.1: Réplica da queda de pressão no leito e do seu desvio padrão, em função de U_s ; $\Gamma = 0,00$; $d_p = 17,00 \times 10^{-3}$ m.

A Figura 4.1 exibe curvas típicas para o leito fluidizado, onde é possível identificar uma região bem definida na transição do leito fixo para o leito

fluidizado. As duas curvas estão praticamente sobrepostas mostrando a boa reprodutibilidade dos dados obtidos nestas condições, onde as pequenas diferenças entre a medida e a sua réplica são inferiores a 10% em praticamente toda a extensão de U_s , tornando-se gradativamente menores com o aumento da velocidade de ar até o início da fluidização. A maior diferença entre a medida e a réplica na região de maior interesse, isto é, após o início da fluidização, é de aproximadamente 2,5%. Esta figura apresenta também o desvio padrão da queda de pressão, sendo que as curvas para a medida e a sua réplica também estão sobrepostas, confirmando a reprodutibilidade destes dados. Uma particularidade verificada nestas curvas, é que quando o leito comporta-se como um leito fixo, o desvio padrão é relativamente muito baixo (menor que 100 N/m^2). Justamente na transição entre os regimes, o desvio padrão eleva-se acentuadamente com o aumento da velocidade do ar, até que as partículas do leito se apresentem suspensas. A partir desta transição, o desvio padrão aumenta como consequência do início da movimentação das partículas, comportamento semelhante ao verificado por Daleffe e Freire (2004), que discutem a utilização das curvas de desvio padrão como uma ferramenta auxiliar na determinação de U_{mf} . Uma descrição mais detalhada sobre a influência desta partícula sobre a dinâmica do leito será apresentada posteriormente.

Na presença de vibração, as curvas características e de desvios padrões também apresentaram boa reprodutibilidade, conforme pode-se observar na Figura 4.2. Sob condição vibratória, nota-se não ser imediata a associação do desvio padrão com o ponto onde se inicia a fluidização do leito. Constata-se também a atenuação na curva de queda de pressão no leito, onde a característica

típica da passagem leito fixo-fluidizado não está presente. A reprodutibilidade observada para as curvas características e de desvio padrão, deixam claro a qualidade do equipamento construído e da instrumentação utilizada para as medidas fluidodinâmicas, bem como da metodologia empregada nesta etapa do trabalho. Os resultados apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2 serão discutidos posteriormente com maiores detalhes.

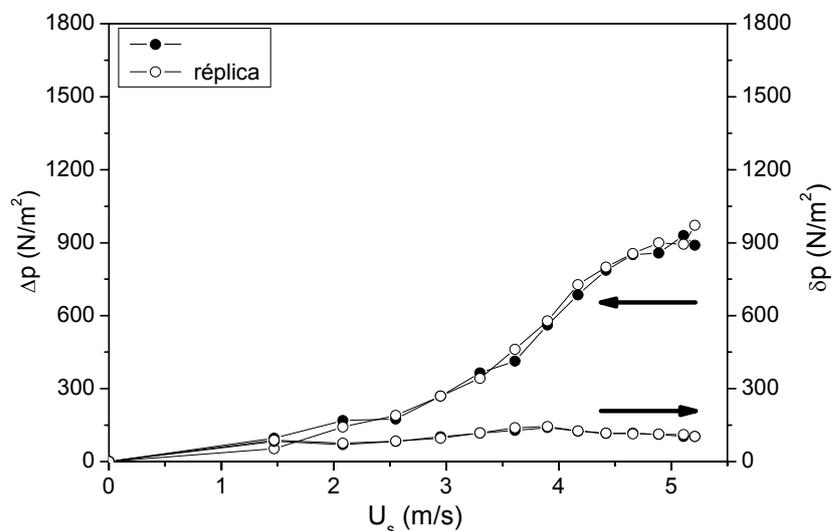


Figura 4.2: Réplica da queda de pressão no leito e do seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 6,00$; $f = 12,90$ Hz; $d_p = 17,00 \times 10^{-3}$ m.

A Figura 4.3 apresenta curvas características para o leito fluidizado, parametrizadas no diâmetro e na densidade (tipo de material) das partículas inertes. A partir desta figura, observa-se que para as partículas de um mesmo material (mesma densidade), a queda de pressão após a U_{mf} sofreu pouca influência do diâmetro da partícula. Quando são comparados diferentes tipos de material (densidades diferentes), é possível observar diferença significativa nos patamares de queda de pressão para toda a extensão da velocidade superficial do

ar, independente do diâmetro das partículas inertes (exceto para $d_p = 17,00 \times 10^{-3}$ m). Isto era esperado, uma vez que a queda de pressão é fortemente dependente da densidade da partícula. Na região de leito fluidizado ($U_s > U_{mf}$), constata-se que o aumento da densidade das partículas torna maior a queda de pressão no leito. Isto ocorre, justamente porque as partículas na câmara do leito nestas condições agem como se fosse um embolo poroso, pressionando o fluido no sentido oposto à força de arraste, devido à ação da gravidade, contrária à direção do escoamento de ar. Quanto maior for a densidade das partículas do leito, maior será a força peso no sentido contrário ao escoamento de ar, para que as partículas sejam mantidas suspensas. Deve-se ressaltar que, fixou-se uma mesma altura de leito estático em todos estes experimentos, fornecendo um mesmo volume aproximado de leito estático. Com a variação da densidade das partículas, houve a variação da massa total de leito (vide Tabela 3.4).

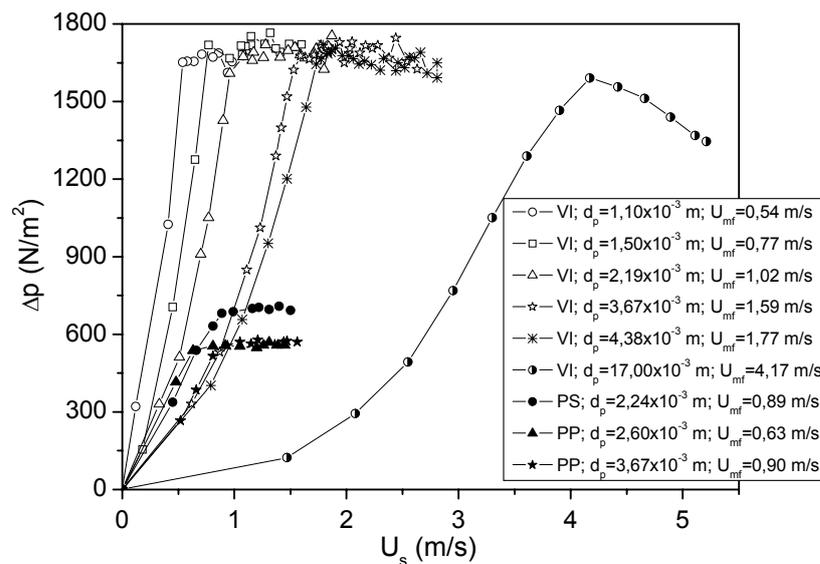


Figura 4.3: Queda de pressão no leito em função de U_s , parametrizado no diâmetro médio das partículas e no tipo de material; VI = vidro; PS = poliestireno; PP = polipropileno; $\Gamma = 0,00$.

Algumas correlações apresentadas na literatura sugerem como a densidade e o tamanho das partículas, podem influenciar a queda de pressão no leito, citando como um exemplo, a Equação 17 (Quadro 2.3). Se nesta equação for desconsiderado o adimensional de vibração, ela representará a queda de pressão em torno da velocidade mínima de fluidização, sendo que a variação do diâmetro das partículas pouco influenciará a queda de pressão nesta condição. Mantendo as outras variáveis constantes, observa-se que quanto maior for o diâmetro, menor será a variação da queda de pressão na mínima fluidização (em uma potência de 0,11). Nesta equação, a densidade das partículas tem uma relação direta e na ordem de grandeza igual a 1, para queda de pressão na mínima fluidização. Desta forma, partículas mais leves requerem menor potência do soprador para que fiquem suspensas, podendo gerar economia energética e redução de custos fixos na aquisição do soprador. Porém, somente com resultados de testes de secagem e de eficiência seria possível concluir se as partículas mais leves (como os polímeros, por exemplo) são uma alternativa econômica e viável às partículas de vidro ou de outros materiais mais densos.

Quanto à velocidade mínima de fluidização, é difícil afirmar qual é o fator preponderante quando são analisados simultaneamente o tamanho e a densidade das partículas inertes. A partir da correlação de Wen e Yu (1966) para a velocidade mínima de fluidização (Equação 6), é possível verificar que a densidade e o tamanho das partículas afetam a velocidade mínima de fluidização quase na mesma ordem. Como ainda não existe uma equação puramente teórica que descreva o comportamento fluidodinâmico sob a ótica da velocidade mínima de fluidização e da queda de pressão, é importante verificar as condições nas quais está

ocorrendo o experimento e fixar o maior número de parâmetros para facilitar este tipo de análise. Sendo assim, a Figura 4.4 mostra o comportamento fluidodinâmico para as partículas de vidro, com seis diâmetros diferentes e em leito fluidizado.

Com o emprego de um mesmo tipo de material nesta figura, nota-se que a velocidade mínima de fluidização diminui com a redução do diâmetro das partículas, conforme fora observado também por Daleffe (2002). Com a redução da massa de cada partícula em virtude da diminuição do seu tamanho, necessita-se de uma menor velocidade para mantê-la suspensa e com isto, o valor de U_{mf} nesta situação, é menor.

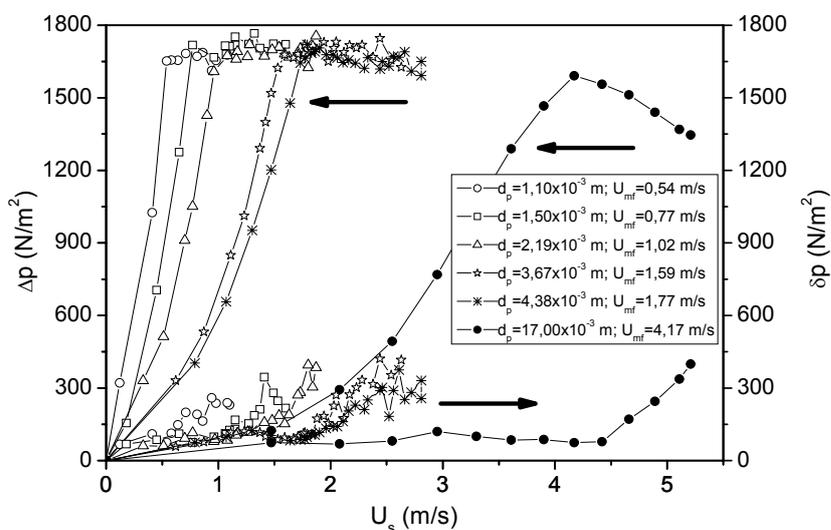


Figura 4.4: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s , parametrizado no diâmetro médio das partículas; vidro; $\Gamma = 0,00$.

Na Figura 4.4, percebe-se ainda que a queda de pressão no leito para $U_s < U_{mf}$ (região de leito fixo) diminui com o aumento do tamanho das partículas, em uma mesma velocidade de ar. Este efeito é ocasionado pelo aumento dos espaços interpartículas, facilitando a passagem de ar por ser mais permeável, reduzindo

assim a queda de pressão. Para $U_s > U_{mf}$ (região de leito fluidizado), a queda de pressão mantém-se praticamente em um mesmo patamar, independente do tamanho das partículas inertes, exceto para $d_p = 17,00 \times 10^{-3}$ m, devido à sua grande dimensão (ocasionando uma fluidização de má qualidade). Como a densidade das partículas e a massa total de leito são iguais para todos os tamanhos de partículas, a força peso também será, fazendo com que a queda de pressão provocada pelo leito de partículas, nesta região, mantenha-se praticamente inalterada.

Para a partícula com $d_p = 17,00 \times 10^{-3}$ m, a queda de pressão diminui monotonicamente e de forma acentuada após o início da fluidização (Figura 4.4). Este tipo de comportamento não é muito comum para o leito fluidizado convencional, mas deve-se destacar que esta partícula excede aproximadamente 17 vezes o tamanho máximo recomendado por Geldart (1973) para este tipo de leito. Como esta partícula é grande considerando o limite recomendável de $1,00 \times 10^{-3}$ m, o número de partículas presentes no leito torna-se muito pequeno para uma mesma altura de leito estático, quando comparado às outras partículas de vidro de menor tamanho. Após o início da suspensão do leito pelo ar, a velocidade de ar ascensional promove uma movimentação mais intensa das partículas, facilitando a passagem de ar e reduzindo sistematicamente a queda de pressão. Esta situação apresenta-se como uma fluidização de péssima qualidade, caracterizado pela existência predominante de canais preferenciais. Como estas partículas apresentam massa individual relativamente grande, as forças necessárias para vencer a sua inércia devem ser conseqüentemente maiores, exigindo também maiores velocidades do fluido. Provavelmente, estas forças inerciais mais a existência de muitos canais preferenciais, fazem com que as

partículas se movimentem alternadamente no leito, de tal forma que nem todas sejam mantidas simultaneamente suspensas pelo escoamento de ar, e assim, a queda de pressão “média” reduz-se significativamente. Ainda para a partícula de vidro com $d_p = 17,00 \times 10^{-3}$ m, é possível observar o aumento contínuo do desvio padrão da queda de pressão (δp) com o aumento da velocidade de ar, logo após a U_{mf} . Esta elevação contínua de δp provavelmente foi ocasionada pelo tipo de movimentação não ordenada destas partículas. Somente um estudo minucioso poderia definir melhor o que pode estar ocorrendo fisicamente para partículas desta ordem de tamanho, mas de qualquer forma, atesta-se aqui a possibilidade de fluidização de leitos com partículas relativamente grandes, embora essa fluidização não seja de boa qualidade.

Para complementar a análise da Figura 4.4, percebe-se que o desvio padrão para as partículas de vidro (exceto para $d_p = 17,00 \times 10^{-3}$ m) apresentou valores oscilatórios em praticamente todos os casos após o estabelecimento do regime fluidizado, intensificando-se com a elevação da vazão de ar. Este comportamento costuma ser comum para altas velocidades de ar, uma vez que nesta situação a movimentação das partículas é mais intensa. Estas oscilações foram originadas da dinâmica das partículas e do escoamento durante a expansão do leito. Por meio de análise visual do leito, constatou-se a elevação de grandes bolhas provocando o aparecimento de regiões ora em fase densa ora diluída, de forma alternada, caracterizando o comportamento conhecido como *slugging*.

A Figura 4.5 ilustra os resultados obtidos para as partículas de vidro, nas mesmas condições operacionais apresentadas na Figura 4.4, só que agora na presença de vibração ($\Gamma = 6,00$). Nota-se que a adição da vibração no leito fez

com que a queda de pressão em toda a extensão das curvas torne-se menor, comportamento ocasionado pela expansão do leito nestas condições vibracionais. Verifica-se também o aumento do desvio padrão da queda de pressão como efeito da adição de vibração no leito, indicando o aumento da movimentação das partículas, neste caso, atestando a expansão do leito. Observa-se nesta figura que, a adição de vibração no leito provocou um aumento na velocidade mínima de fluidização (17% em média), comportamento que Gupta e Mujumdar (1980a) consideram contrário à razão física. Este tipo de comportamento levou Gupta e Mujumdar (1980a) a definir a velocidade mínima de mistura em substituição à velocidade mínima de fluidização. Até o presente momento, entretanto, a velocidade mínima de mistura definida por estes autores além de ser subjetiva (Khalid e Mujumdar, 1982; Mujumdar, 1984 e Garim e Freire, 1994) não é adotada de um modo universal, como se pode observar em trabalhos mais recentes (Camargo, 1998; Moris *et al.* 2002; Moris e Rocha, 2003b e Daleffe e Freire, 2004).

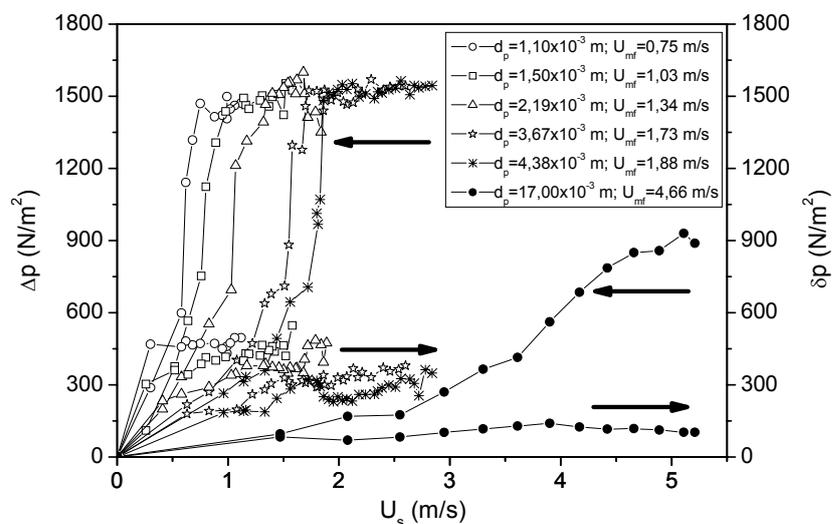


Figura 4.5: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s , parametrizado no diâmetro médio das partículas; vidro; $\Gamma = 6,00$; $f = 12,90$ Hz.

Por meio da Figura 4.5, constata-se ainda que além da redução da queda de pressão no leito com a vibração, em comparação com o leito fluidizado (Figura 4.4), houve um aumento acentuado no desvio padrão em todos os casos, exceto para a maior partícula de vidro. Este aumento no desvio padrão está relacionado à maior movimentação das partículas, neste caso, como efeito da vibração inserida no leito. Na região de leito fixo, a vibração impulsiona as partículas ascendentemente, dando-lhes movimento. Na região de leito fluidizado, a vibração altera o regime de escoamento, e nestas condições vibracionais, auxilia na expansão do leito, observado tanto por meio da redução da queda de pressão, quanto visualmente durante o experimento. Já para a partícula de $17,00 \times 10^{-3}$ m, não houve aumento significativo no desvio padrão da queda de pressão com a adição de vibração na região de leito fixo ($U_s < U_{mf}$).

Como estas partículas são relativamente grandes, a sua inércia é significativa em relação às demais forças presentes, e isto pode alterar o comportamento de todo o leito de partículas. Para as outras partículas de vidro, foi possível notar que com o aumento do diâmetro dos inertes houve a redução do desvio padrão na região de leito fixo, ocasionado agora pela menor dinâmica das partículas com a vibração e com uma baixa vazão de ar. Na presença de vibração e para $U_s > U_{mf}$ (Figura 4.5), curiosamente verifica-se que o aumento da velocidade de ar faz com que haja uma tendência à redução no desvio padrão da queda de pressão, comportamento oposto ao verificado em leito fluidizado (Figura 4.4).

Essa redução no desvio padrão ocorre provavelmente porque acima da U_{mf} , o aumento da velocidade de ar faz com que as partículas colidam em menor intensidade com a placa distribuidora de ar enquanto estão fluidizadas,

minimizando as oscilações na medida da queda de pressão.

Os valores da velocidade mínima de fluidização em leito fluidizado e vibrofluidizado foram relacionados com o diâmetro médio das partículas de vidro, e reunidos na Figura 4.6. Apesar dos comentários apresentados por Gupta e Mujumdar (1980a) sobre a velocidade mínima de fluidização relativa ao leito vibrofluidizado, neste trabalho continuar-se-á a utilizá-la, uma vez que a forma de determinação da velocidade mínima de mistura é muito subjetiva (Khalid e Mujumdar, 1982; Mujumdar, 1984 e Garim e Freire, 1994).

Para facilitar a visualização do comportamento da velocidade mínima de fluidização em ambos os leitos e com o aumento do diâmetro das partículas, fez-se um ajuste visual dos dados (Figura 4.6). Desta forma é possível notar claramente a dependência da U_{mf} com o diâmetro das partículas em ambos os leitos, além do acréscimo da U_{mf} com a incorporação da vibração no leito.

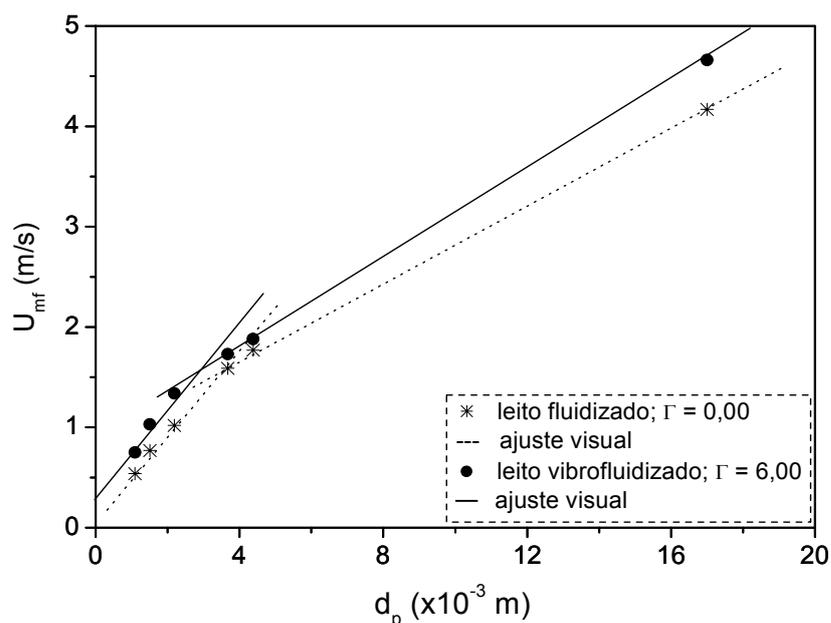


Figura 4.6: Velocidade mínima de fluidização em função do diâmetro médio das partículas inertes, para o leito fluidizado e vibrofluidizado; vidro; $d_p = 17,00 \times 10^{-3}$ m.

Avaliou-se também, o efeito individual da densidade das partículas sobre o comportamento dinâmico do leito fluidizado (Figura 4.7), com esferas de vidro ($\rho_p = 2500 \text{ kg/m}^3$) e esferóides de polipropileno ($\rho_p = 935 \text{ kg/m}^3$), ambas com diâmetro médio de $3,67 \times 10^{-3} \text{ m}$.

Por meio da Figura 4.7, é possível observar que tanto a velocidade mínima de fluidização quanto a queda de pressão para $U_s > U_{mf}$, são fortemente influenciados pela densidade da partícula. O aumento da densidade das partículas de 2,67 vezes faz com que ocorra um atraso no início da fluidização de 1,77 vezes, e um aumento da queda de pressão na mínima fluidização de 3,02 vezes. Quando se compara as partículas com diferentes densidades na região de leito fixo ($U_s < U_{mf}$), nota-se que a queda de pressão é praticamente a mesma, reafirmando que este parâmetro nesta região é dependente quase que exclusivamente dos espaços intersticiais entre as partículas.

Ademais, a velocidade mínima de fluidização depende também do diâmetro das partículas inertes, embora a queda de pressão após a U_{mf} apresente pouca dependência com este parâmetro em leito fluidizado, como fora mostrado na Figura 4.4.

Nesta análise, deve-se levar em consideração a possibilidade de ocorrência de cargas eletrostáticas, que em menor grau, podem ter influenciado o comportamento do leito, principalmente para o polipropileno. Outro fator que deve ser ressaltado é a diferença de esfericidade entre as duas partículas, neste caso a do polipropileno é igual a 0,93 e a do vidro aproximadamente 1. Mesmo assim, acredita-se que esta pequena diferença de esfericidade entre as duas partículas (cerca de 7%) não foi preponderante no processo, já que a diferença

percentual entre as densidades é de aproximadamente 38 vezes maior que a da diferença entre as esfericidades.

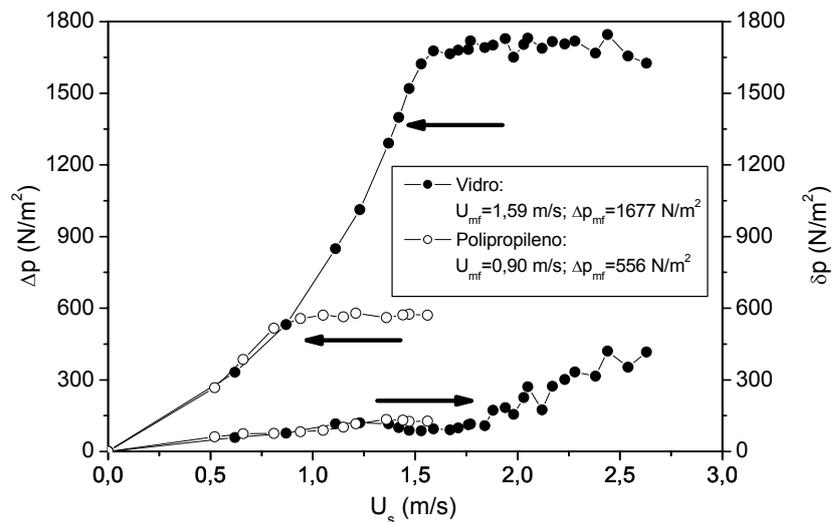


Figura 4.7: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s , parametrizado no tipo de partícula; $d_p = 3,67 \times 10^{-3}$ m; vidro ($\rho_p = 2500$ kg/m³; $\phi \approx 1$); polipropileno ($\rho_p = 935$ kg/m³; $\phi = 0,93$); $\Gamma = 0,00$.

A Figura 4.8 apresenta os dados para as partículas de poliestireno e polipropileno, com diferentes esfericidades e densidades, mas com diâmetros similares, onde percebe-se que a velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) e a queda de pressão na região de leito fluidizado são maiores para o poliestireno, que é mais denso só que com menor diâmetro (volumétrico), que o polipropileno. Como neste experimento tem-se a variação de duas grandezas, a densidade e a esfericidade, fica difícil a sua análise relativa a apenas uma delas.

Para tanto, optou-se por colocar a Figura 4.8 apenas com o objetivo de ilustrar a diferença global no comportamento fluidodinâmico destes dois tipos de partículas, uma vez que ambas serão utilizadas em futuros trabalhos de secagem de pastas sobre partículas inertes.

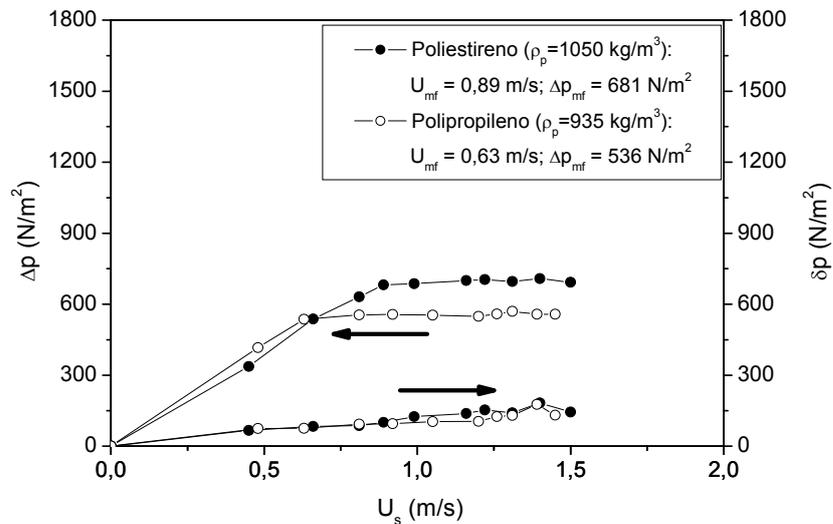


Figura 4.8: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s , parametrizado no diâmetro e no tipo de partícula; poliestireno ($d_e = 2,51 \times 10^{-3} \text{ m}$; $\phi = 0,82$); polipropileno ($d_p = 2,60 \times 10^{-3} \text{ m}$; $\phi = 0,93$); $\Gamma = 0,00$.

Para completar esta análise, será discutido o efeito do adimensional de vibração sobre a queda de pressão no leito e seu desvio padrão, por meio da variação da frequência de vibração, para Γ entre 0,00 e 6,00 e $A = 1,0 \times 10^{-2} \text{ m}$.

A Figura 4.9 apresenta a influência do adimensional de vibração sobre a queda de pressão no leito, onde pode-se constatar-se uma tendência à suavização da região de transição entre o leito fixo e o fluidizado, com o aumento da intensidade de vibração, comportamento típico para o leito vibrofluidizado. Nota-se também que as curvas em praticamente toda a região de leito fixo, apresentam redução da queda de pressão com o aumento da aceleração vibracional, ocasionado pela movimentação das partículas com a vibração mesmo antes do início da fluidização. Esta movimentação das partículas na região de leito fixo favoreceu o escoamento de ar, reduzindo a queda de pressão no leito, e conseqüentemente retardando o início da fluidização.

Com a aceleração vibracional superior à aceleração gravitacional,

existe a tendência ao arremesso das partículas pela placa distribuidora, fazendo com que elas “decolem” mesmo sem o escoamento de ar. Esse efeito tende a ser minimizado com a redução do tamanho das partículas, ocasionado pela sua menor inércia. Com a redução do tamanho das partículas é necessário aumentar a sua quantidade (para manter uma mesma altura de leito estático), resultando em uma maior dissipação energética com o aumento do número de colisões entre estas partículas. A redução da queda de pressão como efeito da vibração se estendeu à região de leito fluidizado ($U_s > U_{mf}$), só que em um patamar pouco dependente da aceleração vibracional, e para $\Gamma > 1,00$.

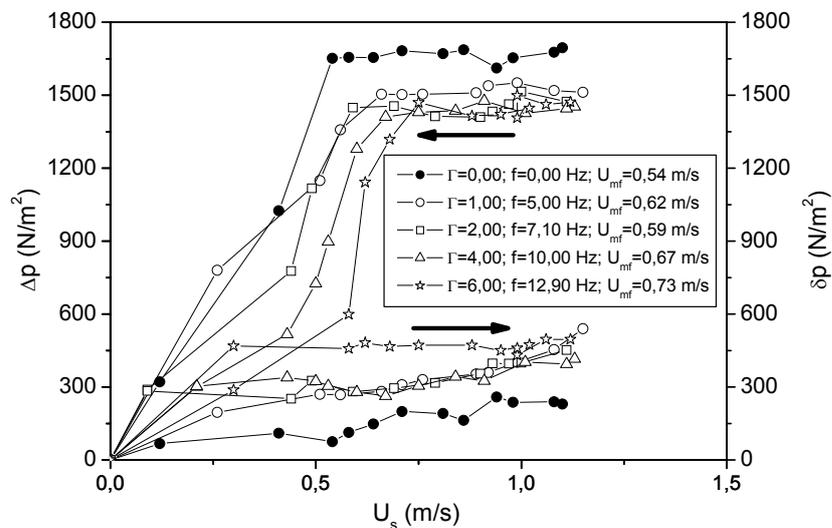


Figura 4.9: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s , parametrizado no adimensional de vibração; $A = 1,0 \times 10^{-2}$ m; $d_p = 1,10 \times 10^{-3}$ m.

A Figura 4.9 apresenta também o desvio padrão da queda de pressão no leito. As curvas presentes indicam que a vibração pode influenciar significativamente o comportamento do desvio padrão, uma vez que, quanto maior é o parâmetro vibracional, maior é a tendência ao aumento do desvio

padrão obtido. Percebe-se que para o leito fluidizado e para $\Gamma = 1,00$ existe uma leve tendência de alta nos valores de desvio padrão com o aumento da velocidade de ar. Já para os maiores valores de Γ observa-se uma tendência de alta até a velocidade em torno de 0,25 m/s, acima deste valor, as curvas permanecem em um patamar quase constante. Para velocidades de ar acima de U_{mf} e nos casos onde o desvio padrão tende a ficar em patamares relativamente constantes, representam a manutenção das partículas suspensas pelo ar, atenuando suavemente o efeito da vibração. Para maiores velocidades de ar, inicia-se a mistura mais intensa das partículas, que somada ao efeito da vibração, aumenta mais ainda o desvio padrão que se mostrou oscilatório. Este comportamento é semelhante ao observado em alguns casos por Garim (1998) e Daleffe e Freire (2004).

Para o maior diâmetro de partículas utilizado, é possível observar grande influência da intensidade de vibração sobre a dinâmica das partículas (Figura 4.10). Nesta situação, o aumento do adimensional de vibração provoca nitidamente a redução da queda de pressão, indicando a maior facilidade do ar em percolar o leito, com a movimentação das partículas pela placa distribuidora. Foi possível verificar por meio de análise visual, que com o aumento de Γ as grandes bolhas ascendentes (*slugging*) foram se extinguindo, e o leito apresentou uma expansão mais homogênea, sem grande mistura das partículas. Apesar do grande diâmetro ($17,00 \times 10^{-3}$ m) e da alta densidade (2500 kg/m^3) das partículas, a fluidização foi quase tão boa qualitativamente quanto para partículas menores, principalmente na presença de vibração. Em um processo de secagem real, entretanto, deve-se analisar o efeito das pontes líquidas e/ou sólidas para que se possa atestar a qualidade efetiva da fluidização com este tipo de partícula.

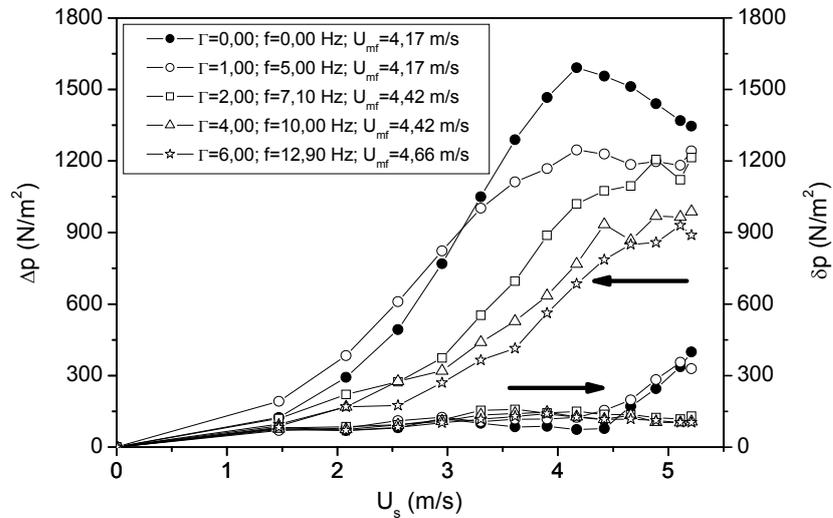


Figura 4.10: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s , parametrizado no adimensional de vibração; vidro; $d_p = 17,00 \times 10^{-3}$ m; $A = 1,0 \times 10^{-2}$ m.

O desvio padrão da queda de pressão para a região de leito fixo ($U_s < U_{mf}$) em todos os casos mostrados na Figura 4.10, se apresentam em um patamar praticamente constante, indicando que mesmo com a possível movimentação das partículas, a permeabilidade do leito fez com que o ar escoasse facilmente sem apresentar oscilações significativas com a vibração. Para a região de leito fluidizado ($U_s > U_{mf}$) até $\Gamma = 1,00$, nota-se que ocorre um aumento súbito do desvio padrão com o aumento da velocidade de ar. Provavelmente, a vibração não foi intensa o suficiente para amortecer a movimentação das partículas com a fluidização do leito. Para os outros adimensionais de vibração (2,00, 4,00 e 6,00), o desvio padrão permanece em um patamar quase constante. Nestes casos, não deve significar que não houve a movimentação mais intensa das partículas após o início da fluidização, e sim, que com o aumento a vibração pode ter havido um aumento na permeabilidade do leito, minimizando as oscilações na medida da queda de pressão, para esta partícula em análise.

Como foi dito anteriormente, observou-se que com o aumento do adimensional de vibração, o escoamento deixa de ser do tipo slugging (caracterizado por grandes bolhas ascendentes), reduzindo as oscilações medidas pelo transdutor, consecutivamente minimizando o desvio padrão. Independente disso, a vibração deveria por si só aumentar o desvio padrão, já que a dinâmica das partículas deveria ser mais intensa. Mas como estas partículas são relativamente grandes e seus espaços intersticiais também, mesmo que ela se movimente mais intensamente, oferece menor variação da resistência à passagem de ar pelos interstícios, quando comparadas a outras partículas menores (mais compactas).

Constata-se por meio destes ensaios que não existe limitação prática a utilização de qualquer destas partículas, quando está se analisando o comportamento fluidodinâmico sem pasta.

Por concisão não foram apresentados todos os resultados obtidos para os experimentos fluidodinâmicos preliminares. Os resultados para as condições experimentais não discutidas aqui, estão no Apêndice A.

No próximo item, serão analisados detalhadamente os efeitos da amplitude, da freqüência, do adimensional de vibração, do diâmetro das partículas inertes e do grau de saturação de glicerol sobre o comportamento fluidodinâmico do leito fluidizado e vibrofluidizado, dando ênfase aos parâmetros vibracionais.

4.2 Análise Fluidodinâmica do Leito Fluidizado e Vibrofluidizado

Após os ensaios fluidodinâmicos preliminares, realizaram-se novos testes fluidodinâmicos analisando agora os efeitos da variação da amplitude, da frequência e do adimensional de vibração sobre a fluidodinâmica do leito, em diversos níveis. Com a realização destes testes, verificou-se a possibilidade da não universalidade do adimensional de vibração, isto é, detectou-se inconsistência para alguns comportamentos dinâmicos no leito, usando um mesmo adimensional de vibração obtido de diferentes combinações entre a frequência e a amplitude de vibração. Sendo assim, optou-se pela realização de experimentos fluidodinâmicos mais abrangentes e na presença de glicerol. Por concisão, não serão apresentados os resultados para os testes, uma vez que os experimentos fluidodinâmicos foram realizados com maior rigor e em uma ampla faixa de parâmetros. Neste item serão apresentados os resultados obtidos para os experimentos fluidodinâmicos, analisados sob a influência da amplitude, da frequência e do adimensional de vibração, do diâmetro das partículas inertes e do grau de saturação de líquido. Os valores dos parâmetros experimentais adotados estão detalhados na Tabela 3.5.

Os resultados apresentados a partir do próximo item exibirão apenas uma parcela do total de 215 experimentos realizados e, das combinações entre as variáveis (A , f , Γ , ϕ e d_p tanto para os valores médios da queda de pressão quanto para o desvio padrão destes valores), viabilizando a análise física de cada caso de forma mais completa. O restante dos dados e das combinações destes que não forem apresentadas aqui, estão no Apêndice B. Os resultados a serem discutidos foram escolhidos por representarem um comportamento semelhante aos que não serão discutidos (ou também um comportamento médio) e por contemplarem situações distintas.

4.2.1 Reprodutibilidade das Curvas Características e de Desvio Padrão

As réplicas das curvas características e de desvio padrão da queda de pressão foram todas obtidas utilizando partículas de diâmetro intermediário ($d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m), testando-se o efeito da vibração (amplitude e frequência) e da saturação de líquido no leito. Foram escolhidas apenas algumas condições experimentais para as réplicas, contemplando o efeito da vibração e da adição de líquido, acreditando-se que as demais condições operacionais sigam a mesma tendência de comportamento. Resultados específicos estão reproduzidos nas Figuras 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14, e os demais, se encontram no Apêndice B.

A Figura 4.11 exibe uma curva típica para o leito fluidizado, onde é possível identificar uma região bem definida na transição do leito fixo para o leito fluidizado ($U_{mf} = 0,92$ m/s). As duas curvas de queda de pressão no leito (Δp) estão sobrepostas mostrando a boa reprodutibilidade dos dados obtidos nestas condições. As curvas de desvio padrão da queda de pressão no leito (δp) estão sobrepostas até $U_s = 1,50$ m/s, e acima desta velocidade, devido ao movimento mais caótico (desordenado) das partículas, o distanciamento entre os pontos nas curvas de desvio padrão é um pouco maior. Mesmo assim, a diferença média entre a medida e a sua réplica é de aproximadamente 6%, valor considerado baixo.

Nota-se também que, quando o leito comporta-se como um leito fixo o desvio padrão é pequeno (menor que 120 N/m^2) e justamente na transição entre os regimes, o desvio padrão se eleva significativamente com o aumento da velocidade do ar (fluidização incipiente), até que o leito apresente uma fluidização bem desenvolvida. Deste ponto em diante o desvio padrão apresenta comportamento oscilatório devido ao movimento mais desordenado das partículas.

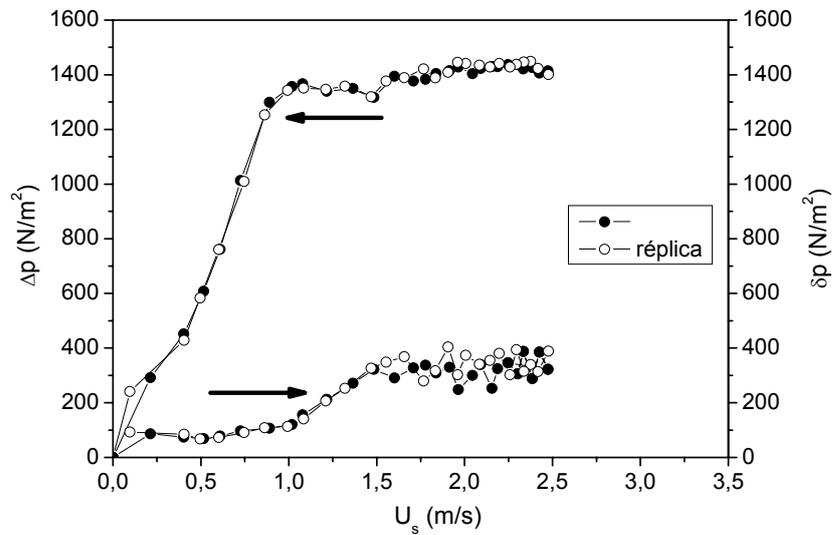


Figura 4.11: Réplica da queda de pressão no leito e do seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 0,00$; $\phi = 0,0000$; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m.

A reprodutibilidade para as curvas características e de desvio padrão da queda de pressão em leito fluidizado, sob o efeito da saturação de líquido pode ser observada na Figura 4.12. Como nos casos anteriores, constata-se a pequena diferença entre as medidas e as réplicas, tanto para a queda de pressão quanto para o seu desvio padrão. Nesta figura, nota-se que as curvas de queda de pressão não apresentam uma transição entre os regimes de leito fixo e fluidizado bem definida, se estendendo por uma grande faixa de velocidade de ar. Mesmo assim, constata-se que foi possível fluidizar o leito nestas condições mesmo sem a ação da vibração. Esta fluidização, embora de má qualidade, foi possível em virtude das altas velocidades de ar empregadas para este diâmetro de inertes e a pequena incidência de zonas mortas (percebida por meio de observações visuais), diferente de um leito de seção retangular que possui cantos, facilitando a aglomeração das partículas, como fora observado por Daleffe e Freire (2004). O desvio padrão obtido foi muito

baixo em quase toda a extensão de velocidade de ar (inferior a 110 N/m^2), tornando-se maior apenas para velocidades acima de $1,66 \text{ m/s}$, próximo à fluidização incipiente. Embora a fluidização tenha ocorrido, esta foi de má qualidade, em razão da aglomeração provocada pela presença de glicerol.

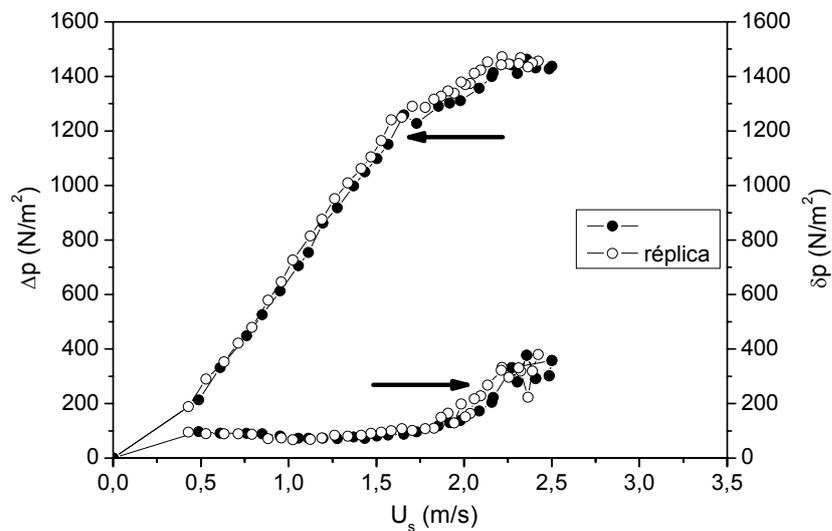


Figura 4.12: Réplica da queda de pressão no leito e do seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 0,00$; $\phi = 0,0072$; $d_p = 2,19 \times 10^{-3} \text{ m}$.

A Figura 4.13 apresenta a reprodutibilidade da curva característica e de desvio padrão da queda de pressão para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 2,00$), a uma alta amplitude de vibração ($A = 0,021 \text{ m}$) e baixa frequência ($f = 4,86 \text{ Hz}$) e na ausência de glicerol. Nota-se que a reprodutibilidade para a curva característica continua sendo de boa qualidade, e para o desvio padrão da queda de pressão, o comportamento reprodutivo corresponde ao observado para a queda de pressão no leito.

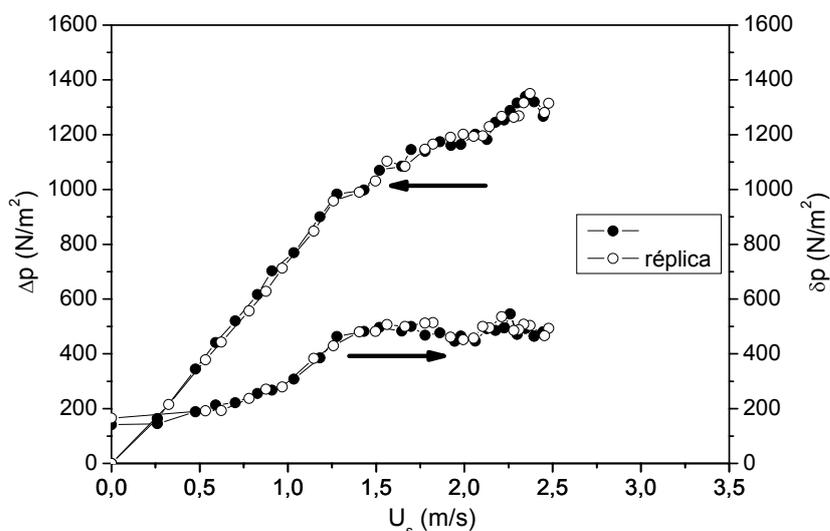


Figura 4.13: Réplica da queda de pressão no leito e do seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,021$ m; $f = 4,86$ Hz; $\phi = 0,0000$; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m.

Percebe-se por meio da Figura 4.13, que as curvas de queda de pressão no leito são muito semelhantes às encontradas na literatura para leitos vibrofluidizados (um exemplo é a curva **d** da Figura 2.2). Sob efeito destes parâmetros vibracionais, é possível verificar um prolongamento na região de transição de leito fixo para o leito fluidizado na curva de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar (Figura 4.13). Neste caso, o tipo característico da curva de queda de pressão de um leito fluidizado convencional não está presente, tornando mais difícil a determinação da velocidade mínima de fluidização. De forma complementar, observa-se que as curvas de desvio padrão não apresentaram uma tendência semelhante às curvas para o leito fluidizado, visto que nestas o desvio padrão é superior em toda a extensão de U_s , mesmo a baixas velocidades de ar.

Os dados obtidos de queda de pressão e de desvio padrão para o leito vibrofluidizado na presença de glicerol (Figura 4.14), também se mostraram reproduzíveis. As curvas apresentadas na Figura 4.14 são qualitativamente

semelhantes às apresentadas na figura anterior, exceto para velocidades de ar superiores a 2,00 m/s. Acima desta velocidade de ar e na presença de glicerol, a fluidização já está bem desenvolvida e as curvas apresentaram comportamento fortemente oscilatório. Este tipo de comportamento ocorreu provavelmente devido às altas velocidades de ar e foi evidenciado pela intensa formação e rompimento de aglomerados, alternando significativamente a conformação das partículas para cada valor coletado. Também notou-se não ser imediata a associação da mudança de comportamento de δp com o início da fluidização no leito, como no caso para o leito fluidizado.

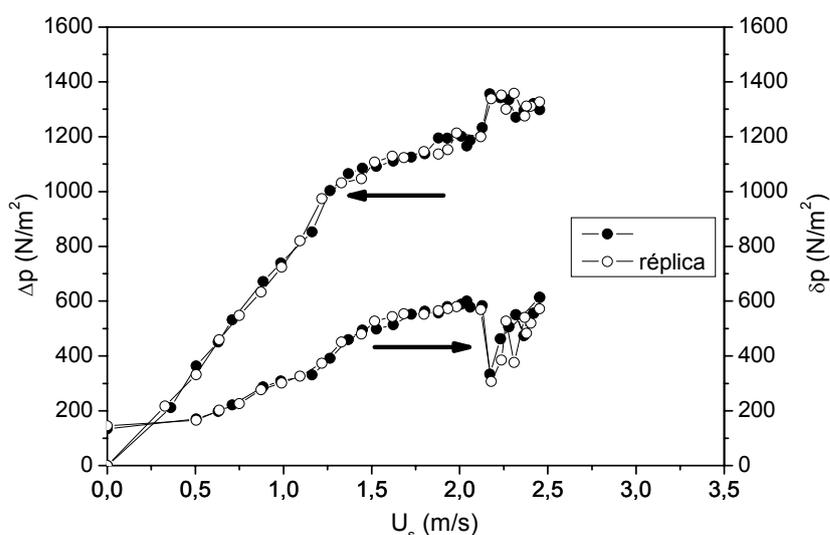


Figura 4.14: Réplica da queda de pressão no leito e do seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,021$ m; $f = 4,86$ Hz; $\phi = 0,0072$; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m.

Verificou-se em todos os casos testados, a reprodutibilidade dos dados obtidos por meio das réplicas apresentadas. Pôde-se assegurar com base nestes resultados, portanto, a boa qualidade dos dados obtidos, da instrumentação utilizada e também do equipamento montado. No próximo item, será analisada a

influência do grau de saturação de glicerol (ϕ) sobre o comportamento fluidodinâmico do leito, para os parâmetros selecionados nesta parte do trabalho.

4.2.2 Efeito do Grau de Saturação de Líquido (Glicerol)

Avaliou-se a influência das diversas quantidades de glicerol adicionadas ao leito, sem a presença da vibração e para o menor diâmetro de partículas ($1,10 \times 10^{-3}$ m), conforme ilustra a Figura 4.15. Por meio desta figura, constata-se que houve a fluidização das partículas em todos os casos. Nota-se também que o aumento do grau de saturação de líquido (ϕ) entre 0,0000 e 0,0009 provocou uma redução acentuada da queda de pressão em leito fluidizado. Neste caso, a presença de glicerol no leito fez com que as partículas ficassem aderidas umas às outras; essas partículas aglomeradas tornaram o escoamento de ar irregular através do leito, e a formação de caminhos entre estes aglomerados fez com que o ar escoasse mais facilmente, reduzindo a perda de carga. Esse efeito ocorre até o ponto em que a velocidade do ar é suficiente para forçar o “rompimento” destes aglomerados, iniciando a fluidização.

Nota-se que para ϕ entre 0,0009 e 0,0072, o aumento da concentração de glicerol teve pouco efeito sobre a queda de pressão no leito, neste caso, as partículas provavelmente encontravam-se aglomeradas, de tal forma que não foram tão sensíveis ao aumento da concentração de glicerol. Mesmo assim, o aumento do grau de saturação fez com que houvesse um aumento discreto na velocidade mínima de fluidização, indicando possivelmente um aumento na aderência das partículas. Este comportamento está associado à maior facilidade do ar percolar o leito através dos caminhos preferenciais formados com o aumento da

quantidade de líquido aderindo às partículas, tornando maior a necessidade de ar para “romper” estas pontes líquidas, estendendo a fluidização incipiente. Malhotra *et al.* (1984) obtiveram o mesmo tipo de comportamento em seu estudo para o leito fluidizado, utilizando partículas inertes de vidro com diâmetros de $3,53 \times 10^{-4}$ e $6,67 \times 10^{-4}$ m (vide as Figuras 2.18 e 2.19).

Na Figura 4.15, verifica-se ainda que a adição de glicerol sobre o leito de partículas tornou mais suave as curvas de queda de pressão na região de transição entre o leito fixo e o fluidizado, da mesma forma como fora constatado por Malhotra *et al.* (1984). Em leito de jorro, Patel *et al.* (1986), Schneider e Bridgwater (1993) e Spitzner Neto (2001) verificaram que o aumento do grau de aderência de glicerol (aumento de ϕ) reduziu a queda de pressão em jorro estável, ocasionado pelo aumento das forças coesivas, reduzindo o número de partículas que migravam da região anular para a região de jorro, reduzindo a resistência à passagem de ar.

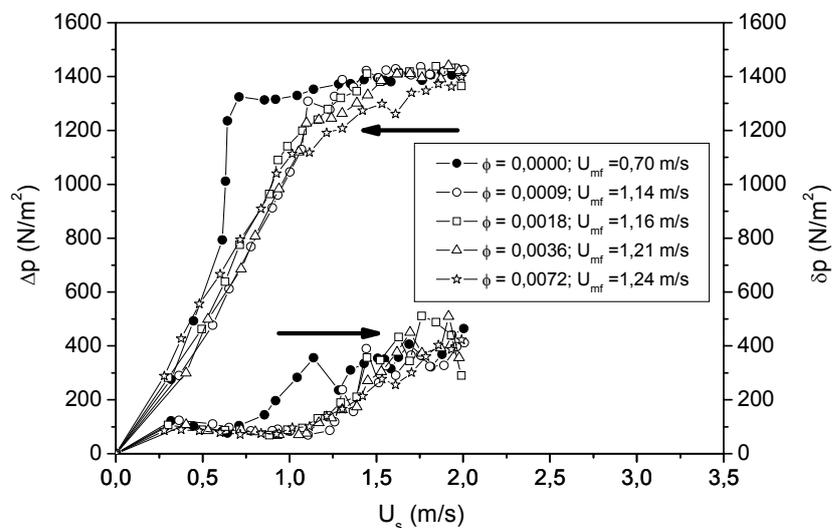


Figura 4.15: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 0,00$; $d_p = 1,10 \times 10^{-3}$ m.

Constata-se que o desvio padrão da queda de pressão no leito (Figura 4.15), permanece em um patamar inferior a 120 N/m^2 na região de leito fixo, independente da concentração de líquido. Na região de leito fluidizado, verifica-se que o desvio padrão não é significativamente influenciado pelo aumento do grau de saturação de líquido (ϕ), exceto entre 0,0000 e 0,0009. Nota-se que após o estabelecimento do regime fluidizado, as curvas de desvio padrão apresentam tendência oscilatória, principalmente para velocidades de ar maiores que $1,50 \text{ m/s}$. Estas oscilações indicam a movimentação mais intensa das partículas no leito.

Para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 2,00$, $A = 0,003 \text{ m}$ e $f = 12,87 \text{ Hz}$) (Figura 4.16) observa-se a aproximação de todas as curvas em torno da curva sem a presença de glicerol ($\phi = 0,0000$), indicando neste caso que a vibração dominou a dinâmica do leito, mesmo a altas concentrações de líquido.

Comparando-se as Figuras 4.15 e 4.16, constata-se que a aplicação desta intensidade de vibração nesta combinação de parâmetros vibracionais, provocou aumento na queda de pressão, independente do grau de saturação de glicerol. Neste caso, isto indica que houve um aumento na resistência à passagem de ar em todos os casos apresentados, e após o início da fluidização, provavelmente houve a compactação do leito de partículas. Já a velocidade mínima de fluidização tornou-se maior com o aumento do grau de saturação de glicerol, mas em menor grau que na ausência de vibração (leito fluidizado). O aumento da aderência das partículas no leito com o aumento de ϕ dificulta o “arraste” destas, retardando o início da fluidização. Só que na presença de glicerol, a vibração (nestas condições operacionais) rompe as pontes líquidas e bloqueia os canais preferenciais, dificultando a passagem de ar e antecipando o início da fluidização.

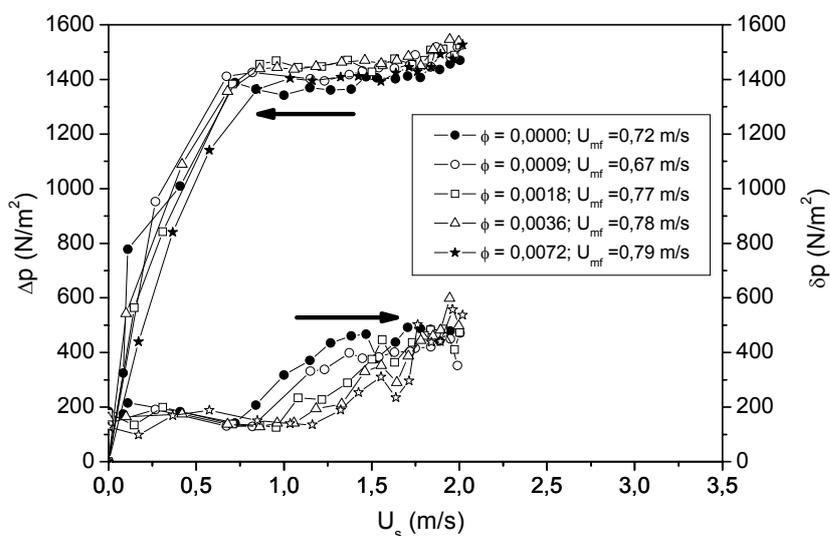


Figura 4.16: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,003$ m; $f = 12,87$ Hz; $d_p = 1,10 \times 10^{-3}$ m.

O aumento da quantidade de líquido no leito provoca a redução dos valores de desvio padrão logo após o início da fluidização até velocidade próxima a 1,50 m/s (Figura 4.16), indicando maior aglomeração das partículas e conseqüentemente, menor movimentação destas no leito. Esta afirmação reforça a “observação visual” da formação de canais preferenciais e de regiões aglomeradas no leito. Com o aumento da velocidade de ar (entre 1,50 e 2,00 m/s), observam-se oscilações nas curvas de desvio padrão, ocasionadas pelas alterações bruscas na resistência à passagem de ar, que ocorrem devido ao “rompimento” dos aglomerados, a mudanças no tipo de escoamento e a intensa movimentação das partículas.

A adição de vibração no leito também aumentou os valores de desvio padrão (Figura 4.16) se comparado ao leito fluidizado (Figura 4.15), principalmente a baixas velocidades de ar. A baixas velocidades ar, a vibração faz com que as partículas se choquem mais intensamente com a placa distribuidora, provocando maiores oscilações na queda de pressão. A altas velocidades de ar, a vibração promove

alterações no tipo de escoamento além de movimentar mais intensamente as partículas, aumentando as oscilações na queda de pressão e as forças atuando sobre o leito.

A Figura 4.17 ilustra o efeito da adição de líquido sobre o comportamento fluidodinâmico do leito, utilizando partículas inertes com o diâmetro intermediário ($d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m) e sem a influência da vibração (leito fluidizado). Por meio de uma inspeção visual na figura, nota-se a exigência de maiores velocidades de ar para fluidizar partículas deste tamanho, sendo que as máximas ficaram em torno de 2,5 m/s. A exigência de grandes vazões de ar para fluidizar um leito de partículas poderia ser um gasto energético desnecessário, se comparado à necessidade de ar para fluidizar partículas menores. No entanto, qualquer comentário a este respeito só poderia ser feito após estudos mais completos, levando em consideração a fluidodinâmica e o processo de secagem de uma pasta real, exigências de qualidade e das características do produto final, eficiência do processo entre outros.

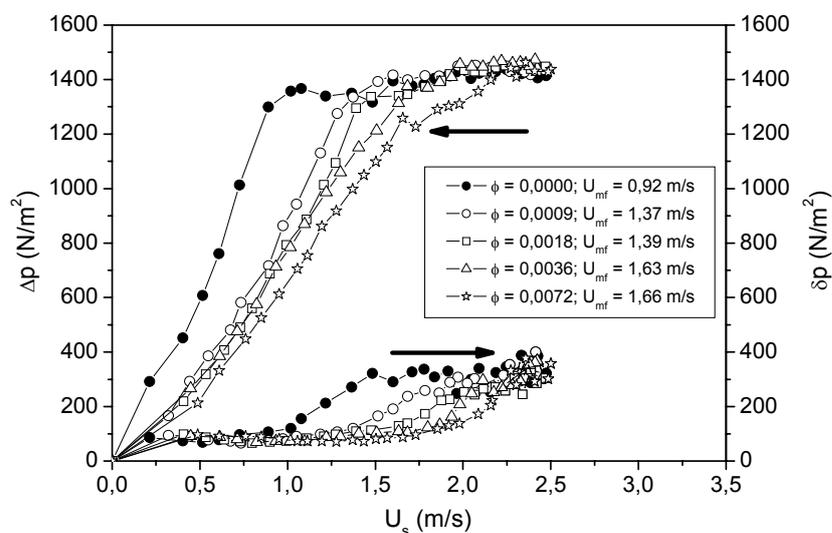


Figura 4.17: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 0,00$; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m.

Continuando a análise dos dados apresentados na Figura 4.17, observa-se que o aumento do grau de saturação de líquido (ϕ) provoca significativa redução da queda de pressão (Δp) na região de leito fixo. Isto ocorre porque o aumento do volume de glicerol no leito torna maior a aderência entre as partículas, ampliando o efeito da aglomeração entre estas. Este aumento do volume de partículas aglomeradas provoca escoamento irregular através do leito, caracterizado pela formação de canais preferenciais que facilitam o escoamento de ar. Além disso, é possível observar que com o aumento de ϕ , a velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) também aumentou. O ar nestas condições escoava mais facilmente pelos canais formados entre as partículas, sendo necessárias conseqüentemente maiores vazões de ar para romper as pontes líquidas e iniciar a movimentação das partículas.

Analisando o desvio padrão da queda de pressão no leito (Figura 4.17), percebe-se que na região de leito fixo, as curvas são pouco dependentes da adição de líquido, permanecendo todas em um mesmo patamar inferior a 125 N/m^2 . Nesta situação, o aumento do grau de aderência das partículas em razão da adição de glicerol estende a região de leito fixo, caracterizado pela ausência de movimentação das partículas. Imediatamente ao início da fluidização, o desvio padrão torna-se maior, decorrente das oscilações na medida da queda de pressão em razão da movimentação das partículas. Este comportamento já foi verificado anteriormente por Daleffe e Freire (2004), que discutem a utilização das curvas de desvio padrão como uma ferramenta auxiliar na determinação da U_{mf} . Deve-se ressaltar que, mesmo alcançado o regime fluidizado na presença de glicerol, este foi caracterizado por uma fluidização de má qualidade e irregular, apresentando

um grande volume de caminhos preferenciais à passagem de ar.

Na Figura 4.18, para o leito operando sob condições vibratórias ($\Gamma = 2,00$, $A = 0,021$ m e $f = 4,86$ Hz), observa-se a confluência de todas as curvas em torno da curva obtida na ausência de líquido, indicando que o efeito provocado pela vibração se sobrepõe ao efeito da presença de glicerol. Verifica-se ainda, neste caso, que a vibração provoca a aproximação entre os valores que indicam o início da fluidização no leito (U_{mf}), e que estes são menores que os apresentados na Figura 4.17, excluindo-se as curvas na ausência de líquido. Verifica-se nesta circunstância que a vibração reduziu a necessidade de ar para fluidizar o leito na presença de líquido e melhorou a movimentação das partículas, devido ao rompimento das pontes líquidas formadas. Ou seja, a utilização do leito vibrofluidizado para processamento deste tipo de material pode resultar em economia energética, possibilitar o processamento de material pastoso com características adesivas e reduzir o investimento do sistema para fornecimento de ar, por exemplo. Para o processamento de pastas reais, entretanto, deve-se considerar a ocorrência de pontes sólidas e a sinterização, além das pontes líquidas.

Por meio de uma análise das curvas de desvio padrão (δp) na Figura 4.18, pode-se comprovar novamente a pouca dependência da dinâmica do leito com o aumento do grau de saturação de glicerol, quando a vibração está presente, para estas condições experimentais. Pode-se notar também, que a vibração torna maiores os valores de desvio padrão (Figura 4.18), que em torno da velocidade mínima de fluidização, por exemplo, foram de aproximadamente 4 vezes os obtidos na ausência de vibração (Figura 4.17). Deve-se destacar que o

comportamento apresentado na Figura 4.18 é uma situação particular para o adimensional de vibração obtido a alta amplitude ($A = 0,021$ m) e baixa frequência de vibração ($f = 4,86$ Hz). Para minimizar os “estudos de caso” e não tornar demasiadamente cansativo este capítulo, um outro exemplo do efeito de ϕ em leito vibrofluidizado, a alta frequência e baixa amplitude de vibração, será apresentado posteriormente para a partícula de $3,68 \times 10^{-3}$ m, uma vez que o seu comportamento qualitativo é semelhante ao observado para as partículas com diâmetro de $2,19 \times 10^{-3}$ m. Sob o mesmo tipo de argumento, a análise com alta amplitude e baixa frequência de vibração não será feita para a maior partícula, uma vez que o seu comportamento qualitativo é semelhante ao apresentado na Figura 4.18. De qualquer forma, o item 4.2.3 discutirá os efeitos do adimensional de vibração sobre o comportamento dinâmico do leito, tanto em altas como em baixas amplitudes e frequências de vibração.

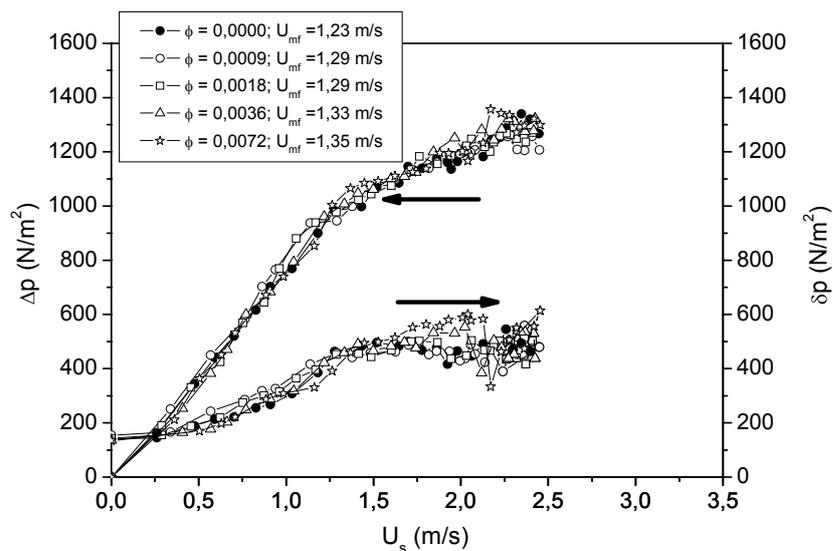


Figura 4.18: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,021$ m; $f = 4,86$ Hz; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m.

Na Figura 4.19 será apresentado o efeito do aumento do grau de saturação de líquido no leito fluidizado, para o maior tamanho de partículas estudado nesta parte do trabalho ($d_p = 3,68 \times 10^{-3}$ m). Por meio de uma inspeção visual nesta figura, constata-se que os comportamentos das curvas características são mais uniformes e estáveis quando comparados aos casos anteriores, que utilizavam menores diâmetros de partícula em leito fluidizado (vide Figuras 4.15 e 4.17). A movimentação destas partículas grandes ocorreu de forma mais ordenada, apresentando um comportamento dinâmico mais estável, mesmo assim, somente isto não é um indicativo que a fluidização seja de melhor qualidade. Por meio de análise visual do comportamento do leito, verificou-se que quando o diâmetro das partículas inertes é aumentado, a fluidização apresenta-se mais homogênea sem a formação de grandes aglomerados, sendo que o rompimento destes aglomerados também ocorreu de forma gradual. Quanto maior é o tamanho das partículas inertes, menor é a área superficial total para aderência do líquido, se mantida uma mesma altura de leito estático. Desta forma, o glicerol pode recobrir mais homogêneamente as partículas (já que elas também estão em menor número), evitando possíveis diferenças de concentração de glicerol ao longo do leito, o que poderia desestabilizar a fluidização. Esse aumento no diâmetro da partícula também faz com que seja menor o ângulo de contato entre as partículas recobertas com o líquido, minimizando a força necessária para romper as pontes líquidas e a dependência desta com a concentração de glicerol. Somado a isto, partículas maiores apresentam maior massa, e conseqüentemente, maior inércia, favorecendo o rompimento destas pontes líquidas, facilitando a movimentação das partículas.

Deve-se acrescentar que as partículas com maior tamanho se apresentam em um menor número (desde que mantida uma mesma altura de leito estático), o que reduz o número de colisões entre elas e delas com as paredes e com o fundo do leito. Este comportamento reduz as oscilações na queda de pressão, o que pode ser confirmado por meio das curvas de desvio padrão da queda de pressão (Figura 4.19). Embora partículas com estas dimensões não sejam facilmente fluidizáveis, foi possível atingir este regime mesmo na presença de glicerol e sem a ajuda da vibração. Isto pode ter ocorrido em virtude da geometria do leito (seção circular) que evita zonas mortas, da grande potência (capacidade) do soprador de ar (7,5 cv), das propriedades do fluido e da partícula, da grande área livre da placa distribuidora (50%) minimizando a perda de carga, entre outros. Estes fatores associados fazem com que o escoamento de ar (empuxo), se sobreponha ao peso das partículas e também “quebre” as pontes líquidas presentes, possibilitando a fluidização.

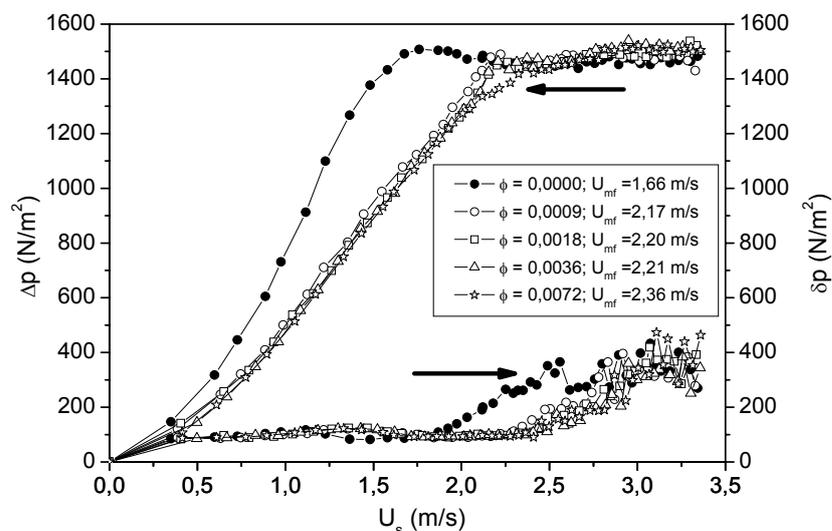


Figura 4.19: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 0,00$; $d_p = 3,68 \times 10^{-3}$ m.

Como nos casos anteriores para o leito fluidizado, o aumento da quantidade de glicerol adicionada no leito torna maiores as velocidades mínimas de fluidização. Este efeito é nitidamente mais intenso entre $\phi = 0,0000$ e $\phi = 0,0009$. A partir daí, o aumento da quantidade de líquido recobrando as partículas desempenha menor influência no aumento da velocidade mínima de fluidização. Este comportamento está associado ao aumento das forças de coesão e adesão com o aumento da concentração de glicerol, sendo que a baixas concentrações de glicerol, as partículas estão ligadas por pontes líquidas isoladas nos pontos de contato. O aumento da concentração de líquido no leito promove o aparecimento de outras forças além das de contato, como a de sucção capilar nas interfaces líquido-ar na sua superfície ou a tensão interfacial na superfície convexa do líquido. Estas forças somadas ao escoamento de ar, favorecem o aparecimento de canais preferenciais facilitando a passagem de ar e retardando o início da fluidização. Na utilização de pastas reais (que secam com o tempo) no processo, deve-se considerar também a presença de pontes sólidas em uma análise desta natureza. Deve-se acrescentar que, os desvios padrões (δp) para a região de leito fixo ilustrados na Figura 4.19, se apresentam baixos (inferiores a 120 N/m^2) e coincidentemente ao início da fluidização, aumentam acentuadamente. Já próximo à máxima velocidade de ar utilizada, apresentaram comportamento oscilatório, ocasionado pela intensificação da movimentação das partículas no leito. Este comportamento é similar ao apresentado nas Figuras 4.15 e 4.17, dispensando maiores comentários.

A última situação apresentando a influência do glicerol sobre o comportamento fluidodinâmico do leito, contempla um caso na presença de vibração ($\Gamma = 2,00$), para baixa amplitude de vibração ($A = 0,003 \text{ m}$) e alta

freqüência ($f = 12,87$ Hz), aplicados a maior partícula desta parte do trabalho ($d_p = 3,68 \times 10^{-3}$ m) (Figura 4.20). Esta circunstância é semelhante à apresentada na Figura 4.16 (exceto pelo diâmetro da partícula inerte) e oposta em termos de A e f à apresentada na Figura 4.18 (além do tamanho da partícula ser diferente), sendo que em todos os casos, aplicou-se adimensional de vibração igual a 2,00. Por meio de comparação qualitativa entre as Figuras 4.18 e 4.20, ponderada na diferença de tamanhos entre as partículas, verifica-se que para altas amplitudes e baixas freqüências de vibração, ocorre uma suavização nas curvas de queda de pressão, isto é, a transição de leito fixo para leito fluidizado ocorre de forma gradual. Altas freqüências (e baixas amplitudes) neste evento, tendem a compactar o leito (melhora o rearranjo das partículas, dificultando a passagem de ar) evitando a formação de canais preferenciais. Isto explica também a forma das curvas características na Figura 4.20, onde o ponto de início da fluidização das partículas é facilmente obtido, uma vez que a ruptura das pontes líquidas e do leito ocorre de forma súbita (abrupta). No entanto, altas amplitudes (com baixas freqüências) tendem a expandir o leito, facilitando a passagem de ar. Neste último caso, através de observações visuais, detectou-se que a fluidização foi do tipo *slugging*, que pode ser confirmado também por meio dos altos valores de desvio padrão mostrados na Figura 4.18.

Desta forma, foram apresentadas algumas situações representativas para analisar como a adição de quantidades conhecidas de glicerol, com suas características intrínsecas, afeta a dinâmica das partículas em leito fluidizado e vibrofluidizado. O próximo item irá explorar os efeitos dos parâmetros vibracionais sobre a fluidodinâmica destes leitos, na presença ou não de glicerol.

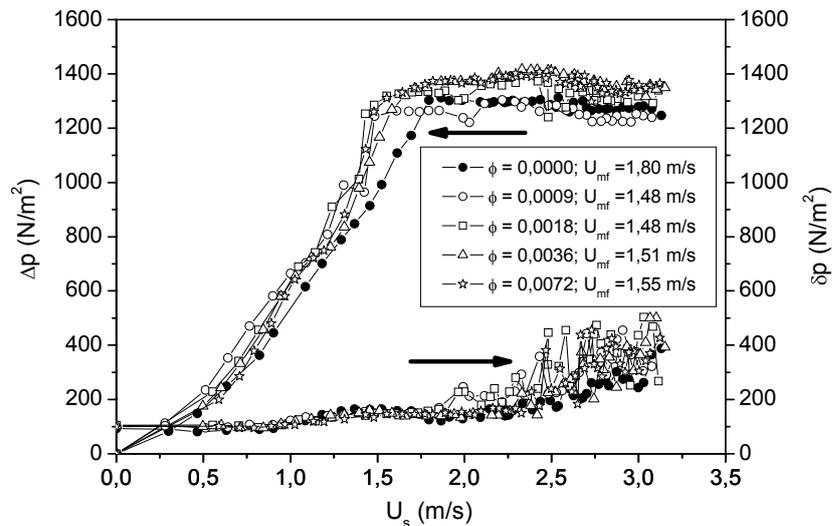


Figura 4.20: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,003$ m; $f = 12,87$ Hz; $d_p = 3,68 \times 10^{-3}$ m.

4.2.3 Efeito da Amplitude, da Freqüência e do Adimensional de Vibração

Neste item, serão avaliados os efeitos dos parâmetros vibracionais sobre a fluidodinâmica do leito, por meio da combinação de diferentes amplitudes (A) e freqüências de vibração (f), de modo a fornecer sempre um mesmo valor de adimensional de vibração (Γ). Com base na definição do adimensional de vibração (Equação 1), sempre que se utiliza uma alta freqüência (em uma potência de 2) necessita-se de uma baixa amplitude (em uma potência de 1) e vice-versa, para que se obtenha um mesmo valor de Γ . Assim, para que fosse possível obter várias combinações entre amplitude e freqüência, fixou-se um valor de Γ (1,00; 2,00 e 4,00) e variou-se A e f em níveis que não fossem altos suficientes para provocar danos a estrutura do sistema de vibração (vide Tabela 3.5a). Em todas as figuras apresentadas neste item, incluiu-se a curva obtida para o leito fluidizado nas mesmas condições experimentais do leito vibrofluidizado, para servir como uma referência e facilitar a análise dos

comportamentos a serem descritos. Estas curvas sem a vibração aparecem nas figuras sempre com o símbolo circular de preenchimento sólido.

Serão apresentados os resultados apenas para os diâmetros de partícula de $2,19 \times 10^{-3}$ e $3,68 \times 10^{-3}$ m. Os resultados para o menor diâmetro de partícula ($d_p = 1,10 \times 10^{-3}$ m) não serão discutidos aqui, uma vez que o comportamento observado para esta partícula é similar aos das demais. Deve-se salientar que com a redução do tamanho das partículas, menos intenso foram os fenômenos observados sob o efeito dos parâmetros vibracionais neste estudo. Optou-se por mostrar os resultados para as maiores partículas, com o intuito de facilitar a explicação dos fenômenos característicos, uma vez que para estas partículas foram utilizadas maiores vazões de ar, sendo coletados um número maior de pontos experimentais. A dinâmica do leito foi mais regular nestes casos (vide item 4.2.2), tornando mais claras as diferenças de comportamento observadas nas figuras. No Apêndice B estão apresentados todos os resultados obtidos nestes experimentos, a fim de tornar-se disponível para análises por outros trabalhos ou para que sejam utilizadas por pesquisadores que trabalhem com modelagem e simulação. A análise na presença de glicerol se limitará aos casos limites no máximo grau de saturação utilizado ($\phi = 0,0072$), uma vez que no item anterior (4.2.2) verificou-se que a diferença de concentração de glicerol teve pouca influência na dinâmica das partículas na presença de vibração. Também serão apresentados os dados para adimensionais de vibração iguais a 1,00, 2,00 e 4,00 tanto na ausência quanto na presença de glicerol, para limitar uma descrição excessiva dos comportamentos verificados em cada caso.

As Figuras 4.21 e 4.22 mostram resultados fluidodinâmicos obtidos para o leito vibrofluidizado, respectivamente sem e com glicerol, operando com valores constantes de adimensional de vibração igual a 1,00, obtidos de diferentes combinações entre A e f . Na Figura 4.21 pode-se notar inicialmente que para um mesmo valor de adimensional de vibração ($\Gamma = 1,00$), as curvas apresentam um comportamento diferente entre si. Constata-se que com o aumento da amplitude de vibração e redução da frequência, ocorre a redução da queda de pressão principalmente no momento anterior ao início da fluidização, exceto para $A = 0,021$, onde verifica-se o aumento na queda de pressão. A única condição onde percebe-se uma proximidade de comportamentos para mesmo adimensional de vibração, foi para as curvas obtidas nas amplitudes de 0,009 e 0,015 m.

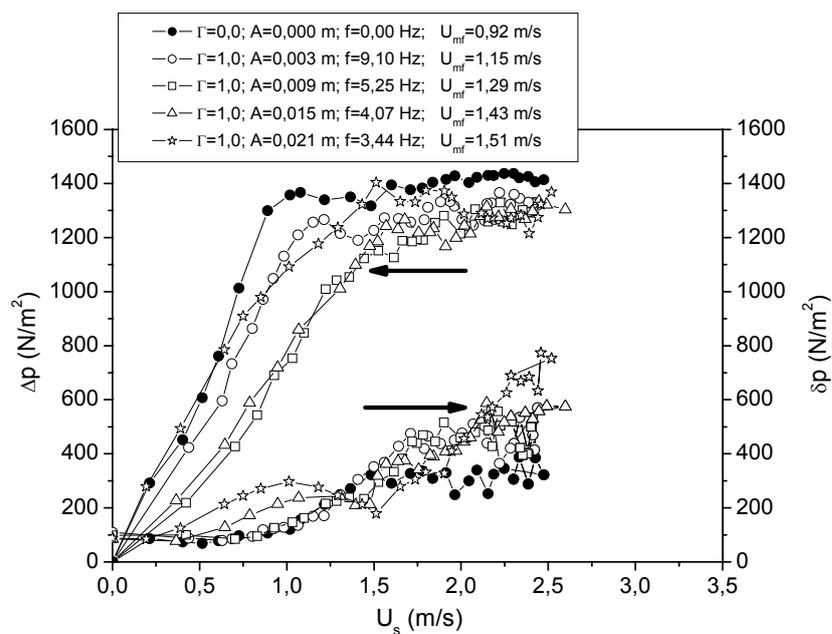


Figura 4.21: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m; $\Gamma = 1,00$; $\phi = 0,0000$.

Observa-se que as velocidades mínimas de fluidização para amplitudes de vibração de 0,009, 0,015 e 0,021 m, apresentam valores muito próximos (Figura 4.21). O fato de não variarem significativamente neste intervalo de amplitude de vibração, pode estar relacionado à baixa intensidade vibracional.

Daleffe (2002) verificou que quando a aceleração vibracional estava praticamente em equilíbrio com a aceleração gravitacional e, na ausência de glicerol, o efeito vibracional não teve influência significativa sobre o comportamento fluidodinâmico do leito para este tipo de partícula inerte, com a amplitude mantida fixa em 0,003 m.

Neste trabalho, 0,003 m corresponde ao menor valor de amplitude para o leito vibrofluidizado. Deve-se destacar também que para o leito vibrofluidizado, as curvas características geralmente não apresentam patamares bem definidos na transição entre o leito fixo e o leito fluidizado, e a sua determinação utilizando a metodologia clássica para o leito fluidizado adotada por Bratu e Jinescu (1971), por exemplo, pode fornecer resultados distintos para diferentes observadores, dependendo das condições operacionais empregadas. Apesar disto, até o momento não existe uma metodologia amplamente aceita para determinação da U_{mf} em leitos submetidos à vibração vertical, e maiores comentários podem ser obtidos em Gupta e Mujumdar (1980b) e Daleffe (2002).

Neste trabalho, a maior parte das velocidades mínimas foi determinada com certa facilidade, e os resultados estão coerentes com o comportamento observado e relatado. De qualquer forma, por meio dos resultados da queda de pressão no leito (e do seu desvio padrão), vê-se que um mesmo valor de adimensional de vibração não provocou comportamento único sobre a

fluidodinâmica do leito, mesmo em uma condição particular como esta, a baixa intensidade vibracional.

Na Figura 4.22, observa-se que a presença de um filme de glicerol recobrimo as partículas inertes tende a suavizar as curvas, quando comparadas às do caso anterior (Figura 4.21). Para o leito fluidizado, as forças de coesão provocadas pela presença do glicerol tendem a aglomerar as partículas. Com o leito aglomerado, para que o ar escoe livremente entre as partículas ocorre a formação de canais preferenciais, ocasionando a redução da queda de pressão e atrasando o início da fluidização do leito. Este comportamento pode ser visto claramente comparando as curvas características para o leito fluidizado nas Figuras 4.21 e 4.22.

Com a adição de vibração no leito, ocorreu o rompimento destas pontes líquidas formadas e o bloqueio dos canais preferenciais, provocando o aumento da queda de pressão, como ilustra a Figura 4.22. Observa-se também que o aumento da amplitude de vibração (e redução da frequência) tornou maior a queda de pressão no leito, mantendo Γ em um valor fixo. Para uma condição vibracional pouco intensa, com Γ igual à unidade, o aumento da amplitude de vibração, possivelmente, tende a compactar o leito, já que na presença de glicerol, as partículas não estão completamente “livres” para moverem-se (Figura 4.22). Estes comportamentos mostram que mesmo para um adimensional de vibração igual à unidade, a universalidade do adimensional de vibração não foi verificada em todas as condições.

Verifica-se na Figura 4.22 que o aumento da amplitude de vibração (e redução da frequência), provocou aumento no desvio padrão da queda de

pressão (δp). Isto indica que o aumento da amplitude de vibração intensificou a movimentação das partículas, provocando oscilações mais intensas no momento que era feita a aquisição da queda de pressão. Nota-se por meio destas curvas, que o comportamento dinâmico do leito para um mesmo adimensional de vibração também não foi o mesmo, nestas condições operacionais.

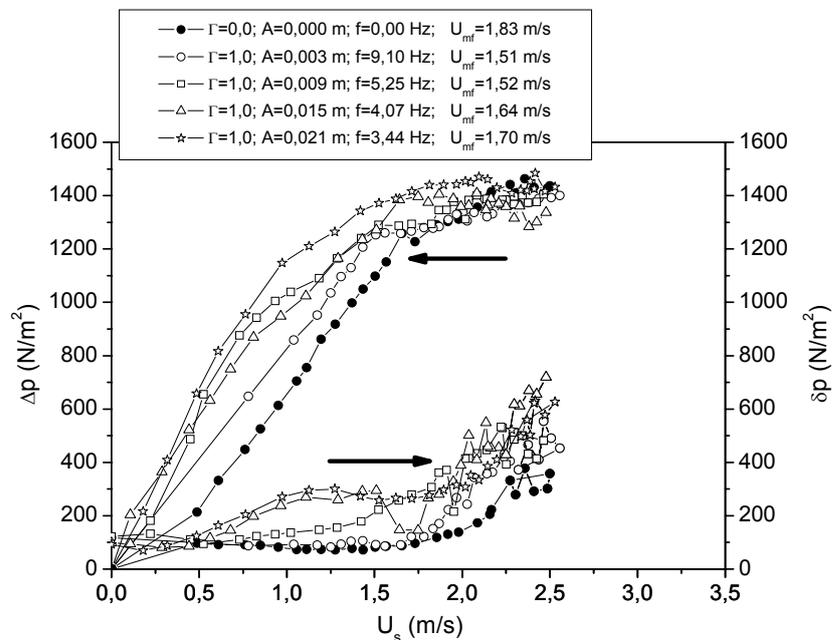


Figura 4.22: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m; $\Gamma = 1,00$; $\phi = 0,0072$.

As Figuras 4.23 e 4.24 mostram resultados fluidodinâmicos obtidos para o leito vibrofluidizado, sem e com glicerol respectivamente, operando com valores constantes de adimensional de vibração iguais a 2,00, obtidos pela combinação de diferentes valores de A e f.

Para adimensional de vibração aproximadamente igual a duas vezes a aceleração gravitacional (Figura 4.23), a queda de pressão no leito não foi

significativamente influenciada pelas diferentes combinações entre amplitude e frequência de vibração, exceto para $A = 0,003$ m. Quando se observa tanto a velocidade mínima de fluidização quanto o desvio padrão da queda de pressão, verifica-se que, na verdade, a dinâmica das partículas não é a mesma em todas as situações, como aparentam apenas os resultados para a queda de pressão. Quanto à queda de pressão, o comportamento verificado pode estar expressando o fato da queda de pressão estar ligada principalmente à permeabilidade do leito e ao equilíbrio entre as forças de arraste e a gravitacional, que não foram afetadas significativamente pela vibração, nestes casos.

Já o desvio padrão que é um reflexo direto da intensidade da movimentação das partículas (e do tipo de escoamento), originário das oscilações na medida da queda de pressão, mostrou comportamentos diferentes para todas as amplitudes. Neste sentido, constata-se que o aumento da amplitude de vibração (e redução da frequência) torna maior o desvio padrão da queda de pressão no leito, indicando maior movimentação das partículas (Figura 4.23).

A diferença entre as curvas é significativa até a fluidização completa, próximo à máxima velocidade de ar utilizada. A partir deste ponto, as curvas se aproximam em consequência da mudança no padrão de movimentação das partículas, para um estado de intensa movimentação, próximo a elutriação. Comparando-se a curva para o leito fluidizado com as curvas obtidas para o leito vibrofluidizado, nota-se que a presença de vibração expandiu o leito, facilitando a passagem de ar, tornando menor a queda de pressão e maior a U_{mf} .

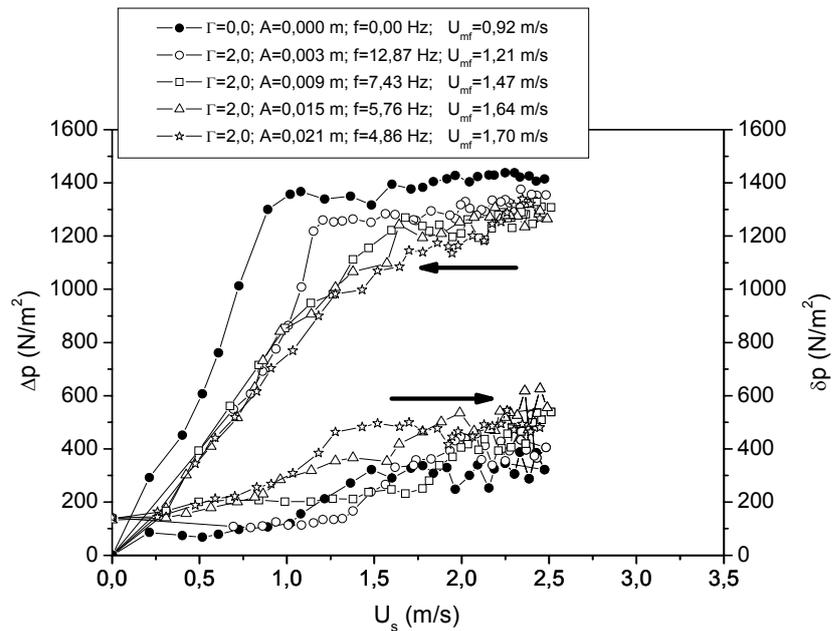


Figura 4.23: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m; $\Gamma = 2,00$; $\phi = 0,0000$.

A Figura 4.24 exibe as mesmas condições experimentais apresentadas na Figura 4.23, só que com um filme de glicerol recobrindo as partículas. Observa-se que a adição de glicerol aproximou todas as curvas de queda de pressão, inclusive para o leito fluidizado. Por comparação entre as Figuras 4.23 e 4.24, percebe-se que a adição de glicerol reduziu a queda de pressão e aumentou a velocidade mínima de fluidização em leito fluidizado. Como foi dito anteriormente, o glicerol tende a aglomerar as partículas formando caminhos preferenciais à passagem de ar. O ar nestas condições escoava mais facilmente pelos canais formados entre as partículas, sendo necessárias conseqüentemente, maiores vazões de ar para romper as pontes líquidas e iniciar a movimentação das partículas. Apesar das curvas de queda de pressão apresentarem comportamentos semelhantes, nota-se novamente que o desvio padrão não é o mesmo em todas as condições, indicando que o comportamento dinâmico das partículas não deve ser similar.

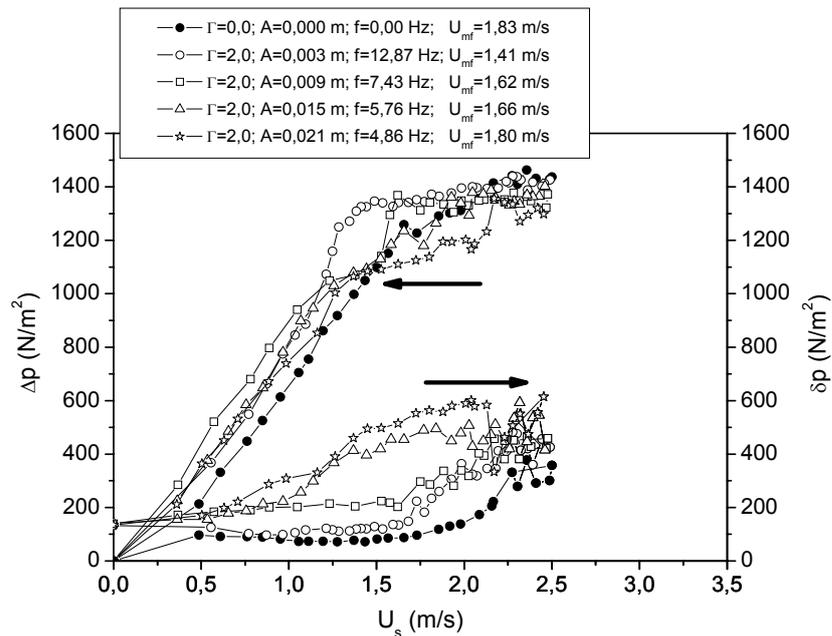


Figura 4.24: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m; $\Gamma = 2,00$; $\phi = 0,0072$.

Por meio da Figura 4.24, pode-se constatar o aumento da amplitude de vibração (e redução da frequência) tornou maiores os valores do desvio padrão da queda de pressão. Naturalmente, o aumento da amplitude tende a arremessar as partículas mais fortemente no sentido ascendente, movimentando mais intensamente as partículas e expandindo o leito. A redução da frequência de vibração facilita esta expansão, já que reduz a frequência dos choques (colisões) entre o leito e o fundo do vaso (placa distribuidora). Estas colisões tendem a desestruturar o movimento ascendente das partículas, rearranjando-as de forma a compactar o leito, sem movimentá-las tão intensamente.

As Figuras 4.25 e 4.26 mostram os resultados para adimensional de vibração igual a 4,00, obtidos de diferentes combinações entre amplitude (A) e frequência (f) de vibração, sem e com glicerol, respectivamente. Nestas condições experimentais, verifica-se de forma direta a grande influência de A e

f sobre a dinâmica das partículas, indicando previamente a não universalidade de Γ . Ou seja, a Figura 4.25 mostra uma diversidade de comportamentos que foram obtidos a partir de um único valor de Γ , proveniente de diferentes combinações entre A e f. Isto indica claramente que a utilização do adimensional de vibração isoladamente para caracterizar este tipo de comportamento, pode induzir a um erro de interpretação nos resultados. Ainda, verifica-se que com o aumento da amplitude de vibração (e redução da frequência), houve significativo aumento nos valores de U_{mf} e redução nos valores da queda de pressão no leito. É possível afirmar que a redução de f e o aumento consecutivo de A, facilitam o escoamento de ar através das partículas em virtude da expansão do leito. Isto conseqüentemente reduziu a queda de pressão no leito, apesar de atrasar o início da fluidização.

Fazendo-se uma análise inversa, pode-se afirmar que o aumento da frequência de vibração (e redução da amplitude) tende a compactar o leito, dificultando o escoamento de ar, aumentando a queda de pressão e reduzindo a velocidade mínima de fluidização. Analisando-se as curvas de desvio padrão da queda de pressão representadas na Figura 4.25, percebe-se que a movimentação das partículas é intensificada pelo aumento de A, e que para maiores valores de velocidades de ar, as curvas apresentam algumas oscilações, indicando que esta movimentação torna-se mais intensa e desordenada.

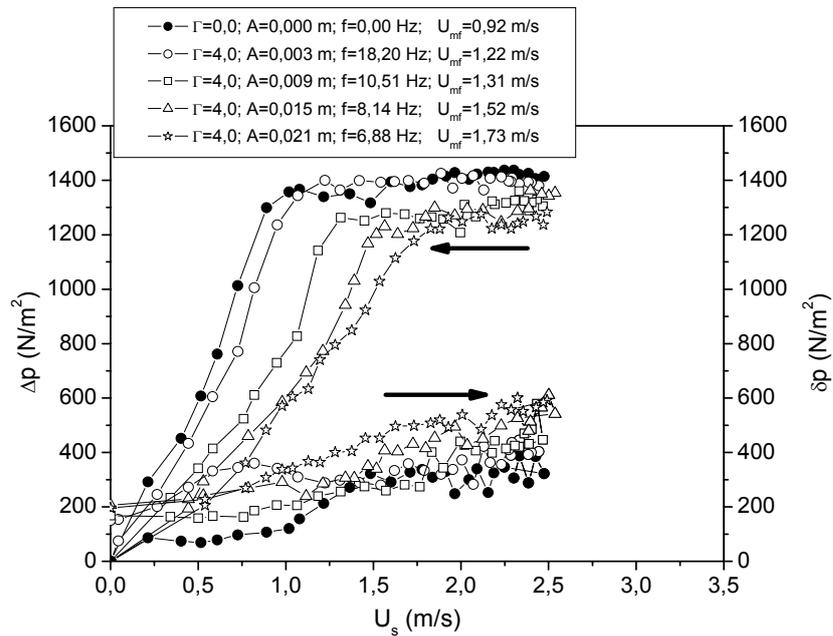


Figura 4.25: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m; $\Gamma = 4,00$; $\phi = 0,0000$.

A Figura 4.26 apresenta outra situação onde foram obtidos comportamentos diferentes para um mesmo Γ , agora na presença de glicerol. Observa-se que com o aumento da amplitude de vibração e a conseqüente redução da freqüência, há um aumento da velocidade mínima de fluidização e redução da queda de pressão no leito. Da mesma forma que o aumento de A possa ter favorecido a expansão do leito, o aumento de f pode ter compactado o leito, aumentando a queda de pressão. Por meio de uma análise visual do leito durante os experimentos, percebeu-se que em altas freqüências de vibração havia uma pequena incidência de bolhas. Já para altas amplitudes de vibração, a fluidização foi do tipo *slugging*. Este tipo de escoamento é ocasionado por grandes bolsões de ar ascendentes (maiores que um terço do diâmetro do leito), acompanhado por grandes flutuações de pressão (Baeyens e Geldart, 1974). Isto também explica o aumento do desvio padrão com o aumento de A , mostrado na Figura 4.26. Estas

curvas de desvio padrão indicam claramente que o comportamento fluidodinâmico para cada um dos casos é realmente muito dependente de A e f , para um mesmo Γ . Qualquer análise que possa ter sido feita na literatura utilizando ou dando ênfase apenas ao adimensional de vibração pode não estar reproduzindo coerentemente o comportamento em estudo.

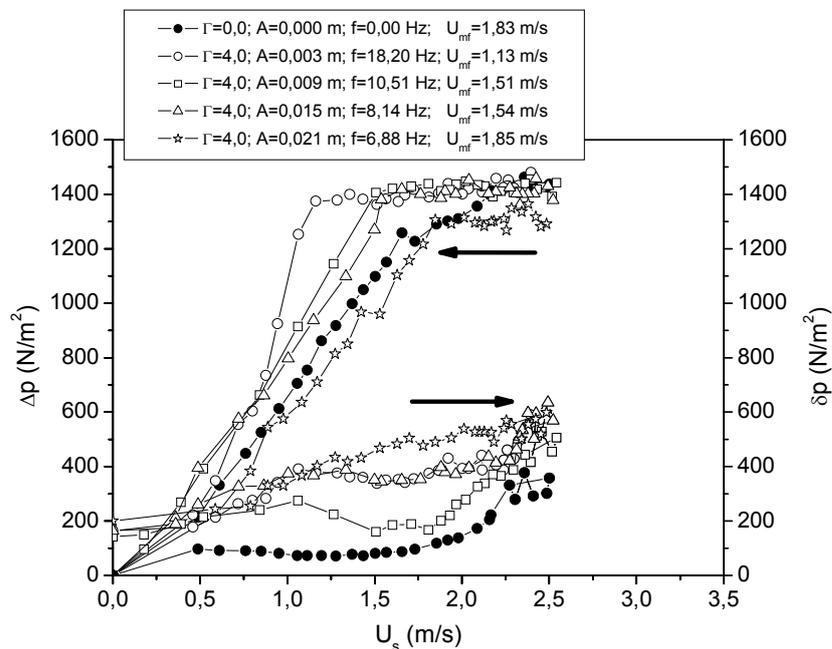


Figura 4.26: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m; $\Gamma = 4,00$; $\phi = 0,0072$.

Comparando-se os resultados apresentados nas Figuras 4.25 e 4.26, constata-se que a presença de líquido reduziu a influência dos parâmetros vibracionais sobre a queda de pressão, aproximando as curvas e tornando maiores os valores de U_{mf} correspondentes. A curva para o leito fluidizado na presença de glicerol (Figura 4.26) apresentou menor queda de pressão e maior U_{mf} , quando comparado à queda de pressão para o leito fluidizado na ausência de glicerol (Figura 4.25). A formação de canais preferenciais facilitou a

passagem de ar através do leito de partículas, reduzindo a queda de pressão e aumentando os valores de U_{mf} . Neste caso em particular, a redução destes canais preferenciais e a antecipação do início da fluidização poderiam ser conseguidos aplicando-se a vibração no leito, utilizando baixas amplitudes e altas frequências de vibração, por exemplo.

A Figura 4.27 reproduz o resultado obtido quando são aplicados diferentes níveis de amplitude e de frequência de vibração combinadas para fornecer um único adimensional de vibração, na ausência de glicerol e para o maior diâmetro de inerte estudado nesta parte do trabalho ($d_p = 3,68 \times 10^{-3}$ m). A grande distinção de comportamento entre as curvas de queda de pressão nesta figura, deixa claro que o adimensional de vibração não deve ser utilizado como único parâmetro para configurar o efeito vibracional na fluidodinâmica do leito, pelo menos em condições operacionais semelhantes às apresentadas neste trabalho. Qualquer análise que possa ter sido feita na literatura utilizando ou dando ênfase apenas ao adimensional de vibração (prática bastante comum) pode não estar reproduzindo corretamente o comportamento em estudo. Com relação à velocidade mínima de fluidização e a queda de pressão, os comportamentos qualitativos observados são semelhantes aos observados na Figura 4.25, dispensando maiores comentários aqui. Observa-se, porém, que o aumento do diâmetro das partículas inertes provoca o aumento da velocidade mínima de fluidização, quando comparadas as Figuras 4.25 e 4.27. Certamente, o aumento do tamanho das partículas inertes faz com que maiores velocidades de ar sejam necessárias para iniciar a sustentação dos inertes, como constatado na literatura de base sobre fluidização.

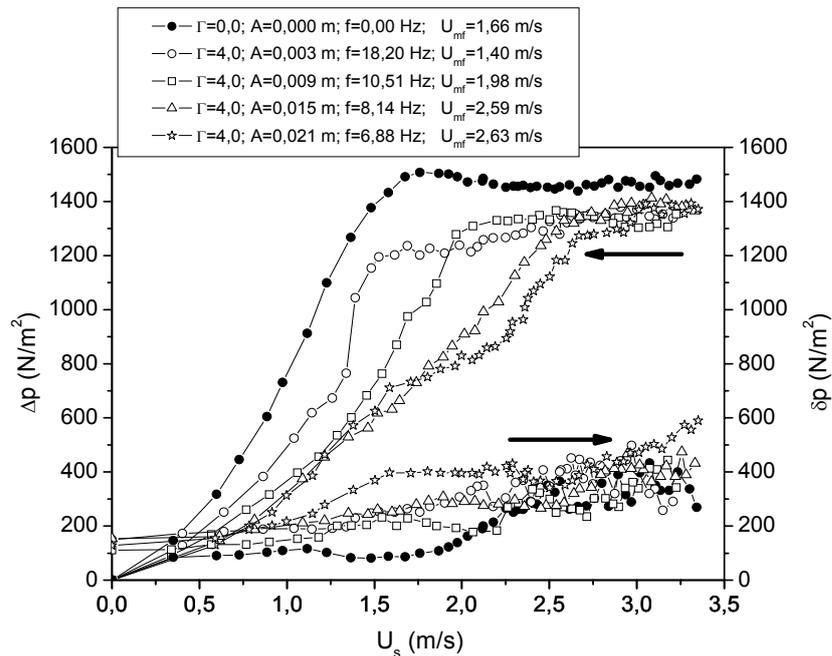


Figura 4.27: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $d_p = 3,68 \times 10^{-3}$ m; $\phi = 0,0000$.

O último caso apresentado mostra novamente a obtenção de comportamentos diferentes para um mesmo Γ , agora na presença de grande quantidade de glicerol ($\phi = 0,0072$) e para a partícula de maior diâmetro usada nesta parte do estudo ($d_p = 3,68 \times 10^{-3}$ m). Esta situação é apresentada somente para demonstrar outra situação em que o adimensional de vibração não pode ser utilizado como um parâmetro universal, para descrever o comportamento fluidodinâmico do leito, e que sua natureza é fortemente dependente da proporção entre a amplitude e a frequência de vibração. O comportamento fluidodinâmico apresentado na Figura 4.28 é qualitativamente muito semelhante ao apresentado na Figura 4.26 e as observações feitas anteriormente são válidas também para este caso.

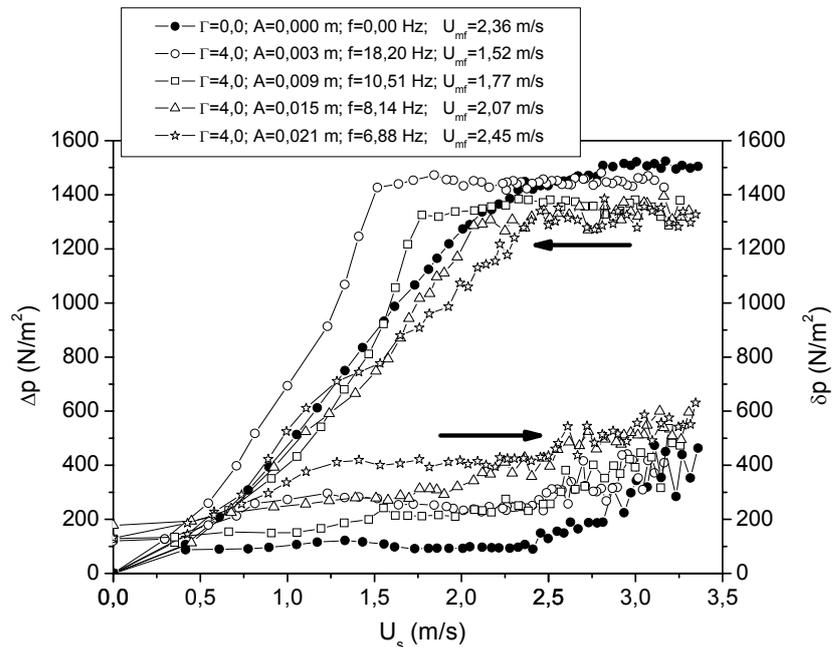


Figura 4.28: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $d_p = 3,68 \times 10^{-3}$ m; $\phi = 0,0072$.

Deve-se ressaltar que, a redução da queda de pressão e também o aumento do desvio padrão demonstrado nas Figuras 4.25 a 4.28, em moderadas velocidades de ar, expressa a expansão do leito como foi afirmado anteriormente. Esta verificação ocorreu nestes casos, quando o leito foi vibrado utilizando altas amplitudes de vibração e baixas frequências. Enquanto o escoamento de ar tenta suspender as partículas, a vibração (a alta amplitude e baixa frequência) arremessa as partículas ascendentemente expandindo o leito e reduzindo a queda de pressão, além de modificar os padrões de escoamento característicos com referência ao leito fluidizado. Essas colisões são mais intensas para partículas de maior diâmetro do que para as menores como é explicado por Geldart (1973). O que ocorre é que as partículas de menor diâmetro se apresentam em quantidades muito maiores em um mesmo volume, dissipando muito mais a força vibracional adicionada ao leito, enquanto as

partículas maiores além de dissiparem menos a energia vibracional, apresentam maior inércia. Deve-se acrescentar que, na presença de glicerol as forças coesivas são maiores para partículas menores, fazendo com que o leito se aglomere mais facilmente. Isso explica em parte, porque o comportamento descrito para leitos com partículas menores é menos pronunciado sob o efeito da vibração, que nos casos utilizando partículas maiores.

Para analisar o efeito isolado da frequência de vibração, primeiro manteve-se a amplitude em 0,003 m e variou-se a frequência de modo a se obter variação no adimensional de vibração entre 0,00 e 4,00, sem a presença de glicerol (Figura 4.29). Nota-se que a variação do adimensional de vibração para uma baixa amplitude não produziu resultados com uma tendência bem definida. Isto é, com o aumento da frequência de vibração, a queda de pressão diminuiu levemente até $\Gamma = 2,00$ e, para $\Gamma = 4,00$ aumentou e se aproximou da curva para o leito fluidizado ($\Gamma = 0,00$). Provavelmente para Γ até 2,00, o leito apresenta uma tendência à expansão e, para $\Gamma = 4,00$ o leito compactou-se. A dificuldade de definição do tipo de comportamento observado neste caso se deve à baixa amplitude de vibração aplicada ao leito. Na literatura especializada é muito comum encontrar leitos operando a baixas amplitudes de vibração, muitas vezes por limitações mecânicas ou estruturais ou devido à utilização de vibradores eletromagnéticos (dispositivo que opera com baixa amplitude de vibração). Isto deve ser levado em consideração quando se tenta entender os fenômenos que ocorrem em um leito de partículas submetido à vibração, evitando incongruências ou descrições de comportamento equivocadas.

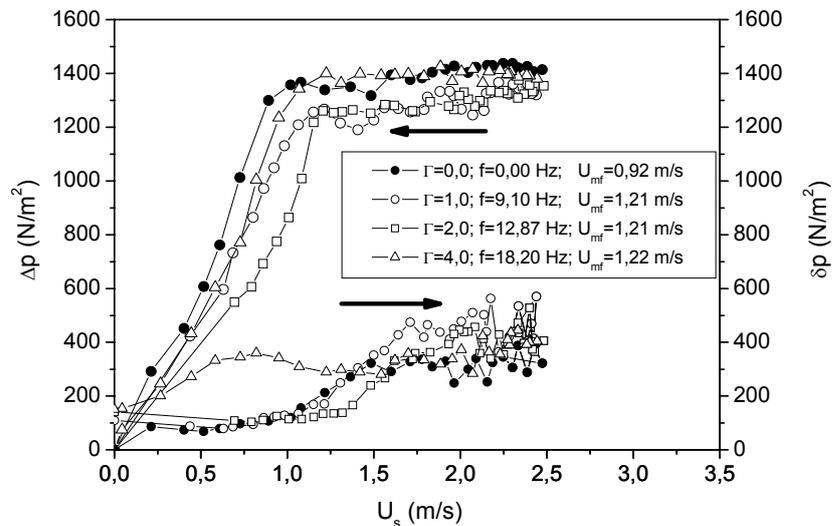


Figura 4.29: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $A = 0,003$ m; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m; $\phi = 0,0000$.

A Figura 4.30 exibe as mesmas condições experimentais apresentadas na Figura 4.29, só que com um filme de glicerol recobrindo as partículas ($\phi = 0,0072$). Nesta figura, observa-se que o aumento do adimensional de vibração (por meio do aumento da frequência de vibração) na presença de líquido, tornou maiores os valores de queda de pressão, principalmente próximo à região de mínima fluidização. Este é um comportamento claro de que a vibração auxiliou o rompimento das pontes líquidas, rearranjando as partículas de modo a minimizar os espaços intersticiais, reduzindo assim a permeabilidade do leito, aumentando a perda de carga. O bloqueio dos canais preferenciais dificulta a passagem de ar, fazendo neste caso com que sejam reduzidos os valores de velocidade mínima de fluidização. Por meio da Figura 4.30, constata-se um aumento grande dos valores do desvio padrão da queda de pressão em $\Gamma = 4,00$. Neste caso em particular, provavelmente o alto valor de frequência de vibração (18,20 Hz) fez com que houvesse grande compactação do leito, e o mesmo moveu-

se como se fosse um bloco rígido, pressionando o fluido (ar) entre o bloco e a placa distribuidora de modo alternado, provocando grandes oscilações na pressão.

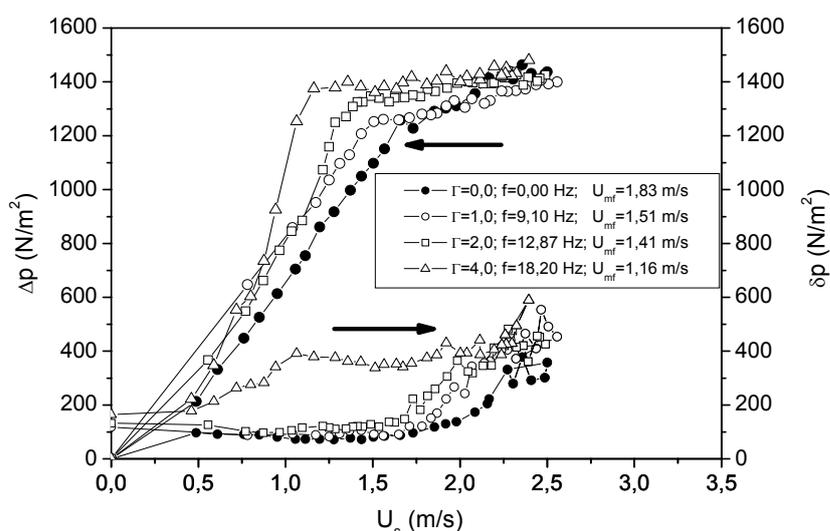


Figura 4.30: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $A = 0,003$ m; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m; $\phi = 0,0072$.

Na Figura 4.31 manteve-se agora uma alta amplitude de vibração (0,021 m), e variou-se a frequência de modo a se obter adimensional de vibração entre 0,00 até 4,00, sem a presença de glicerol. Ao contrário do que fora observado nas duas figuras anteriores, aumentando-se a frequência de vibração (em uma alta amplitude de vibração), percebe-se uma substancial redução da queda de pressão do leito. Para altas amplitudes, o aumento da frequência de vibração tende a expandir o leito, de forma a facilitar a passagem de ar por entre as partículas, reduzindo a queda de pressão. Como o ar escoar mais facilmente através do leito, maiores velocidades de ar são requeridas para que as partículas sejam “arrastadas” e iniciem a sua fluidização.

Assim, o aumento da frequência de vibração para altas amplitudes,

tende a arremessar as partículas ascendentemente com maior intensidade facilitando a expansão do leito, já para baixas amplitudes, o aumento da frequência tende a melhorar o rearranjo das partículas, compactando o leito. Nota-se que o desvio padrão da queda de pressão mostra uma tendência ao aumento com o aumento da frequência de vibração, indicando o aumento na movimentação das partículas no leito com a expansão. Não será apresentada aqui, a figura ilustrando o efeito da frequência de vibração com uma alta amplitude, na presença de glicerol. O comportamento observado neste caso, segue a mesma tendência lógica apresentada na Figura 4.31, só que ponderado no efeito da presença de líquido.

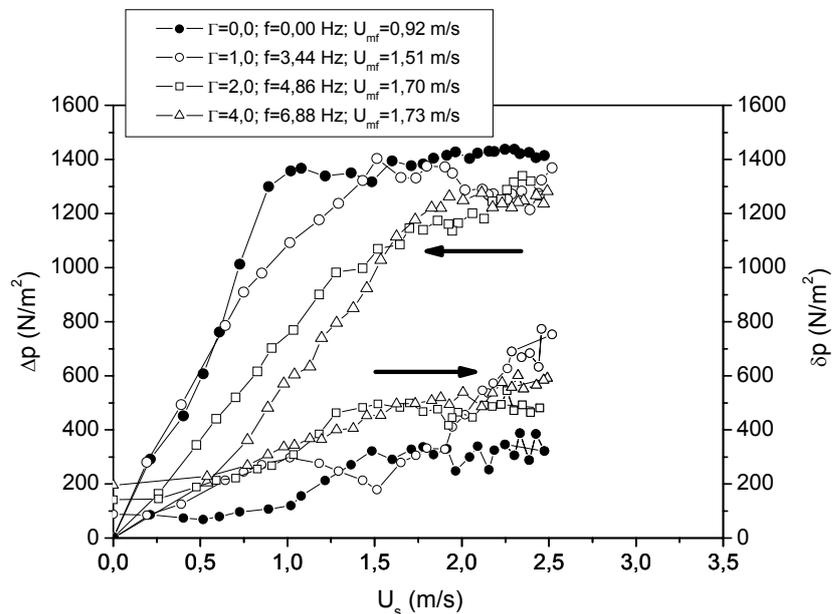


Figura 4.31: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $A = 0,021$ m; $d_p = 2,19 \times 10^{-3}$ m; $\phi = 0,0000$.

Neste trabalho, observou-se que o adimensional de vibração sozinho não representa de maneira única o comportamento fluidodinâmico do sistema. Isto

é, foram observados comportamentos fluidodinâmicos distintos para um mesmo adimensional de vibração, obtido de diferentes combinações entre amplitude e frequência de vibração. Crê-se com isto, que este tipo de comportamento observado na fluidodinâmica poderá também ocorrer com a transferência de calor e de massa. Assim, os parâmetros para transferência de calor e de massa devem ser também, funções do adimensional de vibração, da amplitude e da frequência. Com estes estudos relacionados aos parâmetros vibracionais, pretende-se expandir a discussão sobre a melhor forma de utilização destes parâmetros para caracterizar um processo. Conseqüentemente, a sua utilização deve ser avaliada em outros tipos de estudos em leito vibrofluidizado. Com base nestes resultados apresentados até aqui, fica claro que o adimensional de vibração deve ser utilizado com muita cautela, se for o único parâmetro para configurar o efeito vibracional na fluidodinâmica do leito. Sugere-se a utilização da amplitude ou da frequência de vibração além do adimensional de vibração para melhor caracterização do efeito vibracional sobre o comportamento fluidodinâmico do leito.

4.2.4 Efeito do Diâmetro das Partículas Inertes

Alguns exemplos para analisar a influência do tamanho das partículas inertes são apresentados nas Figuras 4.32, 4.33 e 4.34.

No primeiro caso, avaliou-se a influência do diâmetro das partículas para o leito fluidizado e sem a adição de líquido (Figura 4.32). Nota-se nesta figura que a variação do diâmetro das partículas exerce uma influência significativa nas curvas de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para a região de leito fixo, demonstrando a sua dependência com a variação

da permeabilidade do leito. Entretanto, a queda de pressão quando o regime fluidizado já estava estabelecido sofreu pouca influência do diâmetro das partículas. Neste caso, após o início da fluidização a queda de pressão torna-se dependente quase que exclusivamente da massa total de partículas (a mesma para os três tamanhos), que é mantida suspensa devido ao equilíbrio entre a força de arraste (empuxo) e a força peso. Esse efeito é praticamente independente do tamanho das partículas (nesta faixa de tamanhos), salientando que nesta análise não estão presentes nem a vibração, nem o glicerol.

Constata-se na Figura 4.32 que, a velocidade mínima de fluidização aumenta significativamente com o aumento do tamanho dos inertes. Este fato pode ser explicado pela maior dificuldade que o ar tem de arrastar partículas de maior tamanho e mesma densidade, exigindo assim maiores velocidades de ar em função do seu maior peso individual. Nesta mesma figura, observam-se mudanças significativas no desvio padrão da queda de pressão na região de leito fluidizado, em função dos diferentes tamanhos das partículas. Na região de leito fixo, o desvio padrão permaneceu quase inalterado em um baixo patamar (inferior a 120 N/m^2), independente do tamanho da partícula. De uma forma geral, observa-se que para o maior diâmetro de partículas o desvio padrão é menor. Isso é provocado pela diferença na dinâmica do leito ocasionada pela diferença de dimensão das partículas, neste caso, quanto maior é o tamanho das partículas, menor é a movimentação das mesmas no leito para uma mesma velocidade de ar. Por exemplo, partículas com menor tamanho são mais propensas à formação de bolhas e a movimentação destas no leito é mais intensa, mesmo a baixas vazões de ar. Verifica-se que, quando o leito já está fluidizado, ocorrem oscilações nas curvas

de desvio padrão e estas oscilações foram provocadas justamente pelo aparecimento de bolhas, sendo mais intensas quanto menores os diâmetros das partículas. Para o maior tamanho de inertes ($3,68 \times 10^{-3}$ m) e para velocidades de ar acima de 2,5 m/s, verifica-se que o leito se apresenta no regime de fluidização turbulenta, onde a movimentação das partículas é muito intensa, evidenciado na Figura 4.32 por meio do desvio padrão da queda de pressão.

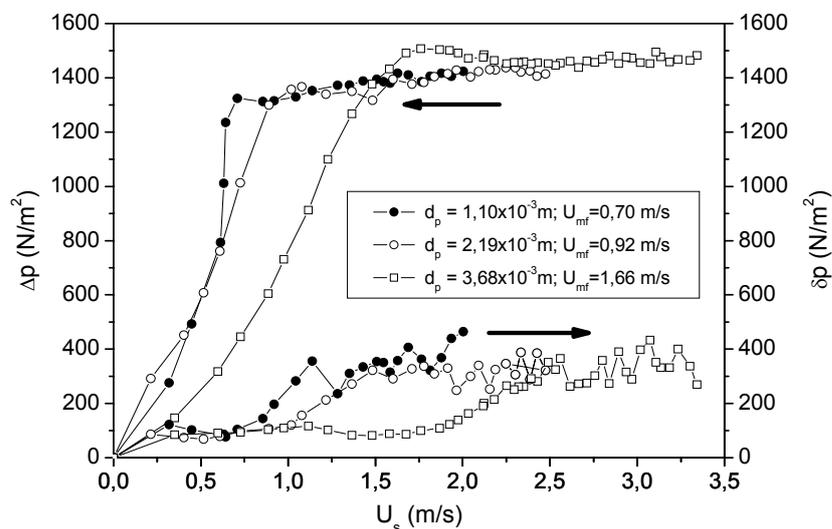


Figura 4.32: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 0,00$; $\phi = 0,0000$.

A Figura 4.33 apresenta os resultados para as mesmas condições experimentais da Figura 4.32, só que na presença de glicerol. De uma forma geral, a variação do diâmetro das partículas inertes exerce influência significativa sobre a queda de pressão no leito e sobre o seu desvio padrão. Verifica-se que todas as curvas apresentam uma atenuação na região de transição entre o leito fixo e o fluidizado, isto é, esta transição ocorre de forma gradual. Isto possivelmente indica que a presença de glicerol no leito fluidizado tornou o regime fluidizado

irregular, caracterizado pela presença de muitos canais preferências, que reduziram a queda de pressão principalmente na região de leito fixo. Com o aumento do diâmetro das partículas inertes, verifica-se que o início da fluidização ocorre a velocidades muito maiores que as apresentadas na Figura 4.32, sem o glicerol. Nestes casos, as ações das forças coesivas, adesivas e viscosas somadas ao peso das partículas dificultam o “rompimento” do leito e o desenvolvimento de uma fluidização regular e de qualidade. Na Figura 4.33 nota-se que a adição de líquido estende os baixos valores de desvio padrão, quando comparadas ao caso sem líquido da Figura 4.32. Esta constatação indica que o glicerol manteve o leito fixo até maiores velocidades de ar.

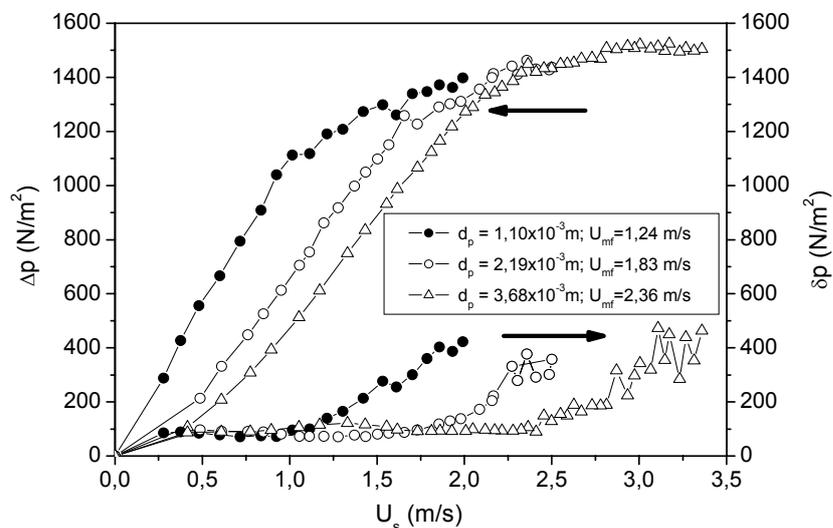


Figura 4.33: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 0,00$; $\phi = 0,0072$.

Para o leito vibrofluidizado ($\Gamma = 4,00$; $A = 0,003$ m e $f = 18,20$ Hz) e na presença de glicerol, aparecem patamares de pressão praticamente constantes após o início da fluidização (Figura 4.34). Neste caso, o início da fluidização

ocorreu de forma mais abrupta, ocasionada pelo bloqueio dos canais preferenciais à passagem de ar com a vibração mecânica. Verifica-se novamente o aumento da velocidade mínima de fluidização com o aumento do diâmetro das partículas inertes, só que por meio de comparação entre as Figuras 4.33 e 4.34, verifica-se que a vibração reduziu estes valores, nestes parâmetros vibracionais. O desvio padrão apresentado na Figura 4.34 também é superior ao da Figura 4.33, ocasionado devido às oscilações de pressão decorrentes da vibração.

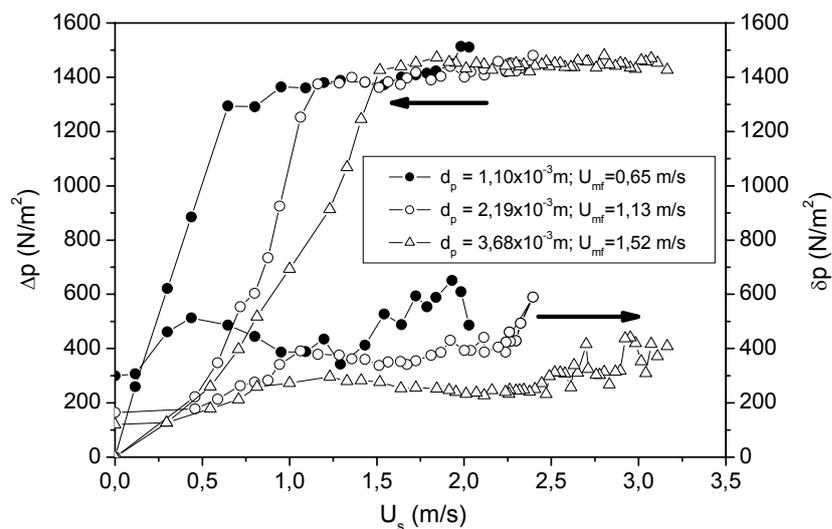


Figura 4.34: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 4,00$; $A = 0,003$ m; $f = 18,20$ Hz; $\phi = 0,0072$.

Os demais resultados obtidos durante esta experimentação, possuem as mesmas características dos casos aqui apresentados. Deve-se ressaltar, apenas, que a redução do diâmetro das partículas atenuou alguns comportamentos observados aqui, isto é, os principais efeitos observados foram mais intensos para os dois maiores diâmetros de partículas.

4.3 Efeito da Distribuição de Partículas sobre a Fluidodinâmica e a Segregação

Nestes experimentos, o leito foi operado com vibração e aeração (vibrofluidizado), com vibração (vibrado) e com aeração e sem vibração (fluidizado). Para assegurar a qualidade dos dados obtidos, fizeram-se réplicas de todos os experimentos. A estrutura básica do leito e as adaptações necessárias para estes experimentos foram descritas no item 3.2. Como inertes empregaram-se esferas de vidro tipo “ballotini” com diâmetros médios de $1,29 \times 10^{-3}$, $2,18 \times 10^{-3}$ e $3,67 \times 10^{-3}$ m, respectivamente. A massa total de inertes utilizada para cada experimento foi de 1,6 kg, correspondendo a uma altura de leito estático de 0,10 m. Foram utilizadas quatro distribuições de tamanhos de partículas inertes (referência, binária, plana e gaussiana), conforme a Tabela 3.7. Para compor as distribuições, empregaram-se partículas com três diâmetros médios de peneira, compostas para que contivessem o mesmo diâmetro médio de Sauter ($d_s = 2,18 \times 10^{-3}$ m) em cada distribuição, conforme a definição apresentada na Equação 27.

Escolheu-se diferentes combinações entre amplitude (A) e frequência de vibração (f), de modo que combinadas fornecessem um mesmo valor de adimensional de vibração (Γ), descritos na Tabela 3.6. Os experimentos fluidodinâmicos foram realizados seguindo o procedimento padrão detalhado no item 3.1.1. Nestes experimentos, determinou-se a velocidade de fluidização completa (U_{fc}) como sendo a mínima velocidade em que todas as partículas da mistura estão suspensas pelo ar (Gauthier *et al.*, 1999). Nos experimentos de segregação, para garantir que todas as partículas estivessem realmente suportadas pelo ar, manteve-se a velocidade superficial

de ar 10% acima da velocidade de fluidização completa (U_{fc}). Os sólidos foram coletados em três posições axiais medidas em relação à base do leito; em 0,00, 0,05 e 0,10 m, para toda seção transversal em cada posição axial. Foram obtidas imagens digitais (fotos e vídeos) de todos os experimentos de segregação. As fotografias foram obtidas para auxiliar na descrição dos comportamentos em cada caso e os vídeos, para determinar a porosidade média do leito, por meio da determinação visual da altura média do leito durante o experimento. As réplicas das curvas características e de desvio padrão da queda de pressão foram obtidas para todos os casos nesta etapa experimental, mas a título de exemplo, serão apresentados apenas dois casos, um para o leito fluidizado (Figura 4.35) e o outro para o leito vibrofluidizado (Figura 4.36). Utilizou-se em ambos os casos, distribuição de partículas do tipo plana, sendo que os demais casos encontram-se no Apêndice C.

A Figura 4.35 exibe curvas típicas para o leito fluidizado, sendo possível identificar o ponto de transição do leito fixo para o leito fluidizado. As duas curvas características estão praticamente sobrepostas, mostrando a boa reprodutibilidade dos dados obtidos nestas condições e para a distribuição plana, onde as pequenas diferenças entre a medida e a sua réplica são inferiores a 2,5% em praticamente toda a extensão de U_s . Esta figura apresenta também o desvio padrão da queda de pressão, sendo que as curvas para a medida e a sua réplica também estão sobrepostas até velocidades de ar próximas a 1,55 m/s. Acima desta velocidade, a fluidização já é bem vigorosa e a intensificação da movimentação das partículas somadas com uma possível segregação, podem ter provocado este aumento na diferença entre a medida e a

réplica. Mesmo assim, a diferença percentual média entre as duas curvas foi de aproximadamente 3,4 %.

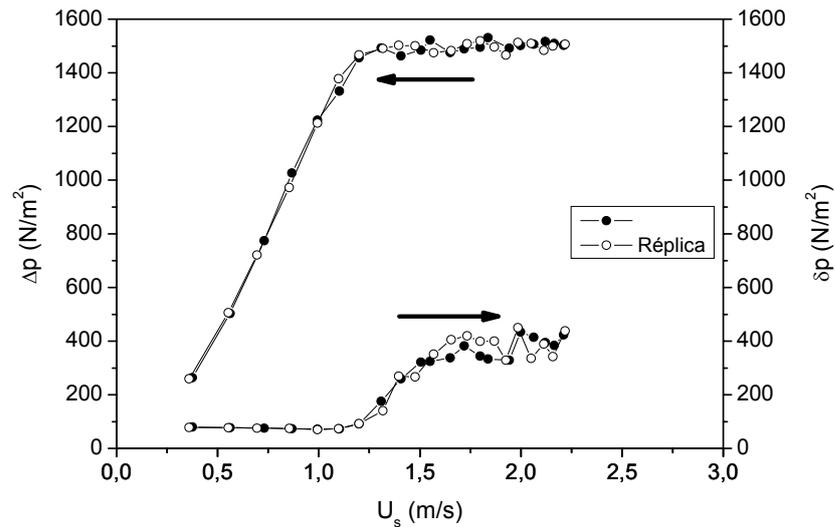


Figura 4.35: Réplica da queda de pressão no leito e do seu desvio padrão em função de U_s ; distribuição plana; $d_s = 2,18 \times 10^{-3}$ m; $\Gamma = 0,00$.

Na presença de vibração, as curvas características e de desvios padrões também apresentaram boa reprodutibilidade, conforme é constatado na Figura 4.36. Sob condição vibratória (a baixa amplitude e alta frequência) nota-se que logo após o início da fluidização as curvas de desvio padrão da queda de pressão se distanciam um pouco, mas subsequentemente retornam em patamares semelhantes entre si. Isto pode estar indicando que esta distribuição plana de partículas nestas condições experimentais, apresentou uma alternância de comportamentos, provavelmente devido às modificações na conformação (rearranjo) das partículas em função de uma possível segregação. Uma análise mais profunda sobre a ocorrência de segregação será apresentada posteriormente.

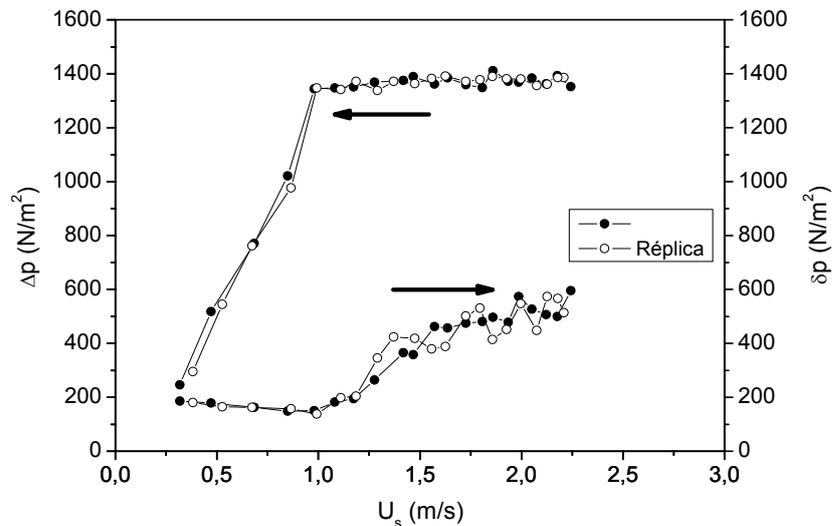


Figura 4.36: Réplica da queda de pressão no leito e do seu desvio padrão em função de U_s ; distribuição plana; $d_s = 2,18 \times 10^{-3}$ m; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,003$ m; $f = 12,87$ Hz.

A Figura 4.37 mostra as curvas características e o desvio padrão da queda de pressão para as partículas uniformes e para as distribuições, na configuração de leito fluidizado. Na figura 4.37 (a), observa-se um comportamento típico quando se aumenta o tamanho da partícula inerte, isto é, verifica-se o aumento da velocidade, na qual as partículas iniciam a fluidização, e a redução da queda de pressão na região de leito fixo. Isto ocorre, uma vez que partículas maiores (mais pesadas) requerem maiores vazões de ar para iniciarem a fluidização, isto é, para que ocorra um equilíbrio entre força de arraste e a gravitacional e os sólidos sejam mantidos suspensos. Na região de leito fixo, como as partículas maiores apresentam maior permeabilidade, o ar escoava mais facilmente, tornando menor a queda de pressão.

Na Figura 4.37 (b), observa-se pouca influência das distribuições sobre a queda de pressão no leito, onde apenas a curva para a distribuição binária apresentou queda de pressão levemente inferior, na região de transição entre leito fixo e fluidizado. Já quando se observa o comportamento da distribuição binária por

meio do desvio padrão da queda de pressão, nota-se claramente que houve um atraso no momento em que se inicia a fluidização completa do leito. Comparando-se as Figuras 4.37 (a) e (b), constata-se que as distribuições de partículas (todas com diâmetro médio de Sauter de $2,18 \times 10^{-3}$ m) apresentam um comportamento próximo ao observado para a partícula com diâmetro médio de $2,18 \times 10^{-3}$ m, com a maior diferença para a distribuição binária. Isto é um indicativo de que a utilização do diâmetro médio de Sauter pode ser uma boa referência para distribuições de partículas com estas características, nas frações apresentadas na Tabela 3.7.

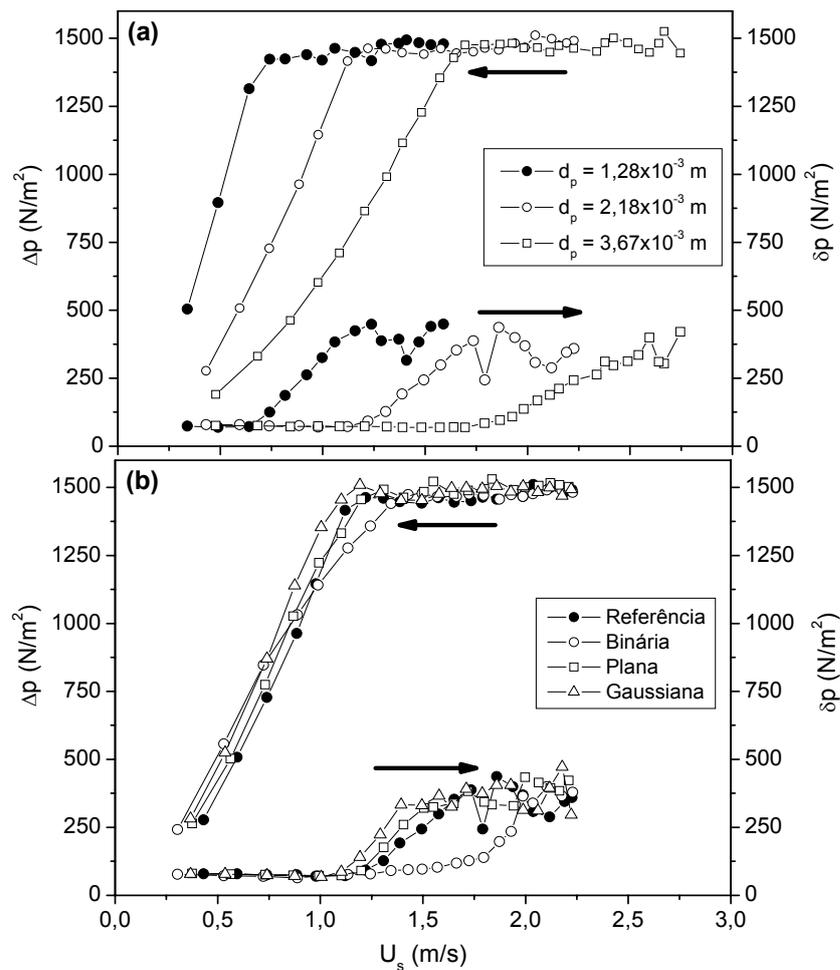


Figura 4.37: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 0,00$; (a) tamanhos uniformes; (b) distribuições.

Nas Figuras 4.38 (a) e (b), pode-se observar que a aplicação de uma vibração a baixa amplitude e alta frequência não provocou alterações significativas no comportamento dinâmico do leito, quando comparados aos casos apresentados na Figura 4.37. Com esta intensidade vibracional, nota-se que há uma pequena redução na U_{mf} para as distribuições plana e gaussiana, com relação à distribuição binária e a partícula de referência. Novamente, nota-se não ser muito grande a diferença entre os comportamentos observados entre as distribuições e a partícula de referência, só que com a vibração, a diferença maior é para a distribuição gaussiana.

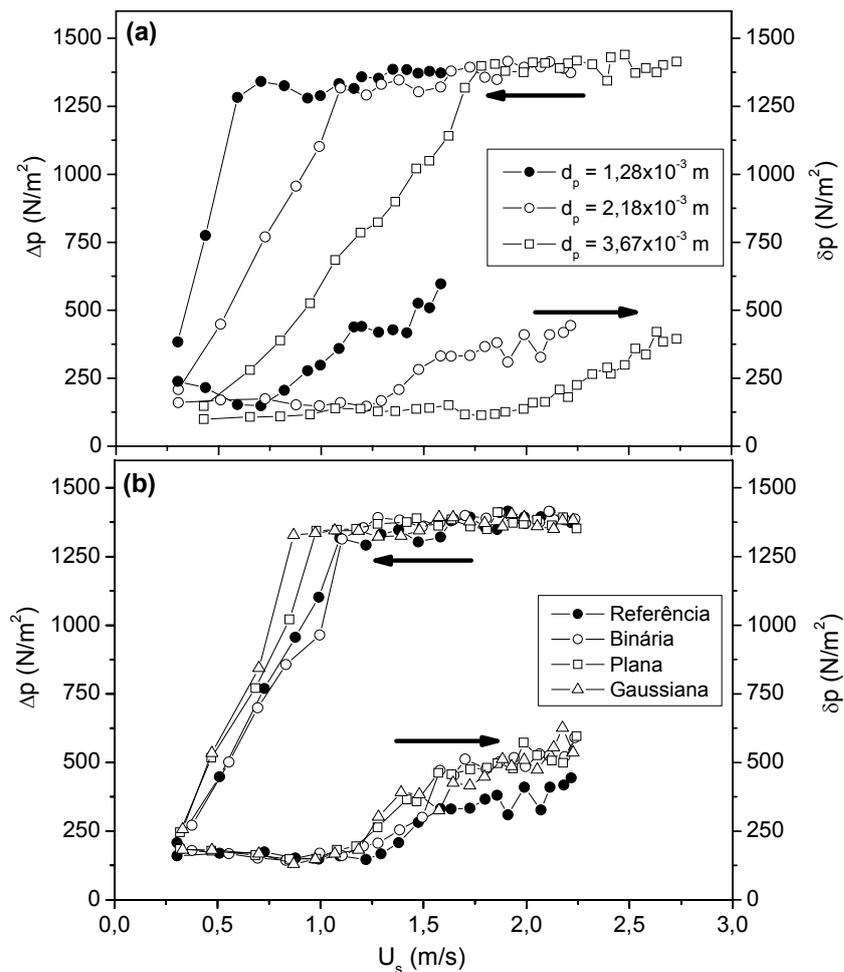


Figura 4.38: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,003$ m; $f = 12,87$ Hz; (a) tamanhos uniformes; (b) distribuições.

Nas Figuras 4.39 (a) e (b), observa-se que a aplicação de uma vibração a alta amplitude (0,009 m) e baixa frequência (7,43 Hz) tem um efeito mais significativo sobre a dinâmica das partículas, que no caso apresentado pela Figura 4.38. O aumento da amplitude de vibração (e redução da frequência) provocou uma tendência à expansão do leito, de forma a facilitar a passagem de ar por entre as partículas, reduzindo a queda de pressão e suavizando a região de transição entre o leito fixo e o leito fluidizado.

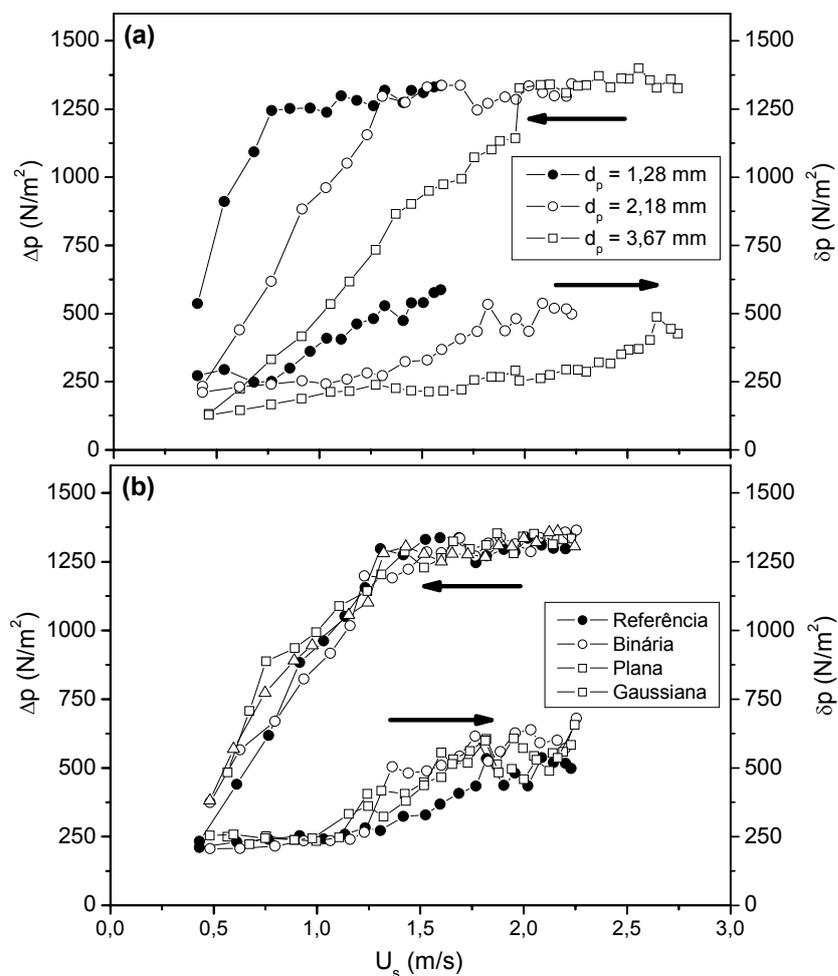


Figura 4.39: Queda de pressão no leito e seu desvio padrão em função de U_s ; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,009$ m; $f = 7,43$ Hz; (a) tamanhos uniformes; (b) distribuições.

Outra constatação importante que deve ser feita quando são comparadas as Figuras 4.38 e 4.39, é que em ambos os casos, o adimensional de vibração é o mesmo ($\Gamma = 2,00$), só que o comportamento fluidodinâmico observado nestes casos foi bem diferente. Na Figura 4.38 percebe-se que houve a compactação do leito com a aplicação de uma alta frequência (e baixa amplitude) de vibração, enquanto na Figura 4.39 verifica-se que houve a expansão do leito com a aplicação de uma alta amplitude (e baixa frequência) de vibração. Isto reforça a constatação feita no item 4.2, de que o adimensional de vibração não deve ser utilizado como único parâmetro para caracterizar o efeito da vibração sobre a fluidodinâmica do leito vibrofluidizado.

A Figura 4.40 (a) apresenta a fração mássica das partículas para a mistura binária, em leito fluidizado e a Figura 4.40 (b), uma fotografia do leito em operação, coletada durante o experimento. Analisando a Figura 4.40 (a), verifica-se que para o leito fluidizado houve a segregação das partículas, já que houve um gradiente de concentração em todas as posições no leito, tomando como base a mistura inicial (representada pelo símbolo cheio na figura). Tanto na Figura 4.40 (a) quanto na Figura 4.40 (b), nota-se que as partículas menores migraram para superfície do leito, arrastadas pelo ar, e as maiores permaneceram em maior quantidade na parte inferior do leito, de acordo com o que sugere a literatura. Na região mediana do leito, a concentração de ambas as partículas foi de aproximadamente 50%, que apesar de estarem na mesma proporção, diferem da mistura inicial, indicando a segregação. Apesar das partículas maiores da mistura estarem se movimentando com o escoamento de ar, permanecem quase na sua totalidade na parte inferior do leito, concentradas da base até altura de

aproximadamente 0,05 m. Neste caso, o escoamento de ar consegue “arrastar” mais intensamente as partículas menores (mais leves), fazendo com que estas fiquem acima das maiores. Da Figura 4.40 (b), percebe-se nitidamente a separação entre as partículas grandes e as pequenas, em H aproximadamente igual a 0,05 m (contado a partir da base do leito). Para este caso, a porosidade média do leito determinada por meio da altura média do leito (com a análise do vídeo digital) ficou em aproximadamente 0,54, sendo que a de leito estático é de aproximadamente 0,37.

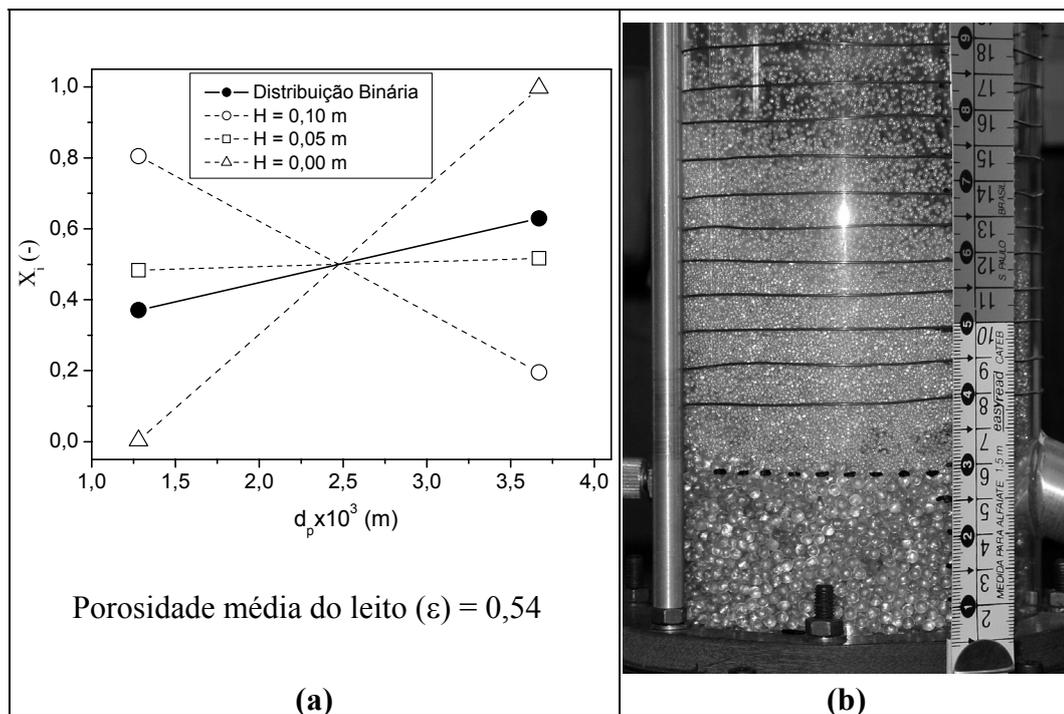


Figura 4.40: Leito fluidizado; $\Gamma = 0,00$; $U_s = 1,57$ m/s; (a) X_i em função de d_p ; (b) fotografia do leito em operação.

A Figura 4.41 (a) apresenta a fração mássica das partículas para mistura binária, em leito vibrofluidizado a baixa amplitude de vibração (0,003 m) e a alta frequência (12,87 Hz). A Figura 4.41 (b) mostra uma fotografia do leito em operação, coletada durante o experimento. Com a adição desta intensidade de

vibração, percebe-se que houve uma melhora na mistura das partículas, quando comparadas ao caso para o leito fluidizado. Houve a segregação das partículas, novamente com a migração das menores para parte superior do leito e das maiores para base. Exatamente no meio, a concentração das partículas está próxima a da mistura inicial, mas como o leito deve ser analisado como um todo, neste caso ocorreu também a segregação. Mesmo assim, esta intensidade de vibração foi suficiente para melhorar a mistura de duas partículas com uma grande diferença de tamanhos. Por meio da Figura 4.41 (b) constata-se o que foi verificado para a Figura 4.41 (a), isto é, melhora da mistura das partículas, com maior concentração de partículas pequenas no topo e de partículas maiores na base. Neste caso, obteve-se porosidade média de aproximadamente 0,52, valor um pouco menor que para o leito fluidizado (0,54), indicando uma tendência à compactação do leito.

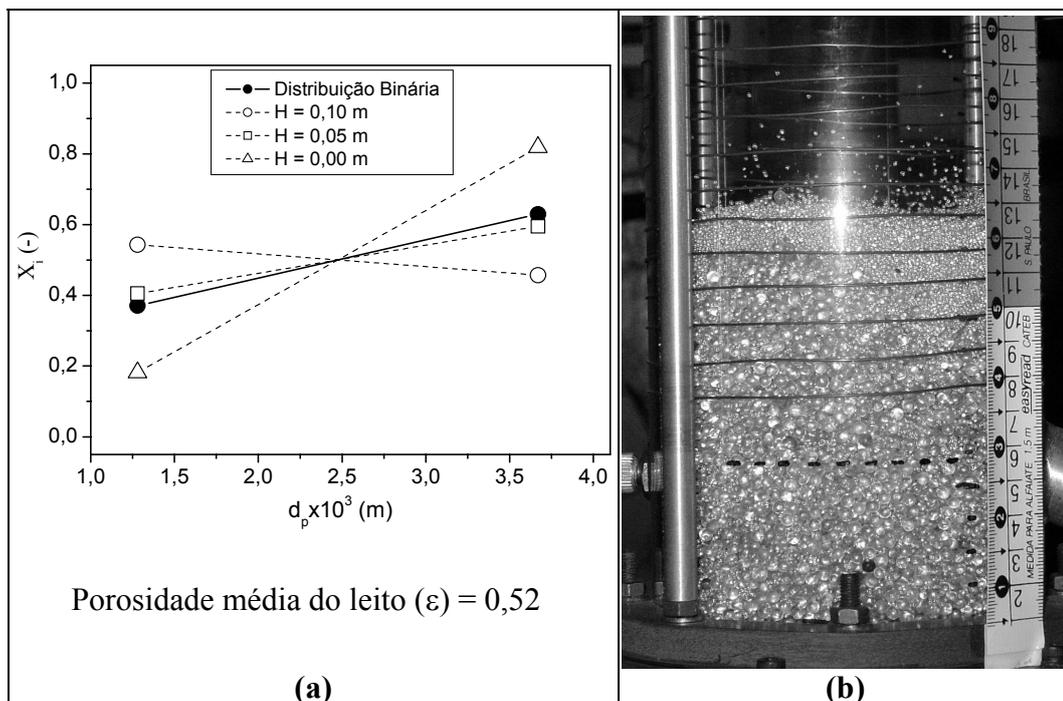


Figura 4.41: Leito vibrofluidizado; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,003$ m; $f = 12,87$ Hz; $U_s = 1,33$ m/s; (a) X_i em função de d_p ; (b) fotografia do leito em operação.

Na Figura 4.42 (a), para o leito vibrofluidizado a alta amplitude (e baixa frequência), percebe-se que a concentração das partículas em todo o leito é aproximadamente a mesma da mistura inicial, e nesta condição praticamente não ocorre a segregação granulométrica, a menos de uma pequena região logo acima da placa distribuidora. Observando-se a Figura 4.42 (b), nota-se que a alta amplitude de vibração (e baixa frequência), o leito se apresenta bastante expandido, quando comparado à Figura 4.41 (b), à baixa amplitude de vibração. Com altas amplitudes de vibração, as partículas são arremessadas mais intensamente pela placa distribuidora, apresentando um padrão de escoamento do tipo *slugging*, misturando as partículas grandes que estavam na base com as partículas menores que eram mantidas suspensas no topo do leito. Neste caso, esta intensidade de vibração provavelmente faz com que as forças atuando sobre as partículas menores (principalmente de arraste e gravitacional) se equilibrem com as que atuam sobre as maiores (arraste, gravitacional e inercial, por exemplo), de modo a mantê-las suspensas e expandidas. A grande expansão do leito pode ser constatada por meio da Figura 4.42 (b) e da porosidade média obtida (neste caso, 0,61), em comparação com a Figura 4.41 (b), situação que apresentou porosidade média de 0,52. Deve-se ressaltar, que em ambos os casos (Figuras 4.41 e 4.42) o adimensional de vibração é o mesmo ($\Gamma = 2,00$). Mais uma vez isto reforça a afirmação feita no item 4.2, de que o adimensional de vibração não deve ser utilizado como único parâmetro para caracterizar a vibração neste tipo de leito, isto é, o adimensional de vibração não apresentou características universais nestas condições experimentais.

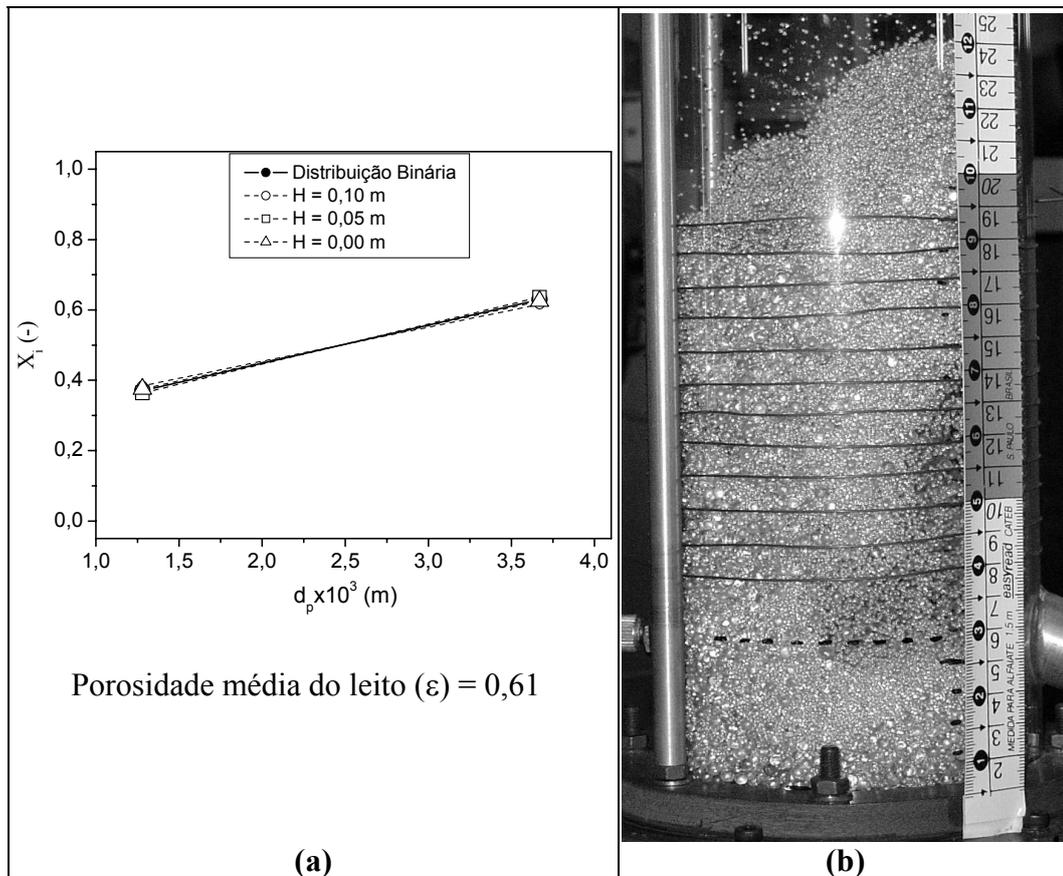


Figura 4.42: Leito vibrofluidizado; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,009$ m; $f = 7,43$ Hz; $U_s = 1,50$ m/s; (a) X_i em função de d_p ; (b) fotografia do leito em operação.

Na Figura 4.43 as condições experimentais são as mesmas que foram apresentadas na Figura 4.41, só que sem escoamento de ar (leito vibrado). Constatase na Figura 4.43 (a) que houve a migração das partículas menores para o fundo do leito, e na superfície, a concentração destas ficou próxima à da mistura inicial. Entretanto, analisando a Figura 4.43 (b), percebe-se que apesar de na Figura 4.43 (a) indicar uma mistura perfeita (pontual) das partículas na superfície do leito, isto não ocorreu na prática. Como houve a migração das partículas maiores para superfície, elas formaram uma barreira, impedindo algumas partículas menores de percolarem o leito até o fundo. Com a vibração, esta fina camada de partículas pequenas “isoladas” na superfície do leito, fica colidindo com esta barreira (de

partículas maiores), sendo arremessadas ascendentemente, não conseguindo penetrar na mistura. Assim, durante a coleta das partículas da camada superficial (em $H = 0,10$ m), eram sugadas tanto as grandes quanto a fina camada de pequenas logo na parte superior, visível na Figura 4.43 (b). Mesmo assim, verificou-se a ocorrência do “Efeito Castanha do Pará”, isto é, a migração das partículas maiores para superfície do leito. Ainda não é possível afirmar por meio da literatura especializada, quais são exatamente os fenômenos físicos responsáveis por esta migração das partículas maiores para a superfície do leito (ou das menores para o fundo), com a vibração. De qualquer forma, constata-se aqui que a vibração (sem escoamento de ar) faz com que ocorra a migração das partículas maiores para a superfície do leito, e o escoamento de ar (sem a vibração) arrasta as partículas menores para a superfície. Somando estes dois parâmetros (vibração mais escoamento de ar) em determinadas condições operacionais, é possível obter um equilíbrio de tal forma que ocorra melhora na mistura das partículas (vide Figura 4.42).

Na Figura 4.44 as condições experimentais são as mesmas que foram apresentadas na Figura 4.42, só que sem escoamento de ar. Verifica-se neste caso, que a aplicação de uma vibração à alta amplitude de vibração (0,009 m), baixa frequência (7,43 Hz) e sem escoamento de ar, melhora a mistura das partículas, quando comparado ao leito vibrado apresentado na Figura 4.43. Mesmo assim, verifica-se uma tendência ao “Efeito Castanha do Pará”. Verifica-se novamente (sem escoamento de ar) que para um mesmo adimensional de vibração (Figuras 4.43 e 4.44) com diferentes amplitudes e frequências de vibração, a dinâmica do leito não é a mesma. À alta amplitude (e baixa frequência) verifica-se a expansão do leito ($\varepsilon = 0,50$), já à alta frequência (e baixa amplitude), verifica-se a compactação do leito ($\varepsilon = 0,40$).

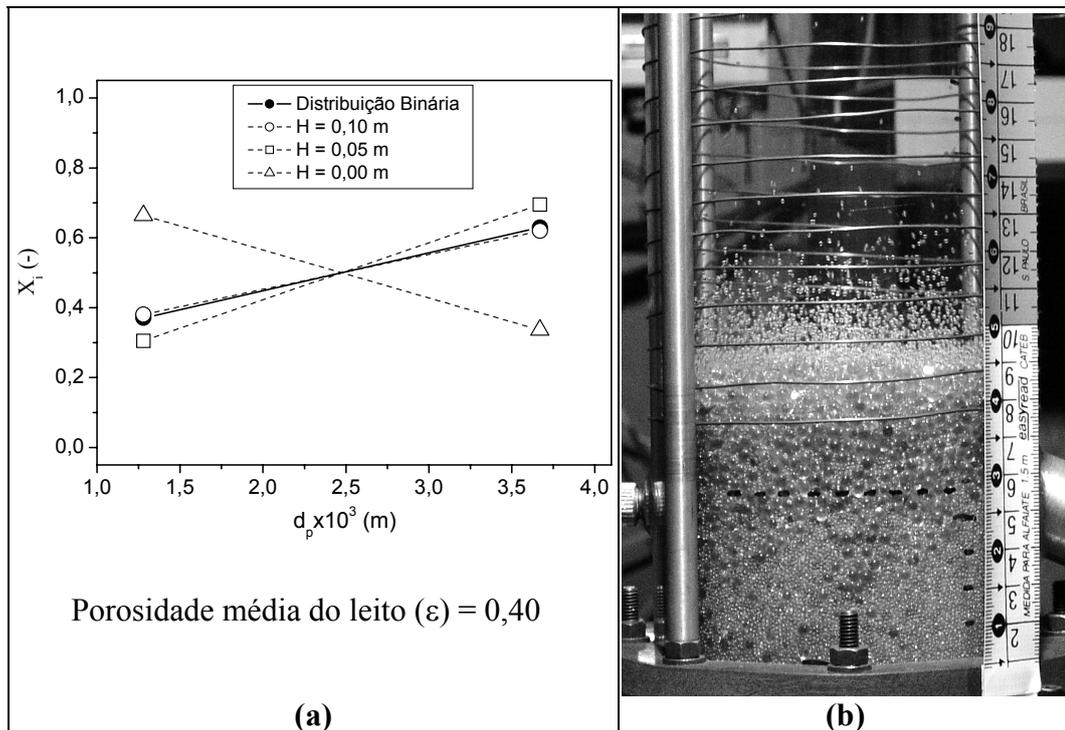


Figura 4.43: Leito vibrado; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,003$ m; $f = 12,87$ Hz; $U_s = 0,00$ m/s; (a) X_i em função de d_p ; (b) fotografia do leito em operação.

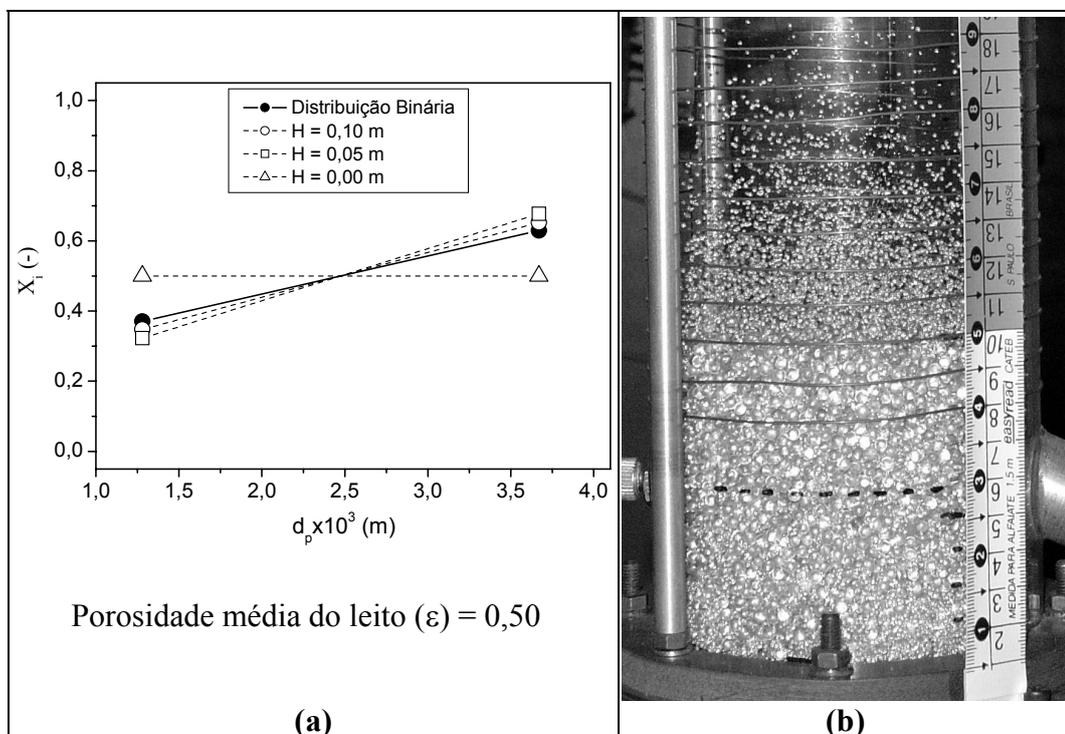


Figura 4.44: Leito vibrado; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,009$ m; $f = 7,43$ Hz; $U_s = 0,00$ m/s; (a) X_i em função de d_p ; (b) fotografia do leito em operação.

Quando se analisa os comportamentos destas figuras como um todo (Figuras 4.40 a 4.44), percebe-se que para o leito vibrofluidizado, ocorre um equilíbrio entre as forças que atuam em cada partícula do leito fluidizado (carregando as partículas menores para superfície) e no leito vibrado (com a migração das partículas maiores para a superfície). Assim, em condições controladas de vibração e de escoamento de ar, pode-se promover a completa mistura das partículas, justificando assim a utilização do leito vibrofluidizado para prevenir a segregação. Em um caso real, outros fatores devem ser considerados, como possíveis diferenças entre a densidade e o fator de forma das partículas e o surgimento de pontes líquidas e/ou sólidas num processo de secagem, por exemplo.

Por concisão, não serão apresentados aqui os resultados para mistura plana e a gaussiana, uma vez que os comportamentos observados para estas misturas foram qualitativamente semelhantes ao da mistura binária. Estes resultados completos estão apresentados no Apêndice C.

5 CONCLUSÕES

No intervalo das medidas experimentais realizadas neste trabalho, é possível concluir que os dados são reprodutíveis, fato este atestado por meio das réplicas das curvas características e de desvio padrão da queda de pressão, obtidos nas principais condições experimentais. As réplicas dos resultados obtidos atestaram a qualidade do equipamento construído e da instrumentação empregada nas medidas fluidodinâmicas, bem como da metodologia utilizada.

Devido ao fato de se ter analisado a influência de vários parâmetros sobre o comportamento fluidodinâmico do leito, optou-se por apresentar este capítulo dividido em itens, de forma análoga à apresentada no capítulo anterior.

5.1 Ensaios Fluidodinâmicos Preliminares

Nos ensaios fluidodinâmicos preliminares, verificou-se globalmente que a velocidade mínima de fluidização aumentou com o aumento do tamanho das partículas inertes, fixando-se sua densidade. Para o leito fluidizado na região de leito fixo ($U_s < U_{mf}$), o aumento do tamanho das partículas promoveu a redução da queda de pressão, e praticamente não teve influência sobre este parâmetro na região de leito fluidizado. Em síntese, sem a presença de vibração a velocidade mínima de fluidização está associada essencialmente à massa individual da partícula, já a queda de pressão na região de leito fixo está associada principalmente com a permeabilidade do leito. Nestes casos, a presença de vibração aumentou a quantidade de forças (ou a intensidade destas) agindo sobre o sistema, de modo a provocar alterações no tipo de escoamento,

na conformação das partículas e na dinâmica do leito.

Com o aumento da densidade das partículas, observou-se que a queda de pressão na região de leito fluidizado aumentou como consequência do aumento da massa total de leito (em uma mesma altura de leito estático). Neste caso, a velocidade mínima de fluidização também aumentou com o aumento da densidade das partículas, em consequência do aumento da massa individual da partícula, fato este bem conhecido na literatura especializada.

Constatou-se também ser possível atingir o regime fluidizado para partículas muito grandes ($d_p = 17,00 \times 10^{-3}$ m), embora essa fluidização não tenha sido de boa qualidade. Por meio destes ensaios, pode-se afirmar que não existe limitação prática para a utilização de qualquer uma das partículas estudadas neste trabalho, quando se analisa o comportamento fluidodinâmico sem o líquido. Em um processo de secagem real, entretanto, deve-se analisar o efeito das pontes líquidas e/ou sólidas, por exemplo, para que se possa atestar a qualidade efetiva da fluidização com este tipo de partícula.

Na ausência de vibração, o comportamento do desvio padrão na região de leito fixo é independente do diâmetro de partículas e na região de leito fluidizado, o aumento do diâmetro de partículas provocou a redução nos valores do desvio padrão da queda de pressão.

A aplicação de altas velocidades de ar provocou oscilações nas curvas de desvio padrão, ocasionadas frequentemente pelo aparecimento de bolhas e pela intensa movimentação das partículas. Ainda para o leito fluidizado, verificou-se uma relação entre o início da movimentação das partículas com o comportamento das curvas de desvio padrão, sendo este um coadjuvante na estimativa da

velocidade na qual se inicia o movimento das partículas no leito.

Para todos os tamanhos de partículas, o aumento da intensidade de vibração provocou tendência ao aumento dos valores obtidos de desvio padrão. Na região de leito fixo, quanto maior a intensidade de vibração, mais significativo é o aumento no desvio padrão com o aumento da velocidade de ar. Para o leito sem a presença de vibração, o desvio padrão é muito inferior ao obtido para o leito com vibração, principalmente na região de leito fixo. Não foi possível obter uma relação objetiva entre as curvas de desvio padrão com o momento em que se inicia a movimentação das partículas no leito vibrofluidizado.

5.2 Análise Fluidodinâmica do Leito Fluidizado e Vibrofluidizado

No intervalo de condições experimentais utilizadas nos experimentos fluidodinâmicos, observou-se que o adimensional de vibração não representou de maneira única o comportamento fluidodinâmico do leito. Isto é, foram observados comportamentos fluidodinâmicos distintos para um mesmo adimensional de vibração, obtido de diferentes combinações entre amplitude e frequência de vibração. Esta diferença de comportamentos foi mais intensa para adimensional de vibração igual a 4,00, mesmo assim, a universalidade não foi verificada para baixos valores de adimensional de vibração ($\Gamma = 1,00$). Esta diferença de comportamentos para um mesmo adimensional de vibração foi verificada também por meio das curvas de desvio padrão da queda de pressão. Conseqüentemente, a sua utilização como parâmetro de processo, deve ser avaliada em outros tipos de estudos em leito

vibrofluidizado. Sugere-se a utilização da amplitude ou da frequência de vibração, além do adimensional de vibração, para melhor caracterização do efeito vibracional sobre o comportamento fluidodinâmico do leito.

Verificou-se que com a aplicação de vibração com altas amplitudes e baixas frequências (mantendo-se um Γ fixo) ocorreu a expansão do leito, reduzindo a queda de pressão e atrasando o início da fluidização. Em oposição, aplicando-se altas frequências de vibração e baixas amplitudes, verificou-se que ocorreu a compactação do leito e com isto, aumento nos valores de queda de pressão e a antecipação do início da fluidização. Nestas condições, com o aumento da amplitude de vibração (e redução da frequência) o leito apresentava uma fluidização do tipo *slugging*, com altos valores de desvio padrão da queda de pressão. À baixas amplitudes e altas frequências, houve a redução dos valores de desvio da queda de pressão, indicando possivelmente redução na movimentação das partículas no leito e alterações no tipo de escoamento.

Em todos os casos onde estava presente o glicerol, constatou-se a ocorrência de aglomeração das partículas, tornando a fluidização de má qualidade e irregular. A vibração melhorou a movimentação das partículas, minimizando a aglomeração e atenuando a formação de canais preferenciais. O grau de saturação de líquido teve grande influência sobre o comportamento da queda de pressão no leito e na velocidade mínima de fluidização, exceto na presença de vibração. Com o aumento do grau de saturação de glicerol, verificou-se a redução da queda de pressão e aumento da velocidade mínima de fluidização.

5.3 Efeito da Distribuição de Partículas sobre a Fluidodinâmica e a Segregação

Para as partículas inertes uniformes, o aumento do diâmetro provocou aumento na velocidade mínima de fluidização e redução da queda de pressão na região de leito fixo, tanto para o leito fluidizado, quanto para o vibrofluidizado. Para diferentes distribuições de partículas, o comportamento fluidodinâmico observado foi bastante semelhante e equivalente ao apresentado pela partícula de referência, isto é, foi pouco influenciado pela mistura das partículas.

Quando foi empregada uma distribuição de partículas no leito, observou-se a ocorrência de segregação em quase todos os casos analisados. No leito fluidizado, houve a migração das partículas menores para a parte superior do leito e no vibrado, ocorreu a migração das partículas maiores para parte superior do leito, independente da distribuição empregada. Para o leito vibrofluidizado submetido à uma baixa amplitude de vibração (0,003 m), houve segregação, mas em menor quantidade que no leito fluidizado, isto é, houve uma melhora na mistura das partículas. Quando o leito foi submetido à alta amplitude de vibração (0,009 m), não ocorreu a segregação granulométrica, isto é, houve a completa mistura das partículas.

Neste último caso para o leito vibrofluidizado, ocorreu um equilíbrio entre as forças verificadas no leito fluidizado (carregando as partículas menores para superfície) e no leito vibrado (com a migração das maiores para a superfície). Assim, em condições controladas de vibração e de escoamento de ar, pode-se promover a completa mistura das partículas, justificando a utilização do leito vibrofluidizado para prevenir a segregação. Em um caso real, outros fatores

devem ser considerados, como possíveis diferenças entre a densidade e o fator de forma das partículas e, o surgimento de pontes líquidas e/ou sólidas num processo de secagem, por exemplo.

Verificou-se ainda, que para um mesmo adimensional de vibração (com diferentes relações entre amplitude e frequência de vibração), foi possível obter comportamentos dinâmicos distintos, confirmando a hipótese de não universalidade deste parâmetro. Em altas amplitudes (e baixas frequências) de vibração, houve a expansão do leito vibrado e do vibrofluidizado (e aumento da sua porosidade média), enquanto que a baixas amplitudes (e altas frequências), houve a compactação do leito vibrofluidizado e do vibrado (e redução da sua porosidade média). Isto reforça a conclusão de que o adimensional de vibração não deve ser utilizado como único parâmetro para caracterizar a vibração neste tipo de leito.

6 SUGESTÕES

Para continuidade deste estudo, sugere-se realizar:

- estudos fluidodinâmicos relacionados à queda de pressão no leito, ao desvio padrão da queda de pressão e a velocidade mínima de fluidização, sob a influência de diferentes esfericidades, rugosidades, diâmetros equivalentes e densidades das partículas, variando sempre um dos parâmetros e fixando-se os demais, na presença de glicerol ou não;
- mais estudos fluidodinâmicos relacionados à queda de pressão no leito, ao desvio padrão da queda de pressão e à velocidade mínima de fluidização sob a influência de diferentes combinações entre os parâmetros vibracionais em níveis diferentes aos estudados neste trabalho, combinando os efeitos do grau de saturação de glicerol, altura de leito estático, geometria do leito e das partículas inertes;
- experimentos fluidodinâmicos e de segregação utilizando outras distribuições (de tamanhos e densidades) de partículas, novas formas de coleta e de quantificação da segregação, avaliando-se também os parâmetros citados anteriormente;
- estudos fluidodinâmicos e de secagem utilizando pastas reais (como ovo, tomate, sucos, etc.) para efeito de comparação com os resultados obtidos para o glicerol, sob a influência de distribuições de tamanhos e/ou de densidade de partículas e dos parâmetros sugeridos anteriormente;
- estudos sobre a dinâmica das bolhas, taxa de circulação das partículas e fazer análise de tensões no leito, e

- estudos referentes à transferência de calor e massa no leite, na presença de pastas e avaliando-se também os parâmetros citados anteriormente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKIYAMA, T; NISHIYAMA, R. (1994). *Solids Mixing in Vibrating Particle Beds - Effect of a Tube Submerged in the Bed*. Powder Technology, Switzerland, v.80, n.1, p.11-16.
- ALVAREZ, P. I.; BLASCO, R.; VEGA, R. B. (2002). *Estudio Experimental de Secado en un Lecho Vibrofluidizado*. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, XXIX., São João Del-Rei, MG, 2001. Anais do XXIX ENEMP, São João Del-Rei, MG. Artigo No.Trab64 (Em CD-ROM).
- ALVAREZ, P. I.; REYES, A. (1998). *Secado de Harinas en un Lecho Vibrofluidizado: Estudio Preliminar*. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, XXV., São Carlos, SP, 1997. Anais do XXV ENEMP, São Carlos, SP, Editora da UFSCar, v.2, p.498-503.
- ARGENTIÈRE, A. (1996). *Novíssimo Receituário Industrial: Enciclopédia de Fórmulas e Receitas para Pequenas, Médias e Grandes Indústrias*. 5.ed., Ícone Editora, São Paulo, p.205-206.
- BACELOS, M. S.; SPITZNER NETO, P. I.; SILVEIRA, A. M.; FREIRE, J. T. (2005). *Analysis of Fluid Dynamics Behavior of Conical Spouted Bed in Presence of Pastes*. Drying Technology, New York, v.23, n.3, p.427-453.
- BACHMANN, D. (1940). *Verfahrenstechnik*. Zeitschrift / Verein Deutscher Ingenieure Beiheft, Dusseldorf, Germany, n.2, p.43. (Em Alemão) In: GUTMAN, R. G. (1976). *Vibrated Beds of Powders, Part I: a Theoretical Model for the Vibrated Bed*. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, London, v.54, n.3, p.174-183.
- BAKHMAN, G. K.; ZHIRNOVA, G. F.; MIKHAILOV, G. M.; TYABIN, N. V. (1970). *Trudy Volgo Gradskogo Politekhn. Instituta, ser. Kimia I Khim. Teknolog.* (Em Russo). In: STRUMILLO, C.; PAKOWSKI, Z. (1980). *Drying of Granular Products in Vibrofluidized Beds*. In: Drying '80, Proceedings of 2nd International Drying Symposium (IDS' 80), Montreal, Canada. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p.211-226.
- BARGHI, S. (1997). *Segregation and Defluidized Zones in Liquid-Solid and Gas-Liquid-Solid Fluidized Beds*. PhD Thesis, The University of Western Ontario, London, Ontario, 457p.
- BARKER, G. C.; MEHTA, A. (1993). *Size Segregation Mechanisms*. Nature, London, v.364, p.486-487.
- BARKER, G. C.; MEHTA, A.; GRIMSON, M. J. (1993). *3-Dimensional Model For Particle-Size Segregation by Shaking – Comment*. Physical Review Letters, New York, v.70, n.14, p.2194-2194.

- BEECKMANS, J. M.; NILSSON, J.; LARGE, J. F. (1985). *Observations on the Mechanisms of Segregation in Flotsam-Rich, Fully Fluidized-Beds*. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, Washington, v.24, n.1, p.90-95.
- BORDE, I.; DUKHOVNY, M.; ELPERIN, T.; KATZ, V. (1996). *Investigation of Drying in a Multistage Dryer with a Vibrofluidized Bed*. In: Drying '96, Proceedings of 10th International Drying Symposium (IDS' 96), Krakow, Poland. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.A, p.398-404.
- BRATU, E.; JINESCU, G. I. (1969). *Revue de Chimie, Bucharest, Romania*, v.20, p.547-& (Em Romeno). In: GUPTA, R.; MUJUMDAR, A. S. (1980a). *Aerodynamics of a Vibrated Fluid Bed*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, v.58, n.3, p.332-338.
- BRATU, E.; JINESCU, G. I. (1971). *Effect of Vertical Vibrations on the Pressure Drop in a Fluidized Layer*. British Chemical Engineering, London, v.16, n.8, p.691-695.
- BRATU, E.; JINESCU, G. I. (1972). *Heat Transfer in Vibrated Fluidized Layers*. Revue Roumaine de Chimie, Bucharest, v.17, n.1-2, p.49-56.
- BRIDGWATER, J. (1976). *Fundamental Powder Mixing Mechanisms*. Powder Technology, Switzerland, v.15, n.2, p.215-236.
- BROD, F. P. R. (1999). *Construção e Teste de um Secador Vibro-fluidizado*. Dissertação, FEA/UNICAMP, Campinas, SP, 200p.
- BROD, F. P. R.; ALONSO, L. F. T.; ROSA, R. H. C.; MINAGAWA, F. K.; PARK, K. J. (1998). *Carrot (Daucus carota L.) Drying in a Vibro-fluidized Dryer*. In: Drying '98, Proceedings of 11th International Drying Symposium (IDS' 98), Porto Carras, Greece. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v. B, p.1237-1243.
- BROD, F. P. R.; PARK, K. J.; ALONSO, L. F. T. (2000). *A Vibro-Fluidized Drying System for Eggshell*. In: Drying '2000, Proceedings of 12th International Drying Symposium (IDS' 2000), Noordwijkerhout, The Netherlands. Paper No.142 (Em CD-ROM).
- BROD, F.P.R. (2003). *Avaliação de um Secador Vibro-Fluidizado*. Tese, FEA/UNICAMP, Campinas, SP, 335p.
- CAMARGO, C. F. S. (1998). *Determinação do Coeficiente Global de Transferência de Calor em um Cilindro Submerso em um Leito Vibro-fluidizado*. Dissertação, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 146p.

- CAMARGO, C. F. S.; FREIRE, J. T. (2002). *Fluidodinâmica de um Leito Vibro-fluidizado: Análise das Curvas Características Utilizando Curvas de Desvio Padrão*. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, XXIX., São João Del-Rei, MG, 2001. Anais do XXIX ENEMP, São João Del-Rei, MG. Artigo No.Trab22 (Em CD-ROM).
- CARDOSO, C. S. B. (1998). *Secagem de Fatias de Banana em Leito Vibro-Fluidizado a Altas Temperaturas por Curto Tempo*. Dissertação, FEQ/UNICAMP, Campinas, SP, 104p.
- CARDOSO, C. S. B.; KIECKBUSCH, T. G. (1999). *Secagem de Fatias de Banana em Leito Vibro-Fluidizado a Altas Temperaturas por Curto Tempo*. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, XXVI., Teresópolis, RJ, 1998. Anais do XXVI ENEMP, Teresópolis, RJ, Editora da UFRRJ, v.2, p. 385-392.
- CHEN, J. L. P.; KEAIRNS, D. L. (1975). *Particle Segregation in a Fluidized Bed*, The Canadian Journal of Chemical Engineering. Ottawa, v.53, n.4, p.395-402.
- CHEN, Y. L.; LIN, P. S.; PENG, Y. L. (1991). *Particle Agglomeration Characteristics in Vibro-Fluidized Bed Dryers*. Journal of Chemical Engineering of Japan, Tokyo, v.24, n.5, p.669-673.
- CHEUNG, L; NIENOW, A. W.; ROWE, P. N. (1974). *Minimum Fluidization Velocity of a Binary Mixture of Different Sized Particles*. Chemical Engineering Science, New York, v.29, n.5, p.1301-1303.
- CHEVILENKO, V. A.; MUSHTAYEV, V. I.; KOROTOKOV, V. M.; IZHORIM, G. L.; LYALIN, V. A.; PLANOVSKI, A. N. (1979). *Study of Hydrodynamics and Structure of Vibropseudo-Fluidized Bed in Drying of Dispersed Materials*. Khimicheskaya Promyshlennost, Moscow, n.6, p.356-360. (Em Russo). In: PAKOWSKI, Z.; MUJUMDAR, A. S.; STRUMILLO, C. (1984). *Theory and Application of Vibrated Beds and Vibrated Fluid Beds for Drying Process*. In: MUJUMDAR, A. S. *Advances in Drying*, Hemisphere Publishing Corporation, Washington. v.3, p.245-306.
- CHIBA, S.; NIENOW, A. W.; CHIBA, T.; KOBAYASHI, H. (1980). *Fluidized Binary-Mixtures in Which the Denser Component May Be Flotsam*. Powder Technology, Switzerland, v.26, n.1, p.1-10.
- CHIBA, S; TANIMOTO, H.; KOBAYASHI, H.; CHIBA, T. (1979). *Measurement of Solid Exchange Between the Bubble Wake and the Emulsion Phase in a 3-Dimensional Gas-Fluidized Bed*. Journal of Chemical Engineering of Japan, Tokyo, v.12, n.1, p.43-45.

- CHLENOV, V. A.; MIKHAILOV, N. V. (1964). *Khimicheskaya Promyshlennost*, n.12, p.910-913. (Em Russo). In: ERDÉSZ, K.; MUJUMDAR, A. S.; RINGER, D. U. (1986). *Hydrodynamic Similarity of Conventional and Vibrated Fluidized Beds*. In: *Drying '86, Proceedings of 5th International Drying Symposium (IDS' 86)*, Boston, USA. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p.169-176.
- CHLENOV, V. A.; MIKHAILOV, N. V. (1965). Some Properties of a Fluidized Bed under Vibration, *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*, Minski, Belarus. v.9, n.2, p.196-200. (Em Russo). In: PAKOWSKI, Z.; MUJUMDAR, A. S.; STRUMILLO, C. (1984). *Theory and Application of Vibrated Beds and Vibrated Fluid Beds for Drying Process*. In: MUJUMDAR, A. S. *Advances in Drying*, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, v.3, p.245-306.
- CHLENOV, V. A.; MIKHAILOV, N. V. (1972). *Vibrokipyashchii Sloi (Vibrofluidized Beds)*. Izdatel'stvo, Nauka, Moscow. (Em Russo). In: STRUMILLO, C.; PAKOWSKI, Z. (1980). *Drying of Granular Products in Vibrofluidized Beds*. In: *Drying '80, Proceedings of 2nd International Drying Symposium (IDS' 80)*, Montreal, Canada. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p.211-226.
- COURDEC, J. P. (1985). *Incipient Fluidization and Particulate Systems*. In: DAVIDSON, J. F.; CLIFT, R.; HARRISON, D. (1985). *Fluidization*, 2.ed., Academic Press, London, Chap.1, p.1-46.
- CRUZ, M. A. A. (2004). *Análise da Secagem do Leite em Pó Integral em um Leito Vibro-Fluidizado*. Dissertação, PPG-EM/UFMG, Belo Horizonte, MG, 108p.
- DALEFFE, R. V. (2002). *Análise da Presença do Glicerol no Comportamento Fluidodinâmico de Leitos Fluidizado e Vibrofluidizado*. Dissertação, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 205p. Disponível *on-line* no site: <http://www.bdtadm.ufscar.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=325>
- DALEFFE, R. V.; FREIRE, J. T. (2004). *Analysis of the Fluid-dynamic Behavior of Fluidized and Vibrofluidized Bed Containing Glycerol*. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, São Paulo, v.21, n.1, p.35-46. Disponível *on-line* no site: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-66322004000100005&lng=en&nrm=iso>
- DAVIDSON, J. F.; CLIFT, R.; HARRISON, D. (1985). *Fluidization*. 2.ed., Academic Press, London, 733p.
- DELEBARRE, A. B.; PAVINATO, A.; LEROY, J. C. (1994). *Fluidization and Mixing of Solids Distributed in Size and Density*. *Powder Technology*, Switzerland, v.80, n.3, p.227-233.

- DONG, Z.X.; PAN, Y.K.; DENG, W.Y.; WEI, Z.; MUJUMDAR, A.S. (1991). *Effect of Vibration on the Drying Rate during the Falling Rate Period*. Drying Technology, New York, v.9, n.3, p.723-733.
- DORNEY, J.; GINSBURG, A. S.; SIROYEDOV, V. I. (1981). Élelmezésipar, v.11, p.411-&. (Em Húngaro). In: ERDÉSZ, K. (1990). *Hydrodynamic Studies on Vibrated Fluidized Beds*. Power Handling & Processing, Germany, v.2, n.4, p.327-339.
- ECCLES, E. R. A. (1990). *Flow and Heat-Transfer Phenomena in Aerated Vibrated Beds*. Drying Technology, New York, v.8, n.4, p.895-898.
- ECCLES, E. R. A.; MUJUMDAR, A. S. (1997). *Bubble Phenomena in Aerated Vibrated Beds of Small Particles*. Drying Technology, New York, v.15, n.1, p.95-116.
- ERDÉSZ, K. (1990). *Hydrodynamic Studies on Vibrated Fluidized Beds*. Power Handling & Processing, Germany, v.2, n.4, p.327-339.
- ERDÉSZ, K.; MUJUMDAR, A. S. (1986). *Hydrodynamic Aspects of Conventional and Vibrofluidized Beds: a Comparative Evaluation*. Powder Technology, Switzerland, v.46, n.2-3, p.167-172.
- ERDÉSZ, K.; MUJUMDAR, A. S.; RINGER, D. U. (1986). *Hydrodynamic Similarity of Conventional and Vibrated Fluidized Beds*. In: Drying '86, Proceedings of 5th International Drying Symposium (IDS' 86), Boston, USA. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p.169-176.
- ERDÉSZ, K.; ORMÓS, Z. (1984). *Bed Expansion and Pressure Drop in Vibrofluidized Layers*. In: Drying '84, Proceedings of 4th International Drying Symposium (IDS' 84), Kyoto, Japan. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p.169-177.
- ERDÉSZ, K.; ORMÓS, Z. (1986). *Drying of Past-like Materials in Vibrofluidized Bed of Inert Packing*. In: Drying '86, Proceedings of 5th International Drying Symposium (IDS' 86), Boston, USA. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p.177-182.
- ERESHCHENKO, G. V.; (1965). Sakharnaya Promyshlennost, v.1. (Em Russo). In: Drying '80, Proceedings of 2nd International Drying Symposium (IDS' 80), Montreal, Canada. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p.211-226.
- FAN, L. T.; CHEN, Y. M.; LAI, F. S. (1990). *Recent Developments in Solid Mixing*. Powder Technology, Switzerland, v.61, n.3, p.255-287.
- FELIPE, C. A. S.; ROCHA, S. C. S. (2004). *Time Series Analysis of Pressure Fluctuation in Gas-Solid Fluidized Beds*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, São Paulo, v.21, n.03, p.497-507.

- FINZER, J. R. D. (1984). *Secagem de Fatias de Cebola em Leito Vibro-fluidizado*. Dissertação, FEA/UNICAMP, Campinas, SP, 134p.
- FINZER, J. R. D.; KIECKBUSCH, T. G. (1992). *Secagem em Sistemas com Vibração*. In: FREIRE, J. T.; SARTORI, D. J. M. *Tópicos Especiais em Secagem*, UFSCar, São Carlos, SP, v.1, p.87-127.
- FITO, P. J.; SANZ, F. J.; ARANDA, V. (1977). *Secado de Salvado de Arroz em Lecho Vibro-fluidizado III: Período de Velocidad de Secado Decreciente*. Revista de Agroquímica e Tecnologia de Alimentos, Valencia, Espana, v.17, n.1, p.140-147.
- FITO, P. J.; SANZ, F. J.; FLORS, A. (1975). *Secado de Salvado de Arroz em Lecho Vibro-fluidizado I: Estudio de la Fluidización*. Revista de Agroquímica e Tecnologia de Alimentos, Valencia, Espana, v.15, n.2, p.221-226.
- FORMISANI, B. (1991). *Packing and Fluidization Properties of Binary-Mixtures of Spherical-Particles*. Powder Technology, Switzerland, v.66, n.3, p.259-264.
- FORMISANI, B.; CRISTOFARO, G.; GIRIMONTE, R. (2001). *A Fundamental Approach to the Phenomenology of Fluidization of Size Segregating Binary Mixtures of Solids*. Chemical Engineering Science, New York, v.56, n.1, p.109-119.
- FREIRE, J. T. (1992). *Secagem de Pastas em Leito de Jorro*. In: FREIRE, J. T.; SARTORI, D. J. M. (1992). *Tópicos Especiais em Secagem*. UFSCar, São Carlos, SP, v.1, p.41-85.
- GALLAS, J. A. C.; HERRMANN, H. J.; SOKOLOWSKI, S. (1992). *Molecular Dynamics Simulation of Powder Fluidization in Two Dimensions*. Physica A, Amsterdam, v.189, n.3-4, p.437-446.
- GARIM, M. M. (1994). *Coefficiente de Transferência de Massa de um Corpo Submerso para um Leito Vibro-fluidizado*. Dissertação, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 131p.
- GARIM, M. M. (1998). *Estudo dos Coeficientes de Transferência de Massa em Leito Fluidizado e Vibro-fluidizado*. Tese, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 140p.
- GARIM, M. M.; FREIRE, J. T. (1994). *Leito Vibro-fluidizado Aerado: Estudos Relacionados à Determinação de U_{mf} e ΔP_{mf}* . In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 10^o, São Paulo, SP, 1994. Anais do 10^o COBEQ, São Paulo, SP, v.1, p.295-300.

- GARIM, M. M.; FREIRE, J. T. (1999). *Uma Análise das Curvas Características de Leitos Fluidizados e Vibro-fluidizados Utilizando as Curvas de Desvio Padrão das Medidas Realizadas*. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, XXVI., Teresópolis, RJ, 1998. Anais do XXVI ENEMP, Teresópolis, RJ, Editora da UFRRJ, v.1, p.253-259.
- GAUTHIER, D.; ZERGUERRAS, S.; FLAMANT, G. (1999). *Influence of the Particle Size Distribution of Powders on the Velocities of Minimum and Complete Fluidization*. Chemical Engineering Journal, Lausanne, Switzerland, v.74, n.3, p.181-196.
- GELDART, D. (1973). *Types of Gas Fluidization*. Powder Technology, Switzerland, v.7, n.5, p.285-292.
- GIBILARO, L. G.; ROWE, P. N. (1974). *Model for a Segregating Gas Fluidized-Bed*, Chemical Engineering Science. New York, v.29, n.6, p.1403-1412.
- GOOSSENS, W. R. A.; DUMONT, G. L.; SPAEPEN, G. J. (1971). *Dynamic Characteristics of a Gas Fluidized Bed*. AIChE Symposium Series, New York, v.67, n.116, p.38-45. In: FORMISANI, B. (1991) *Packing and Fluidization Properties of Binary-Mixtures of Spherical-Particles*. Powder Technology, Switzerland, v.66, n.3, p.259-264.
- GUPTA, R. (1979). *Aerodynamic and Drying Characteristics of a Vibrated Fluidized Bed*. Master's Thesis, McGill University, Montreal, Canada, 194p.
- GUPTA, R.; LEUNG, P.; MUJUMDAR, A. S. (1980). *Drying Granular Materials in a Vibrated Fluidized Bed*. In: Drying '80, Proceedings of 2nd International Drying Symposium (IDS' 80), Montreal, Canada. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.2, p.201-207.
- GUPTA, R.; MUJUMDAR, A. S. (1980a). *Aerodynamics of a Vibrated Fluid Bed*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, v.58, n.3, p.332-338.
- GUPTA, R.; MUJUMDAR, A. S. (1980b). *Aerodynamic and Thermal Characteristics of Vibrated Fluid Beds: A Review*. In: Drying '80, Proceedings of 2nd International Drying Symposium (IDS' 80), Montreal, Canada. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p.141-150.
- GUTMAN, R. G. (1976). *Vibrated Beds of Powders, Part I: a Theoretical Model for the Vibrated Bed*. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, London, v.54, n.3, p.174-183.
- HAHNE, L.C.C. (2001). *Estudo Experimental da Caracterização e do Processamento do Leite em Pó em Leitos Vibro-Fluidizados*, Dissertação, PPG-EQ/UFMG, Belo Horizonte, MG, 214p

- HONG, D. C.; QUINN, P. V.; LUDING, S. (2001). *Reverse Brazil Nut Problem: Competition between Percolation and Condensation*. Physical Review Letters, New York, v.86, n.15, p.3423-3426.
- HUERTA, D. A.; SUÁREZ, J. C. R. (2004). *Vibration-Induced Granular Segregation: a Phenomenon Driven by Three Mechanisms*. Physical Review Letters, New York, v.92, n.11, Art. No.114301, p.1-4.
- JINESCU, G.; TABRENCU, C.; IONESCU, E; PETRESCU, M; JINESCU, C. (2000). *Hydrodynamic Aspects at Vibrated Fluidized Drying of Polydisperse Powdery Materials*. In: Drying '2000, Proceedings of 12th International Drying Symposium (IDS' 2000), Noordwijkerhout, The Netherlands. Paper No.244 (Em CD-ROM).
- JINESCU, G.; WOINAROSCHY, A.; TABRENCU, C.; IONESCU, E. (1998). *Simulation and Optimization of Vibro-Fluidization Drying by the Use of Neural Nets*. In: Drying '98, Proceedings of 11th International Drying Symposium (IDS' 98), Porto Carras, Greece. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.C, p.2079-2083.
- JOHNSSON, F.; ZIJERVELD, R. C.; SCHOLTEN, J. C.; VAN DEN BLEENK, C. M.; LECKNER, B. (2000). *Characterization of Fluidization Regimes by Time-Series Analysis of Pressure Fluctuations*, International Journal of Multiphase Flow. v.26, n.4, New York, p.663-715.
- JULLIEN, R.; MEAKIN, P.; PAVLOVITCH, A. (1992). *Three-Dimensional Model for Particle-Size Segregation by Shaking*. Physical Review Letters, New York, v.69, n.4, p.640-643.
- JULLIEN, R.; MEAKIN, P.; PAVLOVITCH, A. (1993). *Three-Dimensional Model for Particle-Size Segregation by Shaking – Reply*. Physical Review Letters, New York, v.70, n.14, p.2195-2195.
- JULLIEN, R.; MEAKIN, P.; PAVLOVITCH, A. (1995). *Reply to Comment by G. C. Barker and A. Mehta*. Europhysics Letters, New York, v.29, n.1, p.63-64.
- KACHAN, J. C. (1988). *Contribuição ao Estudo da Desidratação da Pasta de Tomate (*Lycopersicon esculentum L*) em Secador de Leito com Jorro*. Tese (Livre Docência), EP/USP, São Paulo, SP, 235p.
- KAGE, H.; AGARI, M.; OGURA, H.; MATSUNO, Y. (2000). *Frequency Analysis of Pressure Fluctuations in Fluidized Bed Plenum and its Confidence Limit of Detection of Various Modes of Fluidization*. Advanced Powder Technology, Netherlands, v.11, n.4, p. 459-475.
- KHALID, M.; MUJUMDAR, A. S. (1982). *Aerodynamic and Drying Characteristics of an Agitated Fluidized Bed Dryer*. In: Drying '82, Proceedings of 3rd International Drying Symposium (IDS' 82), Birmingham, UK. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p.61-73.

- KIECKBUSCH, T. G.; FINZER, J.R.D. (1990). *Secagem de Grãos de Soja em Leito Vibro-Jorrado com Aquecimento Indireto*. In: Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos, XVII., São Carlos, SP, 1989. Anais do XVII ENEMP, São Carlos, SP, Editora da UFSCar, p.185-194.
- KNIGHT, J. B.; JAEGER, H. M.; NAGEL, S. R. (1993). *Vibration-Induced Size Separation in Granular Media - The Convection Connection*. Physical Review Letters, New York, v.70, n.24, p.3728-3731.
- KROLL, W. (1954). *Über das Verhalten von Schuttgut in Lotrecht Schwingenden Gefassen*. Forschung Auf Dem Gebiete Des Ingenieurwesens (Forschung Im Ingenieurwesen), Düsseldorf, Germany, v.20, n.2, p.2-15. (Em Alemão). In: THOMAS, B; LIU, Y. A.; MASON, M. O.; SQUIRES, A. M. (1988). *Vibrated Beds: New Tools for Heat Transfer*. Chemical Engineering Progress, New York, v.84, n.6, p.65-75.
- KROLL, W. (1955). *Fliesserscheinungen na Haufwerken in Schwingenden Gafassen*. Chemie Ingenieur Technik, Weinheim, Germany, v.27, n.1, p.33-38 (Em alemão). In: THOMAS, B; LIU, Y. A.; MASON, M. O.; SQUIRES, A. M. (1988). *Vibrated Beds: New Tools for Heat Transfer*. Chemical Engineering Progress, New York, v.84, n.6, p.65-75.
- KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. (1991). *Fluidization Engineering*. 2.ed., Academic Press, New York, 491p.
- LI, Z. Y.; PAN, Y. K. (1996). *Heat and Mass Transfer for Drying of Common Salt in a Vibrofluidized Bed*. In: Drying '96, Proceedings of 10th International Drying Symposium (IDS' 96), Krakow, Poland. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.A, p.598-604.
- LIDE, D. R. (1998). *Handbook of Chemistry and Physics*. 79.ed., CRC Press, Boca Raton, 2496p.
- LIN, C. L.; WEY, M. Y.; YOU, S. D. (2002). *The Effect of Particle Size Distribution on Minimum Fluidization Velocity at High Temperature*. Powder Technology, Switzerland, v.126, n.3, p.297-301.
- LIPPENS, B.C.; MULDER, J. (1993). *Prediction of the Minimum Fluidization Velocity*. Powder Technology, Switzerland, v.75, n.1, p.67-78.
- LIU, X. D.; CAO, C. W.; ZIBCINSKI, I.; STRUMILLO, C. (1998). *Determination of Effective Moisture Diffusivity of Biomaterials*. In: Drying '98, Proceedings of 11th International Drying Symposium (IDS' 98), Porto Carras, Greece. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.A, p.732-738.
- MALHOTRA; K.; CHEONG, L. L. K.; MUJUMDAR, A. S. (1984). *Pressure Drop Characteristics for Vibrated Beds of Dry and Sticky Particles*. Powder Technology, Switzerland, v.39, n.1, p.101-105.

- MORENO, R.; RIOS, R.; CALBUCURA, H. O. (2000). *Batch Vibrating Fluid Bed Dryer for Sawdust Particles: Experimental Results*. Drying Technology, New York, v.18, n.7, p.1481-1493.
- MORIS, V. A. S. (2002). *Fluidodinâmica e Secagem do Ácido Adípico em Leito Vibrofluidizado*. Tese, FEQ/UNICAMP, Campinas, SP, 160p.
- MORIS, V. A. S.; ROCHA, S. C. S. (2003a) *Análise da Distribuição Granulométrica do Ácido Adípico Após a Secagem em Leito Vibrofluidizado*. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, XXX., São Carlos, SP, 2002. Anais do XXX ENEMP, São Carlos, SP. Artigo No.PII36 (Em CD-ROM).
- MORIS, V. A. S.; ROCHA, S. C. S. (2003b). *Development of a Vibrofluidized Bed and Fluid-Dynamic Study With Dry and Wet Adipic Acid*, Brazilian Journal of Chemical Engineering, São Paulo, v.20, n.4, p.423-434.
- MORIS, V. A. S.; ROCHA, S. C. S.; SACOMAN, F. L. (2002) *Fluid-Dynamic Analysis of Vibrofluidized Bed Using Wet Adipic Acid*. In: Drying '2002, Proceedings of 13th International Drying Symposium (IDS' 2002), Beijing, China. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v. A, p.609-617.
- MUJUMDAR, A. S. (1984). *Aerodynamic Characteristics of a Vibrated Bed of Particles*. In: Drying '84, Proceedings of 4th International Drying Symposium (IDS' 84), Kyoto, Japan. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p.178-85.
- MUSHTAYEV, V. I.; KOROTKOV, B. M.; CHEVILENKO, V. A.; EFIMOV, M. G.; PLANOVSKI, A. N. (1973). Chemical And Petroleum Engineering, n.12, p.1083-1085. In: ERDÉSZ, K. (1990). *Hydrodynamic Studies on Vibrated Fluidized Beds*. Powder Handling & Processing, Germany, v.2, n.4, p.327-339.
- MUSHTAYEV, V. I.; KOROTKOV, B. M.; CHEVILENKO, V. A.; EFIMOV, M. G.; PLANOVSKI, A. N. (1972). Teoreticheskie Osnovy Khimicheskoi Tekhnologii, Moscow, v.7, n.6, p.866-&. (Em Russo). In: STRUMILLO, C.; PAKOWSKI, Z. (1980). *Drying of Granular Products in Vibrofluidized Beds*. In: Drying '80, Proceedings of 2nd International Drying Symposium (IDS' 80), Montreal, Canada. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p.211-226.
- MUSHTAYEV, V.I.; CHEVILENKO, V.A.; KOROTKOV, B.M. (1974). *Investigation of Drying of Granular Materials in Apparatus with a Vibro-Fluidized Bed*. Teoreticheskie Osnovy Khimicheskoi Tekhnologii, Moscow, v.8, n.6, p.220-225. (Em Russo). In: ERDÉSZ, K. (1990). *Hydrodynamic Studies on Vibrated Fluidized Beds*. Powder Handling & Processing, Germany, v.2, n.4, p.327-339.

- NAIMER, N. S.; CHIBA, T.; NIENOW, A. W. (1982). *Parameter-Estimation for a Solids Mixing Segregation Model for Gas-Fluidized Beds*. Chemical Engineering Science, New York, v.37, n.7, p.1047-1057.
- NARIMATSU, C. P. (2000). *Transporte Pneumático Vertical em Fase Densa e Diluída - Influência da Densidade e do Diâmetro das Partículas no Comportamento Fluidodinâmico*. Dissertação, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 86p.
- NIENOW, A. W.; CHEESEMAN, D. J. (1980). *The Effect of Shape on the mixing and Segregation of Large Particles in a Gas-Fluidized Bed of Small Ones*. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Fluidization, v.3, p.373-380.
- NIENOW, A. W.; ROWE, P. N.; CHEUNG, L. Y. L. (1978a). *A Quantitative Analysis of the Mixing of Two Segregating Powders of Different Density in a Gas-Fluidized Bed*. Powder Technology, Switzerland, v.20, n.1, p.89-97.
- NIENOW, A. W.; ROWE, P. N.; CHIBA, T. (1978b). *Mixing and Segregation of a Small Proportion of Large Particles in a Gas Fluidized Bed of considerably Smaller Ones*. AIChE Symposium Series, New York, v.176, n.45, p.45-53.
- NODA, K.; UCHIDA, S.; MAKINO, T.; KAMO, H. (1986). *Minimum Fluidization Velocity of Binary Mixture of Particles with Large Size Ratio*. Powder Technology, Switzerland, v.46, n.2-3, p.149-154.
- NOVY, M. G.; KIECKBUSH, T. G. (1988). *Secagem de Alimentos Líquidos em Leito Vibro-fluidizado Contendo Inertes*. In: Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos, XV., Uberlândia, MG, 1987. Anais do XV ENEMP, Uberlândia, MG, Editora da UFU, v.2, p.430-440.
- PAKOWSKI, Z.; MUJUMDAR, A. S.; STRUMILLO, C. (1984). *Theory and Application of Vibrated Beds and Vibrated Fluid Beds for Drying Process*. In: MUJUMDAR, A. S. *Advances in Drying*, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, v.3, p.245-306.
- PAKOWSKI, Z.; STRUMILLO, C. (1980). *The Influence of Aerodynamics of a Vibrated Fluid Bed on Heat Transfer Drying Process at Low Air Velocities*. In: Drying '80, Proceedings of 2nd International Drying Symposium (IDS' 80), Montreal, Canada. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p.208-211.
- PAN, Y. K.; GAN, Y. M.; LIU, X. D.; WEI, Z.; MUJUMDAR, A. S. (1991). *Drying of Sticky Granular Materials during the Constant Rate Period in a Vibrated Fluidized-Bed*. Drying Technology, New York, v.9, n.4, p.1067-1079.

- PAN, Y. K.; LI, Z. Y.; MUJUMDAR, A. S.; KUDRA, T. (1997a). *Drying of a Root Crop in Vibro-fluidized Beds*. *Drying Technology*, New York, v.15, n.1, p.215-223.
- PAN, Y. K.; PANG, J. Z.; LI, Z. Y.; MUJUMDAR, A. S.; KUDRA, T. (1995). *Drying of Photosynthetic Bacteria in a Vibrated Fluid Bed of Solid Carriers*. *Drying Technology*, New York, v.13, n.1-2, p.395-404.
- PAN, Y. K.; WU, H.; LI, Z. Y.; MUJUMDAR, A. S.; KUDRA, T. (1997b). *Effect of a Tempering Period on Drying of Carrot in a Vibro-fluidized Bed*. *Drying Technology*, New York, v.15, n.6-8, p.2037-2043.
- PAN, Y. K.; ZHAO, L. J.; DONG, Z. X.; MUJUMDAR, A. S.; KUDRA, T. (1999). *Intermittent Drying of Carrot in a Vibrated fluid Bed: Effect on a Product Quality*. *Drying Technology*, New York, v.17, n.10, p.2323-2340.
- PAN, Y. K.; ZHAO, L. J.; DONG, Z. X.; MUJUMDAR, A. S.; KUDRA, T. (1998). *Quality Interaction Thermal Dehydration of Biological Materials*. In: *Drying '98, Proceedings of 11th International Drying Symposium (IDS' 98)*, Porto Carras, Greece. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.B, p.1343-1349.
- PANG, J. Z.; HU, W. B.; ZHAO, L. J.; PAN, Y. K. (1996). *Drying of a Vegetable Seeds in a Vibrated Fluid Bed*. In: *Drying '96, Proceedings of 10th International Drying Symposium (IDS' 96)*, Krakow, Poland. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.B, p.997-1000.
- PASSOS, M. L.; MASSARANI, G. (2001). *Análise das Forças Coesivas Interpartículas em Leito Fluidizados*. In: *Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, XXVIII.*, Rio de Janeiro, RJ, 2000. Anais do XXVIII ENEMP, Rio de Janeiro, RJ, Editora da COPPE/UFRJ, v.2, p.498-503.
- PASSOS, M. L.; MUJUMDAR, A. S. (2000). *Effect of Cohesive Forces on Fluidized and Spouted Beds of Wet Particles*. *Powder Technology*, Switzerland, v.110, n.3, p.222-238.
- PATEL, K.; BRIDGWATER, J.; BAKER, C. G. J.; SCHNEIDER, T. (1986). *Spouting Behavior of Wet Solids*. In: *Drying '86, Proceedings of 5th International Drying Symposium (IDS' 86)*, Boston, USA. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p.183-189.
- PERRY, R. H.; GREEN, D. W. (2000). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 7.ed., McGraw-Hill, New York, 3000p.
- PUNCOCHAR, M.; DRAHOS, J.; CERMAK, J.; SELUCKY, K. (1985). *Evaluation of Minimum Fluidization Velocity in Gas Fluidized Bed from Pressure Fluctuations*. *Chemical Engineering Communications*, New York, v.35, n.1-6, p.81-87.

- RAMESH, M. N.; KUMAR, M. A.; SRINIVASA RAO, P. N. S. (1996). *Application of Artificial Neural Networks to Investigate the Drying of Cooked Rice*. Journal of Food Process Engineering, Connecticut, v.19, n.3, p.321-329.
- RAMESH, M. N.; SRINIVASA RAO, P. N. S. (1996). *Drying Studies of Cooked Rice in a Vibrofluidized Bed Drier*. Journal of Food Engineering, England, v.27, n.4, p.389-396.
- RINGER, D. U.; MUJUMDAR, A. S. (1984). *Analysis of Aerodynamics and Heat Transfer in Vibro-fluidized Beds*. Drying Technology, New York, v.2, n.4, p.449-470.
- ROSATO, A.; STRANDBURG, K. J.; PRINZ, F.; SWENDSEN, R. H. (1987). *Why the Brazil Nuts are on Top - Size Segregation of Particulate Matter by Shaking*. Physical Review Letters, New York, v.58, n.10, p.1038-1040.
- ROWE, P. N.; NIENOW, A. W.; AGBIM, A. J. (1972). *The Mechanism by which Particles Segregate in Gas Fluidized Beds-Binary Systems for Near-Spherical Particles*. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, London, v.50, n.1, p.310-323.
- SAN JOSÉ, M. J.; OLAZAR, M.; PENAS, F. J.; BILBAO, J. (1994). *Segregation in Conical Spouted Beds with Binary and Ternary Mixtures of Equidensity Spherical-Particles*. Industrial & Engineering Chemistry Research, Washington, v.33, n.7, p.1838-1844.
- SCHNEIDER, T.; BRIDGWATER, J. (1993). *The Stability of Wet Spouted Beds*. Drying Technology, New York, v.11, n.2, p.277-301.
- SHAH, R. M.; GOYEL, S. K. (1980). *Drying Characteristics of Tea Fluidized on a Vibrating Bed (Part I)*. In: Drying '80, Proceedings of 2nd International Drying Symposium (IDS' 80), Montreal, Canada. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.2, p.176-181.
- SHAH, R. M.; GOYEL, S. K. (1995). *Drying Characteristics of Tea Fluidized on a Vibrating Bed (Part II) – Handling of Dust Grades & its Impacts on Quality*. Drying Technology, New York, v.13, n.5-7, p.1523-1541.
- SHINBROT, T.; MUZZIO, F. J. (1998). *Reverse Buoyancy in Shaken Granular Beds*. Physical Review Letters, New York, v.81, n.20, p.4365-4368.
- SHUHONG, Y.; BAOJIAO, M.; YIGIN, W. (1994). *Heat Transfer in a Quasi-continuous Vibrated Fluidized Bed*. In: Drying '94, Proceedings of 9th International Drying Symposium (IDS' 94), Gold Coast, Australia. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.A, p.317-325.
- SINZ, R.; LUND, D. B. (1974). *Effect of Vibration on Drying Rate of Food Particulates*. Process Biochemistry, London, v.9, n.5, p.27-34.

- SOPONRONNARIT, S.; WETCHACAMA, S.; TRUTASSANAWIN, S.; JARIYATONTIVAIT, W. (2000) *Design, Testing and Optimization of Vibro-Fluidized Bed Paddy Dryer*. In: Drying '2000, Proceedings of 12th International Drying Symposium (IDS' 2000), Noordwijkerhout, The Netherlands. Paper No.225 (Em CD-ROM).
- SPITZNER NETO, P. I. (2001). *Estudo da Secagem de Pastas e da Fluidodinâmica do Leito de Jorro na Presença de Pastas e Líquidos*. Tese, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 281p.
- STAKIĆ, M.; VODNIK, J.; TURANJANIN, V. (1996). *Experimental Investigation of Heat and Mass Transfer during Poppy Seed Drying in a Vibrofluidized Bed*. In: Drying '96, Proceedings of 10th International Drying Symposium (IDS' 96), Krakow, Poland. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.B, p.1085-1092.
- STRUMILLO, C.; MARKOWSKI, A.; KAMINSKI, W. (1983). *Modern Developments in Drying of Pastelike Materials*. In: MUJUMDAR, A. S. *Advances in Drying*, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, v.2, p.193-231.
- STRUMILLO, C.; PAKOWSKI, Z. (1980). *Drying of Granular Products in Vibrofluidized Beds*. In: Drying '80, Proceedings of 2nd International Drying Symposium (IDS' 80), Montreal, Canada. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p.211-226.
- TANNOUS, K.; HEMATI, M.; LAGUERIE, C. (1998). *Hydrodynamic Characteristics of Fluidized Beds Containing Large Polydispersed Particles*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, São Paulo, v.15, n.1, p.67-76.
- THOMAS, B; LIU, Y. A.; MASON, M. O.; SQUIRES, A. M. (1988). *Vibrated Beds: New Tools for Heat Transfer*. Chemical Engineering Progress, New York, v.84, n.6, p.65-75.
- THONGLIMP, V.; HIQUILY, N.; LAGUERIE, C. (1984). *Vitesse Minimale de Fluidisation et Expansion de Mélagenes de Particules Solides Fluidisées par un Gaz*. Powder Technology, Switzerland, v.39, n.2, p.223-239.
- VALCHÁŘ, J.; CHOC, M.; TŮMA, V.; KOLÁŘ, S.; SUŠENÍ, V. (1967). *Chemickem Průmyslu*. SNTL, Prague, Czech Republic. (Em Checo) In: STRUMILLO, C.; PAKOWSKI, Z. (1980). *Drying of Granular Products in Vibrofluidized Beds*. In: Drying '80, Proceedings of 2nd International Drying Symposium (IDS' 80), Montreal, Canada. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p.211-226.
- VERLOOP, J.; HEERTJES, P. M. (1974). *Periodic Pressure Fluctuations in Fluidized Beds*. Chemical Engineering Science, New York, v.29, n.4, p.1035-1042.

- WANK, J. R.; GEORGE, S. M.; WEIMER, A. W. (2001). *Vibro-Fluidization of Fine Boron Nitride at Low Pressure*. Powder Technology, Switzerland, v.121, n.2-3, p.195-204.
- WELTMAN, R. N. (1996). *Rheology*, Academic Press, New York, v.3. In: OLIVEIRA, W. P. (1996). *Estudo da Secagem de Pastas em Leito de Jorro Cônico*. Tese, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 202p.
- WEN, C. Y.; YU, Y. H. (1966). *A Generalized Method for Predicting Minimum Fluidization Velocity*. AICHE Journal, New York, v.12, n.3, p.610-&.
- WILKINSON, D. (1995). *Determination of Minimum Fluidization Velocity by Pressure Fluctuation Measurement*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa, v.73, n.4, p.562-565.
- WILLIAMS, J. C. (1976). *Segregation of Particulate Materials. Review*. Powder Technology, Switzerland, v.15, n.2, p.245-251.
- WINDHOLZ, M. (1996). *The Merck Index - An Encyclopedia of Chemical and Drugs*. 12.ed., Merck & Company Inc, New York, 1535p.
- WU, S. Y.; BAEYENS, J. (1998). *Segregation by Size Difference in Gas Fluidized Beds*. Powder Technology, Switzerland, v.98, n.2, p.139-150.
- ZABRODSHIY, S. S.; ZAMNIUS, I. L.; MALYUKOVICH, S. A. (1968). *Heat Transfer by a Layer of Thin-Dispersed Material Fluidized by a Gas Flow or Vibrational Superposition*. Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal, v.14, n.3, p.448-&. (Em Russo). In: ERDÉSZ, K. (1990). *Hydrodynamic Studies on Vibrated Fluidized Beds*. Powder Handling & Processing, Germany, v.2, n.4, p.327-339.

APÊNDICE A

Dados experimentais da queda de pressão no leito e do seu desvio padrão, para a análise dos ensaios fluidodinâmicos preliminares em leito fluidizado e vibrofluidizado.

Tabela A.1: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$				
f [Hz]	0,00	5,00	7,10	10,00	12,90				
Γ [-]	0,00	1,00	2,00	4,00	6,00				
d_p [m]	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$				
ϕ [-]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000				
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$				
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro				
U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)
1,10	1695,03	1,15	1511,80	1,11	1474,11	1,13	1453,29	1,12	1472,31
1,08	1677,22	1,08	1519,01	1,00	1515,19	1,11	1444,88	1,06	1461,51
0,98	1653,99	0,99	1550,93	0,97	1463,50	1,01	1426,31	0,99	1499,00
0,94	1612,31	0,92	1538,71	0,93	1432,81	0,91	1477,37	0,99	1406,99
0,86	1687,46	0,89	1510,00	0,90	1409,70	0,84	1436,25	1,02	1446,85
0,81	1671,30	0,76	1504,29	0,79	1412,75	0,75	1430,39	0,95	1420,85
0,71	1683,44	0,71	1502,78	0,69	1455,13	0,67	1410,91	0,88	1414,75
0,64	1654,83	0,66	1504,11	0,59	1449,05	0,60	1279,39	0,75	1469,92
0,58	1656,18	0,56	1358,25	0,49	1117,13	0,53	898,47	0,68	1318,41
0,54	1651,80	0,51	1149,05	0,44	777,45	0,50	726,14	0,62	1141,57
0,41	1024,72	0,26	780,30	0,09	289,33	0,43	516,94	0,58	599,44
0,12	320,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21	301,21	0,30	288,43
0,00	0,00					0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela A.2: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$					
f [Hz]	0,00	5,00	7,10	10,00	12,90					
Γ [-]	0,00	1,00	2,00	4,00	6,00					
d_p [m]	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$					
ϕ [-]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000					
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$					
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro					
	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)
	1,10	229,83	1,15	539,71	1,11	451,93	1,13	415,88	1,12	496,50
	1,08	238,75	1,08	454,38	1,00	399,91	1,11	394,03	1,06	496,01
	0,98	236,69	0,99	401,87	0,97	396,38	1,01	402,55	0,99	430,67
	0,94	259,22	0,92	303,70	0,93	396,77	0,91	325,45	0,99	460,35
	0,86	162,53	0,89	352,69	0,90	355,04	0,84	342,50	1,02	473,68
	0,81	190,94	0,76	436,84	0,79	316,63	0,75	304,88	0,95	450,17
	0,71	198,97	0,71	309,29	0,69	294,59	0,67	263,34	0,88	472,50
	0,64	147,93	0,66	281,66	0,59	280,88	0,60	278,52	0,75	472,11
	0,58	113,35	0,56	267,75	0,49	325,94	0,53	303,60	0,68	465,55
	0,54	74,85	0,51	270,20	0,44	252,07	0,50	324,47	0,62	481,71
	0,41	110,02	0,26	196,23	0,09	284,40	0,43	338,87	0,58	458,49
	0,12	66,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21	302,72	0,30	468,88
	0,00	0,00					0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela A.3: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$				
f [Hz]	0,00	5,00	7,10	10,00	12,90				
Γ [-]	0,00	1,00	2,00	4,00	6,00				
d_p [m]	$1,50 \times 10^{-3}$	$1,50 \times 10^{-3}$	$1,50 \times 10^{-3}$	$1,50 \times 10^{-3}$	$1,50 \times 10^{-3}$				
ϕ [-]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000				
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$				
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro				
U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)
1,60	1720,78	1,60	1497,16	1,61	1485,53	1,60	1477,54	1,58	1524,92
1,53	1711,03	1,51	1547,99	1,52	1564,09	1,53	1515,09	1,52	1552,70
1,49	1722,68	1,42	1613,07	1,46	1464,42	1,50	1504,55	1,50	1423,06
1,41	1691,79	1,39	1573,10	1,45	1457,75	1,46	1497,65	1,42	1509,13
1,37	1705,36	1,36	1580,86	1,37	1575,14	1,44	1487,76	1,40	1498,49
1,32	1765,97	1,33	1508,37	1,29	1466,60	1,42	1570,05	1,37	1457,63
1,27	1722,37	1,24	1525,16	1,20	1546,84	1,38	1485,22	1,31	1502,76
1,15	1751,70	1,17	1513,58	1,26	1466,94	1,31	1544,40	1,29	1483,33
1,15	1718,41	1,09	1565,52	1,15	1447,20	1,26	1558,79	1,16	1464,06
1,10	1713,07	0,99	1472,81	1,04	1464,77	1,20	1472,71	1,19	1447,71
1,06	1715,22	0,85	1363,05	0,92	1491,91	1,14	1541,12	1,14	1493,41
1,07	1680,61	0,79	1320,53	0,86	1217,31	1,07	1483,33	0,98	1436,55
0,96	1667,35	0,64	1033,78	0,73	1104,39	0,99	1367,18	0,89	1306,87
0,77	1718,23	0,48	806,24	0,65	965,08	0,86	1368,38	0,80	1123,76
0,65	1275,43	0,30	404,52	0,43	443,60	0,81	1135,99	0,76	752,68
0,45	705,30	0,15	21,48	0,15	23,34	0,73	901,44	0,64	566,00
0,18	154,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,62	737,99	0,52	376,41
0,00	0,00					0,44	487,05	0,26	109,90
						0,28	189,97	0,00	0,00
						0,00	0,00		

Tabela A.4: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$				
f [Hz]	0,00	5,00	7,10	10,00	12,90				
Γ [-]	0,00	1,00	2,00	4,00	6,00				
d_p [m]	$1,50 \times 10^{-3}$	$1,50 \times 10^{-3}$	$1,50 \times 10^{-3}$	$1,50 \times 10^{-3}$	$1,50 \times 10^{-3}$				
ϕ [-]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000				
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$				
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro				
U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)
1,60	217,39	1,60	489,25	1,61	470,93	1,60	387,17	1,58	546,76
1,53	247,47	1,51	339,56	1,52	416,86	1,53	367,28	1,52	419,99
1,49	279,60	1,42	354,55	1,46	475,93	1,50	463,59	1,50	464,47
1,41	345,05	1,39	304,29	1,45	463,68	1,46	439,00	1,42	438,51
1,37	212,30	1,36	344,07	1,37	290,18	1,44	451,14	1,40	460,35
1,32	187,02	1,33	296,26	1,29	387,86	1,42	303,41	1,37	443,60
1,27	153,22	1,24	345,34	1,20	334,76	1,38	359,05	1,31	465,45
1,15	168,31	1,17	294,10	1,26	371,89	1,31	329,96	1,29	421,95
1,15	130,49	1,09	290,97	1,15	376,88	1,26	347,89	1,16	429,89
1,10	125,60	0,99	279,90	1,04	338,78	1,20	323,30	1,19	429,49
1,06	112,08	0,85	267,26	0,92	315,65	1,14	307,82	1,14	400,01
1,07	109,04	0,79	268,34	0,86	346,81	1,07	280,58	0,98	415,88
0,96	97,76	0,64	239,73	0,73	313,01	0,99	315,85	0,89	402,45
0,77	75,34	0,48	185,26	0,65	321,53	0,86	247,17	0,80	413,92
0,65	111,49	0,30	72,20	0,43	222,58	0,81	275,68	0,76	386,58
0,45	86,45	0,15	95,24	0,15	148,62	0,73	282,25	0,64	343,09
0,18	68,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,62	289,11	0,52	361,50
0,00	0,00					0,44	254,72	0,26	303,11
						0,28	216,41	0,00	0,00
						0,00	0,00		

Tabela A.5: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$					
f [Hz]	0,00	5,00	7,10	10,00	12,90					
Γ [-]	0,00	1,00	2,00	4,00	6,00					
d_p [m]	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$					
ϕ [-]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000					
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$					
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro					
	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)
	1,87	1754,54	1,91	1454,24	1,89	1512,86	1,89	1534,29	1,89	1488,75
	1,84	1711,79	1,84	1554,06	1,81	1520,23	1,85	1578,01	1,86	1509,10
	1,80	1623,98	1,80	1510,84	1,80	1483,73	1,79	1534,48	1,84	1351,29
	1,73	1702,70	1,68	1527,76	1,76	1479,53	1,76	1496,66	1,79	1434,74
	1,71	1685,77	1,62	1657,98	1,70	1560,42	1,67	1573,99	1,72	1412,02
	1,63	1668,08	1,62	1540,60	1,67	1462,39	1,67	1476,57	1,68	1600,49
	1,59	1680,55	1,54	1543,12	1,59	1523,80	1,57	1549,01	1,69	1510,73
	1,54	1709,05	1,47	1562,92	1,55	1516,20	1,53	1494,26	1,62	1567,67
	1,48	1698,03	1,40	1612,29	1,48	1521,50	1,47	1518,03	1,61	1510,11
	1,41	1671,95	1,33	1508,31	1,45	1436,29	1,44	1485,63	1,56	1559,01
	1,28	1719,78	1,28	1515,89	1,34	1485,74	1,40	1479,00	1,54	1554,52
	1,26	1670,38	1,21	1493,68	1,24	1514,36	1,34	1468,54	1,50	1535,63
	1,17	1690,72	1,13	1390,13	1,16	1278,62	1,25	1317,49	1,46	1506,64
	1,16	1658,81	1,03	1275,83	1,14	1210,24	1,20	1099,04	1,40	1511,70
	1,08	1673,68	0,96	1144,78	1,04	1107,48	0,99	987,49	1,34	1466,16
	0,96	1608,45	0,85	1053,62	0,92	983,97	0,86	683,71	1,32	1392,52
	0,97	1426,94	0,74	852,87	0,73	745,66	0,82	559,04	1,17	1313,97
	0,77	1051,38	0,58	689,62	0,58	532,94	0,60	472,36	1,07	1212,04
	0,70	910,37	0,37	418,43	0,42	326,08	0,40	301,89	1,03	694,84
	0,51	512,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,83	553,38
	0,33	330,38							0,58	333,40
	0,00	0,00							0,41	198,58
									0,00	0,00

Tabela A.6: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$					
f [Hz]	0,00	5,00	7,10	10,00	12,90					
Γ [-]	0,00	1,00	2,00	4,00	6,00					
d_p [m]	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$					
ϕ [-]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000					
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$					
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro					
	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)
	1,87	383,55	1,91	557,83	1,89	455,55	1,89	465,15	1,89	474,46
	1,84	303,70	1,84	469,66	1,81	433,22	1,85	413,92	1,86	393,83
	1,80	394,62	1,80	328,88	1,80	560,28	1,79	344,07	1,84	466,53
	1,73	280,78	1,68	417,84	1,76	447,32	1,76	292,73	1,79	484,75
	1,71	271,27	1,62	330,64	1,70	381,49	1,67	287,64	1,72	462,61
	1,63	189,08	1,62	348,18	1,67	333,48	1,67	293,12	1,68	349,94
	1,59	151,75	1,54	272,65	1,59	337,89	1,57	268,92	1,69	405,59
	1,54	185,85	1,47	259,32	1,55	336,42	1,53	280,29	1,62	370,42
	1,48	165,66	1,40	257,95	1,48	298,02	1,47	296,06	1,61	366,99
	1,41	157,34	1,33	269,71	1,45	332,90	1,44	256,97	1,56	371,59
	1,28	118,93	1,28	228,56	1,34	322,12	1,40	270,49	1,54	348,38
	1,26	116,97	1,21	277,05	1,24	312,72	1,34	263,54	1,50	363,27
	1,17	112,66	1,13	258,34	1,16	320,65	1,25	269,32	1,46	371,20
	1,16	105,32	1,03	271,37	1,14	312,42	1,20	301,16	1,40	374,24
	1,08	83,86	0,96	251,39	1,04	298,61	0,99	252,17	1,34	386,88
	0,96	79,22	0,85	235,12	0,92	305,56	0,86	234,05	1,32	379,14
	0,97	87,06	0,74	172,03	0,73	278,03	0,82	228,95	1,17	379,14
	0,77	114,62	0,58	152,54	0,58	231,70	0,60	237,77	1,07	345,83
	0,70	92,14	0,37	71,18	0,42	179,67	0,40	178,79	1,03	340,15
	0,51	59,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,83	290,18
	0,33	60,60							0,58	260,89
	0,00	0,00							0,41	232,77
									0,00	0,00

Tabela A.7: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$				
f [Hz]	0,00	5,00	7,10	10,00	12,90				
Γ [-]	0,00	1,00	2,00	4,00	6,00				
d_p [m]	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$				
ϕ [-]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000				
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$				
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro				
U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)
2,63	1625,94	2,62	1462,15	2,64	1460,80	2,58	1580,10	2,60	1543,48
2,54	1655,63	2,53	1614,45	2,55	1517,43	2,53	1500,70	2,54	1541,98
2,44	1745,77	2,43	1585,30	2,45	1491,99	2,45	1516,33	2,46	1538,92
2,38	1668,21	2,38	1566,89	2,39	1517,21	2,40	1491,09	2,40	1527,50
2,28	1717,89	2,29	1512,60	2,24	1585,49	2,28	1561,81	2,29	1569,52
2,23	1705,86	2,20	1557,56	2,21	1477,88	2,25	1537,24	2,21	1511,65
2,17	1716,69	2,15	1561,17	2,18	1463,22	2,18	1532,77	2,17	1531,21
2,12	1688,01	2,11	1539,23	2,10	1556,77	2,12	1550,76	2,13	1473,83
2,05	1730,91	2,06	1587,97	2,07	1463,15	2,09	1499,38	2,07	1465,99
2,03	1704,56	2,02	1596,00	2,02	1537,32	2,02	1535,46	2,04	1478,45
1,98	1650,44	2,00	1474,51	1,95	1499,71	1,99	1473,42	1,99	1514,28
1,94	1728,74	1,97	1493,56	1,89	1515,80	1,95	1486,18	1,93	1483,97
1,88	1700,80	1,92	1484,04	1,88	1473,25	1,90	1533,35	1,87	1526,75
1,84	1691,12	1,84	1557,82	1,86	1474,04	1,83	1489,97	1,86	1440,11
1,77	1718,87	1,82	1531,64	1,80	1536,82	1,79	1516,56	1,80	1521,15
1,76	1683,12	1,79	1520,80	1,76	1400,37	1,67	1468,79	1,73	1523,51
1,71	1680,08	1,72	1491,61	1,69	1462,97	1,63	1415,41	1,70	1459,37
1,67	1664,58	1,67	1419,75	1,62	1249,36	1,64	1188,42	1,67	1277,00
1,59	1677,09	1,63	1368,48	1,50	1116,15	1,60	1101,80	1,58	1295,95
1,53	1622,86	1,57	1383,07	1,44	1042,72	1,55	932,30	1,55	881,92
1,47	1519,37	1,52	1306,18	1,29	971,14	1,47	896,32	1,51	711,20
1,42	1399,14	1,42	1149,50	1,23	839,88	1,37	748,30	1,39	677,75
1,37	1290,61	1,33	1039,58	1,04	742,14	1,24	661,52	1,33	638,71
1,23	1012,30	1,22	1014,81	0,98	571,33	1,11	470,75	1,22	472,08
1,11	849,38	1,00	838,36	0,66	352,71	0,84	424,24	1,08	403,05
0,87	531,87	0,75	552,70	0,40	179,37	0,65	284,54	0,83	270,45
0,62	331,40	0,51	290,68	0,00	0,00	0,31	127,96	0,63	217,99
0,00	0,00	0,00	0,00			0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela A.8: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$1,0 \times 10^{-2}$									
f [Hz]	0,00		5,00		7,10		10,00		12,90	
Γ [-]	0,00		1,00		2,00		4,00		6,00	
d_p [m]	$3,67 \times 10^{-3}$									
ϕ [-]	0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000	
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$									
partícula	vidro									
	U_s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,63	416,17	2,62	417,54	2,64	563,42	2,58	303,90	2,60	380,22
	2,54	353,27	2,53	404,41	2,55	437,72	2,53	422,54	2,54	364,54
	2,44	420,77	2,43	437,33	2,45	483,77	2,45	381,98	2,46	355,72
	2,38	315,56	2,38	439,19	2,39	374,24	2,40	334,66	2,40	370,61
	2,28	332,90	2,29	239,83	2,24	342,89	2,28	253,54	2,29	331,43
	2,23	301,65	2,20	301,16	2,21	465,94	2,25	271,27	2,21	352,98
	2,17	273,23	2,15	184,18	2,18	365,32	2,18	287,83	2,17	330,64
	2,12	174,58	2,11	326,92	2,10	366,70	2,12	226,90	2,13	368,46
	2,05	271,18	2,06	355,14	2,07	362,09	2,09	280,39	2,07	333,78
	2,03	225,52	2,02	216,71	2,02	274,31	2,02	226,99	2,04	319,28
	1,98	154,99	2,00	287,34	1,95	347,49	1,99	278,62	1,99	329,57
	1,94	183,69	1,97	274,21	1,89	309,09	1,95	257,95	1,93	296,65
	1,88	172,62	1,92	285,48	1,88	305,47	1,90	202,21	1,87	300,47
	1,84	107,57	1,84	244,43	1,86	282,35	1,83	262,26	1,86	339,75
	1,77	114,82	1,82	229,44	1,80	257,17	1,79	218,47	1,80	291,16
	1,76	112,27	1,79	244,33	1,76	293,02	1,67	209,85	1,73	316,14
	1,71	98,56	1,72	202,60	1,69	291,46	1,63	255,21	1,70	307,91
	1,67	90,74	1,67	210,53	1,62	297,33	1,64	269,61	1,67	318,50
	1,59	95,24	1,63	218,86	1,50	315,65	1,60	266,47	1,58	301,45
	1,53	86,67	1,57	212,49	1,44	292,83	1,55	277,05	1,55	313,89
	1,47	89,01	1,52	215,24	1,29	299,88	1,47	270,98	1,51	328,88
	1,42	99,93	1,42	239,73	1,23	271,37	1,37	217,20	1,39	304,58
	1,37	116,29	1,33	233,95	1,04	277,94	1,24	198,88	1,33	279,90
	1,23	119,82	1,22	210,73	0,98	237,38	1,11	166,25	1,22	260,11
	1,11	115,70	1,00	164,88	0,66	188,39	0,84	193,59	1,08	197,50
	0,87	76,67	0,75	102,96	0,40	111,78	0,65	167,23	0,83	191,04
	0,62	58,06	0,51	59,00	0,00	0,00	0,31	124,42	0,63	179,18
	0,00	0,00	0,00	0,00			0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela A.9: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$				
f [Hz]	0,00	5,00	7,10	10,00	12,90				
Γ [-]	0,00	1,00	2,00	4,00	6,00				
d_p [m]	$4,38 \times 10^{-3}$	$4,38 \times 10^{-3}$	$4,38 \times 10^{-3}$	$4,38 \times 10^{-3}$	$4,38 \times 10^{-3}$				
ϕ [-]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000				
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$				
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro				
U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)
2,81	1650,06	2,84	1525,52	2,82	1616,37	2,83	1561,70	2,84	1544,56
2,81	1592,47	2,79	1518,25	2,75	1575,09	2,77	1554,22	2,78	1542,01
2,72	1610,30	2,73	1604,40	2,71	1514,62	2,71	1573,75	2,72	1535,73
2,66	1689,91	2,66	1521,86	2,65	1509,58	2,63	1541,02	2,68	1544,63
2,61	1667,98	2,63	1535,98	2,59	1576,23	2,59	1522,64	2,64	1506,95
2,56	1672,20	2,56	1568,30	2,54	1520,75	2,54	1574,52	2,56	1564,17
2,52	1630,65	2,51	1587,08	2,50	1478,34	2,52	1580,01	2,51	1533,61
2,46	1650,09	2,44	1576,81	2,41	1532,35	2,48	1593,17	2,45	1527,52
2,44	1618,78	2,41	1584,70	2,38	1525,79	2,43	1507,44	2,39	1514,01
2,33	1665,98	2,30	1523,66	2,32	1565,82	2,35	1584,90	2,35	1518,79
2,30	1621,76	2,27	1515,78	2,25	1511,26	2,30	1553,05	2,32	1491,47
2,22	1642,68	2,17	1611,58	2,12	1588,48	2,23	1530,30	2,24	1509,83
2,16	1655,59	2,11	1541,78	2,08	1561,60	2,19	1504,23	2,18	1497,60
2,11	1645,81	2,03	1473,45	2,02	1508,03	2,12	1557,91	2,12	1553,21
2,06	1664,88	1,95	1440,03	1,97	1330,25	2,09	1543,96	2,07	1528,60
2,02	1676,73	1,88	1411,60	1,92	1382,95	2,05	1542,42	2,03	1548,49
1,96	1678,23	1,82	1377,16	1,90	1223,98	2,01	1509,79	1,99	1527,99
1,90	1705,70	1,77	1354,77	1,84	1224,29	1,95	1461,39	1,95	1505,09
1,86	1691,32	1,68	1286,15	1,82	1194,50	1,92	1366,78	1,91	1516,43
1,83	1685,28	1,61	1151,73	1,75	1137,49	1,87	1233,37	1,86	1483,31
1,79	1719,92	1,50	1092,74	1,69	1115,36	1,81	1153,42	1,83	1070,86
1,77	1664,07	1,30	947,96	1,57	1038,75	1,77	1179,82	1,80	1013,16
1,73	1644,10	1,23	869,28	1,50	982,47	1,74	1066,74	1,81	967,85
1,64	1478,17	1,12	689,76	1,33	751,01	1,69	834,00	1,72	706,12
1,47	1201,77	0,87	522,89	1,15	534,98	1,55	823,38	1,56	644,51
1,30	952,19	0,60	319,64	0,86	339,37	1,46	640,89	1,44	493,01
1,07	656,67	0,00	0,00	0,55	197,71	1,29	457,69	1,33	358,55
0,79	402,68			0,00	0,00	1,01	340,52	1,14	313,79
0,00	0,00					0,00	0,00	1,16	334,33
								0,96	265,18
								0,00	0,00

Tabela A.10: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	1,0x10 ⁻²									
f [Hz]	0,00		5,00		7,10		10,00		12,90	
Γ [-]	0,00		1,00		2,00		4,00		6,00	
d _p [m]	4,38x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,81	257,36	2,84	313,89	2,82	304,39	2,83	366,60	2,84	348,77
	2,81	331,04	2,79	364,93	2,75	261,38	2,77	242,77	2,78	363,27
	2,72	281,76	2,73	267,94	2,71	360,13	2,71	189,28	2,72	254,82
	2,66	252,86	2,66	251,88	2,65	341,52	2,63	193,19	2,68	305,66
	2,61	375,32	2,63	369,15	2,59	284,79	2,59	237,87	2,64	323,59
	2,56	290,28	2,56	212,98	2,54	315,65	2,54	202,60	2,56	325,55
	2,52	182,71	2,51	268,43	2,50	279,80	2,52	182,71	2,51	291,26
	2,46	302,43	2,44	311,44	2,41	328,68	2,48	235,91	2,45	299,49
	2,44	289,89	2,41	242,47	2,38	213,77	2,43	275,19	2,39	288,13
	2,33	250,51	2,30	296,84	2,32	244,73	2,35	239,14	2,35	273,72
	2,30	211,42	2,27	269,12	2,25	317,03	2,30	203,97	2,32	260,99
	2,22	228,76	2,17	232,97	2,12	243,55	2,23	207,89	2,24	260,30
	2,16	205,15	2,11	217,78	2,08	224,84	2,19	224,35	2,18	259,91
	2,11	161,75	2,03	203,48	2,02	226,50	2,12	182,32	2,12	232,58
	2,06	140,58	1,95	190,35	1,97	279,31	2,09	164,78	2,07	242,18
	2,02	141,37	1,88	193,49	1,92	274,90	2,05	162,14	2,03	236,01
	1,96	133,43	1,82	192,61	1,90	291,36	2,01	168,21	1,99	249,92
	1,90	117,37	1,77	205,54	1,84	277,84	1,95	174,19	1,95	229,74
	1,86	105,61	1,68	195,45	1,82	252,86	1,92	190,25	1,91	239,73
	1,83	111,19	1,61	222,09	1,75	288,91	1,87	240,71	1,86	251,39
	1,79	96,80	1,50	212,00	1,69	258,54	1,81	235,32	1,83	294,30
	1,77	88,49	1,30	176,74	1,57	269,32	1,77	214,84	1,80	317,71
	1,73	87,03	1,23	153,03	1,50	274,80	1,74	234,93	1,81	307,52
	1,64	82,67	1,12	124,22	1,33	282,74	1,69	271,86	1,72	322,32
	1,47	103,94	0,87	90,43	1,15	231,60	1,55	240,51	1,56	283,42
	1,30	124,52	0,60	75,48	0,86	162,63	1,46	226,21	1,44	243,55
	1,07	97,34	0,00	0,00	0,55	118,44	1,29	156,75	1,33	188,20
	0,79	74,81			0,00	0,00	1,01	163,80	1,14	191,33
	0,00	0,00					0,00	0,00	1,16	196,13
									0,96	184,38
									0,00	0,00

Tabela A.13: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$					
f [Hz]	0,00	5,00	7,10	10,00	12,90					
Γ [-]	0,00	1,00	2,00	4,00	6,00					
d_p [m]	$2,51 \times 10^{-3}$	$2,51 \times 10^{-3}$	$2,51 \times 10^{-3}$	$2,51 \times 10^{-3}$	$2,51 \times 10^{-3}$					
ϕ [-]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000					
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$					
partícula	poliestireno	poliestireno	poliestireno	poliestireno	poliestireno					
	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)
	1,50	692,54	1,45	736,47	1,46	710,84	1,47	667,22	1,46	669,10
	1,40	707,81	1,42	703,60	1,40	702,62	1,42	658,10	1,42	668,21
	1,31	696,01	1,34	726,52	1,37	694,96	1,33	672,71	1,36	647,63
	1,22	703,63	1,28	697,23	1,28	691,75	1,27	670,89	1,23	668,53
	1,16	699,62	1,16	680,25	1,20	667,09	1,18	670,70	1,10	666,57
	0,99	687,03	1,04	684,21	1,03	667,38	1,08	668,64	0,98	689,37
	0,89	681,53	0,93	677,31	0,94	660,07	0,94	639,20	0,86	672,13
	0,81	631,57	0,84	648,19	0,76	663,54	0,81	649,48	0,72	675,04
	0,66	537,54	0,62	544,34	0,61	517,42	0,67	597,17	0,60	558,30
	0,45	336,99	0,50	435,92	0,51	426,19	0,50	338,64	0,45	298,24
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,37	285,68	0,00	0,00	0,00	0,00
					0,00	0,00				

Tabela A.14: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$					
f [Hz]	0,00	5,00	7,10	10,00	12,90					
Γ [-]	0,00	1,00	2,00	4,00	6,00					
d_p [m]	$2,51 \times 10^{-3}$	$2,51 \times 10^{-3}$	$2,51 \times 10^{-3}$	$2,51 \times 10^{-3}$	$2,51 \times 10^{-3}$					
ϕ [-]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000					
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$					
partícula	poliestireno	poliestireno	poliestireno	poliestireno	poliestireno					
	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)
	1,50	144,11	1,45	320,16	1,46	323,49	1,47	271,67	1,46	340,64
	1,40	182,03	1,42	317,03	1,40	306,35	1,42	250,31	1,42	323,59
	1,31	141,37	1,34	350,14	1,37	310,95	1,33	270,78	1,36	321,24
	1,22	153,03	1,28	298,71	1,28	244,63	1,27	274,21	1,23	303,41
	1,16	138,63	1,16	242,77	1,20	254,52	1,18	237,28	1,10	291,65
	0,99	124,81	1,04	222,19	1,03	241,69	1,08	212,79	0,98	287,54
	0,89	100,52	0,93	203,38	0,94	244,53	0,94	187,41	0,86	295,47
	0,81	86,78	0,84	195,06	0,76	222,39	0,81	119,62	0,72	304,58
	0,66	83,74	0,62	164,29	0,61	194,47	0,67	181,44	0,60	291,75
	0,45	67,01	0,50	139,12	0,51	166,55	0,50	167,62	0,45	273,33
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,37	148,72	0,00	0,00	0,00	0,00
					0,00	0,00				

Tabela A.15: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$					
f [Hz]	0,00	5,00	7,10	10,00	12,90					
Γ [-]	0,00	1,00	2,00	4,00	6,00					
d_p [m]	$2,60 \times 10^{-3}$	$2,60 \times 10^{-3}$	$2,60 \times 10^{-3}$	$2,60 \times 10^{-3}$	$2,60 \times 10^{-3}$					
ϕ [-]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000					
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$					
partícula	polipropileno	polipropileno	polipropileno	polipropileno	polipropileno					
	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)
	1,45	557,93	1,48	565,69	1,46	528,44	1,46	488,95	1,46	526,91
	1,39	557,97	1,41	563,75	1,38	524,78	1,41	517,88	1,42	525,77
	1,31	569,54	1,33	580,98	1,33	517,59	1,29	517,20	1,32	498,75
	1,26	558,35	1,20	526,16	1,26	504,58	1,26	510,27	1,21	510,52
	1,20	548,76	1,10	530,08	1,17	524,46	1,11	499,02	1,17	495,77
	1,05	553,39	1,01	507,38	1,02	511,07	1,05	509,37	1,02	502,93
	0,92	556,40	0,86	510,97	0,93	504,55	0,86	494,23	0,91	512,76
	0,81	554,23	0,77	512,07	0,76	515,50	0,73	500,57	0,76	517,49
	0,63	536,62	0,60	459,63	0,59	497,31	0,59	466,26	0,60	500,04
	0,48	416,27	0,41	316,85	0,42	259,67	0,44	263,08	0,44	355,98
	0,00	0,00	0,17	23,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
			0,00	0,00						

Tabela A.16: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$1,0 \times 10^{-2}$									
f [Hz]	0,00		5,00		7,10		10,00		12,90	
Γ [-]	0,00		1,00		2,00		4,00		6,00	
d_p [m]	$2,60 \times 10^{-3}$									
ϕ [-]	0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000	
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$									
partícula	polipropileno									
	U_s (m/s)	δp (N/m ²)								
	1,45	130,79	1,48	187,81	1,46	251,39	1,46	236,10	1,46	264,61
	1,39	176,44	1,41	264,61	1,38	270,69	1,41	247,17	1,42	258,54
	1,31	130,00	1,33	231,99	1,33	270,00	1,29	207,69	1,32	263,05
	1,26	125,20	1,20	172,82	1,26	243,35	1,26	222,19	1,21	268,63
	1,20	105,02	1,10	222,39	1,17	227,19	1,11	225,13	1,17	239,92
	1,05	103,55	1,01	144,80	1,02	201,52	1,05	195,94	1,02	256,38
	0,92	95,17	0,86	156,26	0,93	197,80	0,86	181,83	0,91	238,95
	0,81	92,34	0,77	154,01	0,76	188,49	0,73	166,64	0,76	230,81
	0,63	76,08	0,60	157,14	0,59	163,31	0,59	156,36	0,60	254,91
	0,48	74,65	0,41	97,73	0,42	135,49	0,44	159,59	0,44	218,67
	0,00	0,00	0,17	83,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
			0,00	0,00						

Tabela A.17: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$					
f [Hz]	0,00	5,00	7,10	10,00	12,90					
Γ [-]	0,00	1,00	2,00	4,00	6,00					
d_p [m]	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$					
ϕ [-]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000					
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$					
partícula	polipropileno	polipropileno	polipropileno	polipropileno	polipropileno					
	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)
	1,56	570,32	1,58	542,18	1,57	543,20	1,57	533,62	1,58	537,92
	1,47	574,47	1,49	517,18	1,51	541,77	1,52	521,43	1,50	529,35
	1,44	571,28	1,39	543,64	1,40	533,12	1,43	524,51	1,44	530,50
	1,36	560,50	1,37	521,73	1,35	527,73	1,31	537,98	1,31	545,81
	1,21	579,00	1,27	528,73	1,23	532,34	1,21	519,60	1,21	534,09
	1,15	564,16	1,16	519,21	1,13	535,27	1,11	520,05	1,11	528,52
	1,05	570,56	1,07	509,03	1,03	521,23	1,02	518,91	1,02	525,72
	0,94	556,37	0,90	497,31	0,91	502,28	0,90	468,46	0,88	511,19
	0,81	516,59	0,82	442,64	0,79	424,98	0,83	463,24	0,79	480,15
	0,66	385,54	0,68	378,17	0,67	365,47	0,69	330,58	0,66	345,92
	0,52	266,83	0,47	309,92	0,57	277,25	0,52	217,92	0,46	209,83
	0,00	0,00	0,27	169,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
			0,00	0,00						

Tabela A.18: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$1,0 \times 10^{-2}$									
f [Hz]	0,00		5,00		7,10		10,00		12,90	
Γ [-]	0,00		1,00		2,00		4,00		6,00	
d_p [m]	$3,67 \times 10^{-3}$									
ϕ [-]	0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000	
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$									
partícula	polipropileno									
	U_s (m/s)	δp (N/m ²)								
	1,56	127,55	1,58	238,46	1,57	213,47	1,57	188,30	1,58	191,92
	1,47	125,99	1,49	221,21	1,51	222,00	1,52	180,07	1,50	218,67
	1,44	130,89	1,39	175,36	1,40	202,21	1,43	190,16	1,44	208,18
	1,36	133,82	1,37	165,27	1,35	225,92	1,31	167,04	1,31	205,73
	1,21	115,60	1,27	159,69	1,23	203,19	1,21	171,44	1,21	201,82
	1,15	101,59	1,16	178,40	1,13	210,73	1,11	157,24	1,11	206,71
	1,05	89,15	1,07	149,79	1,03	189,86	1,02	158,90	1,02	201,72
	0,94	82,65	0,90	146,17	0,91	173,50	0,90	152,05	0,88	200,15
	0,81	75,68	0,82	130,59	0,79	162,82	0,83	148,23	0,79	202,30
	0,66	74,39	0,68	126,09	0,67	152,73	0,69	136,37	0,66	187,32
	0,52	61,34	0,47	97,39	0,57	143,03	0,52	135,39	0,46	173,89
	0,00	0,00	0,27	92,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
			0,00	0,00						

APÊNDICE B

Dados experimentais da queda de pressão no leito e do seu desvio padrão, para a análise dos experimentos fluidodinâmicos em leito fluidizado e vibrofluidizado.

Tabela B.1: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$0,0 \times 10^{-2}$	$0,0 \times 10^{-2}$	$0,0 \times 10^{-2}$	$0,0 \times 10^{-2}$	$0,0 \times 10^{-2}$				
f [Hz]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
Γ [-]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
d_p [m]	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$				
ϕ [-]	0,0000	0,0009	0,0018	0,0036	0,0072				
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$				
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro				
U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)
2,00	1424,09	2,01	1425,73	1,99	1365,34	1,98	1421,36	1,99	1397,77
1,94	1404,83	1,96	1430,86	1,93	1432,12	1,92	1439,92	1,93	1362,95
1,88	1417,14	1,89	1419,68	1,84	1438,25	1,87	1390,70	1,86	1372,72
1,81	1405,99	1,81	1407,47	1,76	1414,25	1,76	1395,48	1,79	1347,32
1,76	1385,44	1,75	1436,54	1,69	1418,19	1,69	1410,39	1,70	1339,40
1,69	1410,68	1,70	1406,51	1,63	1412,15	1,62	1409,68	1,61	1261,50
1,63	1417,14	1,61	1428,13	1,52	1380,64	1,53	1384,43	1,53	1298,22
1,58	1380,09	1,56	1423,96	1,45	1410,30	1,45	1331,62	1,42	1273,78
1,55	1385,23	1,51	1395,68	1,39	1346,04	1,39	1301,59	1,30	1208,12
1,51	1394,93	1,44	1422,28	1,30	1320,49	1,30	1263,12	1,21	1191,11
1,43	1387,88	1,37	1360,76	1,22	1279,31	1,24	1245,19	1,12	1117,70
1,35	1373,07	1,30	1387,96	1,16	1240,03	1,17	1239,12	1,02	1112,51
1,28	1372,48	1,26	1326,43	1,07	1198,80	1,10	1227,62	0,93	1039,92
1,14	1352,62	1,23	1276,79	0,99	1140,96	1,05	1119,50	0,84	909,39
1,04	1330,00	1,11	1308,53	0,93	1090,09	0,94	983,14	0,72	793,86
0,92	1315,55	1,07	1129,55	0,88	964,33	0,80	807,70	0,60	666,08
0,85	1312,46	1,00	1045,59	0,71	775,58	0,72	685,72	0,48	556,11
0,71	1324,36	0,93	959,63	0,63	638,59	0,53	498,62	0,38	426,49
0,64	1235,18	0,90	912,28	0,49	462,74	0,40	299,04	0,28	287,95
0,63	1011,54	0,78	767,98	0,30	282,36	0,00	0,00	0,00	0,00
0,61	793,51	0,65	612,03	0,00					
0,45	492,45	0,56	476,36						
0,32	275,90	0,36	290,03						
0,00	0,00	0,00	0,00						

Tabela B.2: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,0x10 ⁻²									
f [Hz]	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
Γ [-]	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
d _p [m]	1,10x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,00	464,39	2,01	411,36	1,99	290,33	1,98	355,33	1,99	422,90
	1,94	439,73	1,96	396,48	1,93	439,68	1,92	509,70	1,93	387,26
	1,88	367,85	1,89	327,44	1,84	488,05	1,87	392,61	1,86	403,25
	1,81	321,52	1,81	324,00	1,76	511,03	1,76	373,09	1,79	360,19
	1,76	362,47	1,75	365,78	1,69	344,00	1,69	450,46	1,70	300,52
	1,69	406,14	1,70	365,14	1,63	433,50	1,62	376,17	1,61	255,18
	1,63	357,10	1,61	290,84	1,52	347,30	1,53	303,78	1,53	276,22
	1,58	314,99	1,56	326,39	1,45	356,44	1,45	270,49	1,42	213,08
	1,55	350,63	1,51	263,33	1,39	210,43	1,39	173,34	1,30	165,68
	1,51	353,77	1,44	389,73	1,30	189,87	1,30	162,65	1,21	139,49
	1,43	333,97	1,37	156,85	1,22	141,80	1,24	132,38	1,12	100,36
	1,35	310,76	1,30	237,54	1,16	131,10	1,17	114,53	1,02	95,91
	1,28	235,51	1,26	118,03	1,07	95,45	1,10	75,62	0,93	71,72
	1,14	356,06	1,23	86,33	0,99	88,76	1,05	70,34	0,84	75,04
	1,04	283,15	1,11	69,57	0,93	70,17	0,94	70,70	0,72	70,94
	0,92	196,35	1,07	78,04	0,88	68,77	0,80	80,72	0,60	78,21
	0,85	143,74	1,00	83,73	0,71	87,80	0,72	88,38	0,48	84,26
	0,71	104,43	0,93	90,91	0,63	87,58	0,53	85,41	0,38	88,85
	0,64	76,09	0,90	85,73	0,49	88,82	0,40	107,78	0,28	85,42
	0,63	86,34	0,78	84,16	0,30	106,52	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,61	84,02	0,65	96,52	0,00	0,00				
	0,45	101,95	0,56	110,17						
	0,32	121,50	0,36	123,74						
	0,00	0,00	0,00	0,00						

Tabela B.5: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$0,9 \times 10^{-2}$	$0,9 \times 10^{-2}$	$0,9 \times 10^{-2}$	$0,9 \times 10^{-2}$	$0,9 \times 10^{-2}$				
f [Hz]	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25				
Γ [-]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00				
d_p [m]	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$				
ϕ [-]	0,0000	0,0009	0,0018	0,0036	0,0072				
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$				
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro				
U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)
2,00	1349,49	2,01	1395,00	2,01	1388,23	2,00	1468,31	1,99	1460,73
1,95	1359,99	1,96	1411,55	2,00	1320,42	1,95	1471,37	1,97	1397,66
1,92	1294,71	1,90	1407,85	1,92	1364,44	1,90	1465,96	1,90	1442,78
1,85	1341,58	1,83	1408,49	1,84	1377,54	1,85	1455,33	1,87	1441,39
1,78	1294,65	1,79	1345,11	1,83	1322,73	1,81	1455,43	1,83	1356,30
1,73	1257,32	1,73	1387,81	1,75	1373,76	1,75	1426,50	1,75	1396,04
1,65	1281,45	1,65	1380,72	1,68	1303,87	1,68	1427,26	1,68	1377,83
1,60	1291,14	1,58	1358,39	1,59	1329,50	1,61	1398,51	1,63	1363,91
1,54	1291,35	1,51	1302,41	1,51	1286,20	1,51	1456,77	1,58	1377,84
1,45	1210,62	1,45	1293,65	1,39	1350,03	1,40	1418,48	1,52	1376,84
1,34	1264,87	1,38	1253,75	1,29	1313,36	1,27	1428,92	1,43	1317,68
1,25	1282,90	1,25	1310,80	1,19	1247,70	1,17	1377,19	1,28	1322,82
1,13	1202,21	1,13	1333,76	1,02	1254,62	1,02	1360,16	1,13	1293,64
1,00	1190,74	1,02	1351,59	0,87	1246,09	0,91	1352,39	1,04	1311,11
0,86	1201,99	0,86	1299,78	0,68	1134,29	0,69	1200,19	0,85	1249,40
0,69	1073,17	0,70	1257,21	0,29	753,46	0,39	864,45	0,64	1090,25
0,53	927,14	0,51	1014,58	0,18	403,70	0,14	486,92	0,11	458,08
0,35	648,28	0,31	834,50	0,14	197,30	0,11	68,37	0,00	0,00
0,22	396,84	0,20	419,11	0,00	0,00	0,00	0,00		
0,00	0,00	0,00	0,00						

Tabela B.6: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,9x10 ⁻²									
f [Hz]	5,25		5,25		5,25		5,25		5,25	
Γ [-]	1,00		1,00		1,00		1,00		1,00	
d _p [m]	1,10x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,00	558,52	2,01	567,77	2,01	566,10	2,00	474,22	1,99	407,67
	1,95	610,77	1,96	517,74	2,00	534,60	1,95	501,23	1,97	473,70
	1,92	626,79	1,90	513,43	1,92	444,11	1,90	480,50	1,90	440,67
	1,85	513,80	1,83	466,94	1,84	491,49	1,85	448,56	1,87	417,48
	1,78	538,16	1,79	462,43	1,83	509,52	1,81	412,73	1,83	435,23
	1,73	528,45	1,73	373,76	1,75	485,51	1,75	352,63	1,75	340,08
	1,65	541,46	1,65	516,57	1,68	518,31	1,68	356,61	1,68	407,24
	1,60	615,62	1,58	444,84	1,59	411,98	1,61	382,90	1,63	260,95
	1,54	469,76	1,51	590,92	1,51	412,51	1,51	296,23	1,58	201,34
	1,45	501,00	1,45	507,03	1,39	266,23	1,40	243,29	1,52	142,79
	1,34	477,60	1,38	507,30	1,29	349,66	1,27	162,29	1,43	294,21
	1,25	425,88	1,25	446,65	1,19	354,21	1,17	249,60	1,28	263,54
	1,13	479,95	1,13	328,54	1,02	309,65	1,02	247,00	1,13	281,04
	1,00	422,03	1,02	276,58	0,87	241,87	0,91	207,73	1,04	251,77
	0,86	281,89	0,86	243,56	0,68	239,08	0,69	208,83	0,85	216,30
	0,69	284,97	0,70	218,37	0,29	177,35	0,39	167,61	0,64	215,03
	0,53	235,44	0,51	248,39	0,18	85,48	0,14	89,06	0,11	88,03
	0,35	197,50	0,31	209,52	0,14	72,55	0,11	78,79	0,00	89,03
	0,22	100,85	0,20	81,60	0,00	69,68	0,00	89,18		
	0,00	107,78	0,00	87,11						

Tabela B.13: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$0,9 \times 10^{-2}$	$0,9 \times 10^{-2}$	$0,9 \times 10^{-2}$	$0,9 \times 10^{-2}$	$0,9 \times 10^{-2}$				
f [Hz]	7,43	7,43	7,43	7,43	7,43				
Γ [-]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00				
d_p [m]	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$				
ϕ [-]	0,0000	0,0009	0,0018	0,0036	0,0072				
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$				
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro				
U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)
2,00	1424,89	2,00	1415,94	2,00	1472,11	1,99	1518,96	1,99	1508,00
1,96	1420,24	1,96	1446,26	1,96	1409,88	1,99	1480,42	1,95	1495,84
1,89	1422,54	1,90	1439,18	1,89	1435,20	1,93	1487,41	1,86	1469,34
1,83	1430,02	1,87	1451,72	1,83	1422,66	1,90	1494,74	1,82	1438,84
1,78	1394,14	1,87	1392,58	1,78	1444,38	1,83	1503,29	1,74	1420,67
1,73	1364,84	1,80	1389,87	1,72	1403,56	1,81	1500,79	1,64	1411,02
1,66	1350,51	1,75	1377,86	1,66	1390,05	1,79	1477,81	1,57	1426,78
1,59	1339,06	1,71	1381,64	1,64	1371,51	1,72	1497,06	1,49	1368,27
1,54	1290,98	1,66	1386,38	1,59	1337,82	1,67	1470,40	1,35	1340,14
1,42	1335,53	1,63	1337,01	1,50	1389,64	1,58	1469,83	1,23	1366,48
1,29	1329,54	1,58	1385,94	1,44	1338,29	1,52	1413,83	1,12	1339,25
1,18	1285,36	1,52	1348,60	1,33	1382,63	1,43	1441,38	0,98	1350,87
1,07	1319,64	1,43	1370,93	1,21	1383,78	1,33	1428,78	0,85	1304,89
0,91	1096,91	1,29	1381,50	1,03	1364,54	1,21	1409,06	0,71	1102,48
0,70	1221,04	1,22	1293,91	0,91	1305,91	1,06	1447,41	0,60	1027,92
0,50	883,22	1,07	1252,61	0,73	1098,19	0,95	1431,71	0,40	716,22
0,31	646,01	0,88	1113,18	0,44	841,00	0,68	1125,99	0,29	524,21
0,22	359,01	0,72	1235,36	0,25	399,78	0,37	677,58	0,13	315,21
0,00	0,00	0,42	830,93	0,00	0,00	0,17	374,76	0,00	0,00
		0,26	404,64			0,00	0,00		
		0,00	0,00						

Tabela B.14: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,9x10 ⁻²									
f [Hz]	7,43		7,43		7,43		7,43		7,43	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00		2,00		2,00	
d _p [m]	1,10x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,00	676,81	2,00	551,79	2,00	659,49	1,99	582,83	1,99	617,37
	1,96	506,88	1,96	569,54	1,96	568,49	1,99	567,69	1,95	617,57
	1,89	459,52	1,90	557,39	1,89	504,68	1,93	607,87	1,86	635,55
	1,83	475,62	1,87	458,15	1,83	547,22	1,90	543,08	1,82	450,97
	1,78	568,32	1,87	536,40	1,78	559,15	1,83	471,88	1,74	444,40
	1,73	522,41	1,80	506,88	1,72	472,97	1,81	429,86	1,64	490,21
	1,66	574,78	1,75	477,67	1,66	402,27	1,79	556,23	1,57	433,19
	1,59	532,14	1,71	523,98	1,64	422,68	1,72	453,90	1,49	428,78
	1,54	515,66	1,66	463,09	1,59	481,75	1,67	399,54	1,35	454,23
	1,42	449,70	1,63	457,88	1,50	441,65	1,58	366,32	1,23	334,75
	1,29	456,86	1,58	442,93	1,44	478,81	1,52	396,82	1,12	340,47
	1,18	350,88	1,52	439,42	1,33	352,53	1,43	323,06	0,98	350,48
	1,07	391,86	1,43	495,75	1,21	353,72	1,33	302,71	0,85	289,45
	0,91	430,84	1,29	369,18	1,03	268,60	1,21	305,06	0,71	283,04
	0,70	248,61	1,22	473,42	0,91	256,10	1,06	201,56	0,60	285,69
	0,50	301,54	1,07	435,09	0,73	276,61	0,95	185,94	0,40	197,09
	0,31	231,84	0,88	399,06	0,44	270,05	0,68	273,11	0,29	171,11
	0,22	204,47	0,72	257,15	0,25	227,34	0,37	245,18	0,13	148,22
	0,00	189,96	0,42	263,86	0,00	139,25	0,17	190,84	0,00	140,78
			0,26	237,69			0,00	127,61		
			0,00	166,96						

Tabela B.16: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$					
f [Hz]	5,76	5,76	5,76	5,76	5,76					
Γ [-]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00					
d_p [m]	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$					
ϕ [-]	0,0000	0,0009	0,0018	0,0036	0,0072					
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$					
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro					
	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)
	1,97	639,13	1,99	542,94	2,00	514,11	2,07	540,41	1,95	624,11
	1,95	681,50	1,97	632,12	1,96	530,87	2,04	454,89	1,88	503,88
	1,83	661,80	1,88	585,96	1,91	606,80	2,00	686,94	1,82	581,61
	1,78	607,24	1,79	603,65	1,84	583,08	1,91	566,15	1,73	483,93
	1,70	692,44	1,70	525,99	1,77	576,38	1,85	517,53	1,67	475,73
	1,61	560,12	1,65	618,37	1,71	616,08	1,82	426,64	1,60	486,02
	1,53	626,13	1,54	539,38	1,67	409,55	1,74	505,36	1,56	493,76
	1,46	531,20	1,50	540,84	1,58	543,73	1,68	342,35	1,47	523,25
	1,35	561,10	1,45	571,42	1,53	384,26	1,60	377,35	1,40	436,82
	1,28	615,99	1,37	486,70	1,47	324,06	1,52	403,93	1,31	352,71
	1,19	593,61	1,28	524,79	1,40	411,16	1,38	278,64	1,25	409,66
	1,07	569,06	1,17	437,24	1,29	345,79	1,29	265,10	1,12	445,79
	0,98	445,65	1,08	418,27	1,19	348,86	1,23	346,11	1,04	431,17
	0,90	367,84	0,98	374,55	1,10	312,30	1,04	349,91	0,93	415,87
	0,73	317,15	0,84	335,25	0,92	338,94	0,89	323,80	0,73	271,27
	0,57	245,27	0,71	312,94	0,79	260,87	0,76	275,64	0,67	202,81
	0,55	237,68	0,66	247,93	0,70	259,32	0,60	281,65	0,54	163,45
	0,47	240,99	0,59	247,82	0,58	260,12	0,42	272,00	0,38	143,25
	0,37	230,86	0,54	243,69	0,45	269,04	0,29	245,00	0,00	139,81
	0,00	239,44	0,48	245,91	0,33	251,26	0,20	200,46		
			0,00	221,07	0,00	212,93	0,00	128,81		

Tabela B.17: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$2,1 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-2}$				
f [Hz]	4,86	4,86	4,86	4,86	4,86				
Γ [-]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00				
d_p [m]	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$				
ϕ [-]	0,0000	0,0009	0,0018	0,0036	0,0072				
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$				
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro				
U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)
2,09	1294,66	2,04	1269,39	2,05	1311,22	2,04	1444,67	2,06	1464,47
2,01	1247,20	2,02	1277,03	1,99	1299,90	2,00	1399,17	2,01	1413,73
1,94	1275,02	1,94	1284,88	1,95	1224,25	1,93	1362,92	1,96	1432,51
1,88	1269,79	1,87	1279,58	1,88	1261,17	1,81	1412,30	1,88	1425,73
1,82	1261,92	1,82	1202,99	1,78	1315,61	1,75	1357,10	1,80	1399,17
1,76	1265,24	1,75	1226,88	1,71	1231,54	1,66	1393,98	1,74	1346,47
1,68	1235,69	1,64	1217,60	1,63	1243,11	1,61	1300,61	1,67	1385,56
1,60	1235,44	1,58	1249,76	1,51	1248,52	1,51	1299,51	1,59	1347,93
1,51	1199,23	1,47	1220,77	1,42	1245,00	1,38	1346,76	1,57	1254,32
1,40	1209,94	1,34	1210,34	1,33	1181,21	1,32	1287,83	1,49	1240,29
1,29	1209,60	1,24	1123,94	1,23	1204,06	1,23	1312,68	1,45	1306,69
1,16	1204,39	1,12	1168,22	1,10	1199,80	1,15	1214,04	1,37	1188,73
1,05	1086,89	1,05	1140,07	1,04	1054,43	1,03	1138,51	1,25	1214,19
0,97	1028,68	0,97	1106,07	0,93	1101,98	0,96	1144,27	1,18	1177,54
0,80	1021,54	0,84	1066,53	0,83	1082,18	0,83	980,27	1,07	1119,99
0,66	893,34	0,65	976,26	0,72	1024,95	0,77	859,53	0,97	957,80
0,58	745,01	0,43	632,81	0,63	870,48	0,60	617,77	0,85	850,59
0,40	480,83	0,25	451,19	0,58	726,72	0,46	435,40	0,75	733,54
0,23	282,49	0,00	0,00	0,46	545,04	0,00	0,00	0,63	613,60
0,00	0,00			0,33	337,34			0,47	389,00
				0,28	255,58			0,00	0,00
				0,00	0,00				

Tabela B.18: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	2,1x10 ⁻²									
f [Hz]	4,86		4,86		4,86		4,86		4,86	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00		2,00		2,00	
d _p [m]	1,10x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,09	559,68	2,04	618,88	2,05	525,35	2,04	586,60	2,06	640,23
	2,01	664,22	2,02	593,10	1,99	631,61	2,00	617,14	2,01	573,24
	1,94	701,59	1,94	694,13	1,95	662,89	1,93	621,74	1,96	634,49
	1,88	650,66	1,87	605,38	1,88	563,88	1,81	528,24	1,88	570,09
	1,82	602,01	1,82	569,23	1,78	533,05	1,75	433,91	1,80	530,94
	1,76	439,90	1,75	605,00	1,71	589,82	1,66	521,60	1,74	402,85
	1,68	601,60	1,64	575,69	1,63	544,21	1,61	578,57	1,67	454,96
	1,60	624,09	1,58	573,00	1,51	450,67	1,51	545,19	1,59	448,72
	1,51	608,76	1,47	539,33	1,42	574,51	1,38	327,68	1,57	474,19
	1,40	590,59	1,34	556,47	1,33	484,79	1,32	271,43	1,49	453,97
	1,29	580,38	1,24	462,41	1,23	546,60	1,23	305,86	1,45	244,58
	1,16	494,75	1,12	530,69	1,10	492,14	1,15	514,95	1,37	515,21
	1,05	494,92	1,05	414,39	1,04	528,06	1,03	487,60	1,25	495,47
	0,97	480,21	0,97	444,64	0,93	466,60	0,96	427,49	1,18	418,90
	0,80	504,72	0,84	471,48	0,83	464,51	0,83	293,19	1,07	356,65
	0,66	451,68	0,65	456,09	0,72	443,89	0,77	299,96	0,97	287,80
	0,58	346,89	0,43	339,03	0,63	356,52	0,60	261,01	0,85	284,95
	0,40	282,05	0,25	279,22	0,58	358,50	0,46	254,69	0,75	267,82
	0,23	256,77	0,00	219,33	0,46	299,16	0,00	175,89	0,63	252,95
	0,00	229,51			0,33	256,24			0,47	243,99
					0,28	235,46			0,00	169,47
					0,00	206,19				

Tabela B.20: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$0,3 \times 10^{-2}$	$0,3 \times 10^{-2}$	$0,3 \times 10^{-2}$	$0,3 \times 10^{-2}$	$0,3 \times 10^{-2}$				
f [Hz]	18,20	18,20	18,20	18,20	18,20				
Γ [-]	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00				
d_p [m]	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$				
ϕ [-]	0,0000	0,0009	0,0018	0,0036	0,0072				
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$				
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro				
U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)
2,01	531,05	2,02	444,06	1,97	546,16	1,99	581,91	2,03	486,72
1,94	479,00	1,95	497,72	1,94	545,65	1,94	564,15	1,98	608,92
1,89	538,75	1,90	521,70	1,87	573,83	1,87	756,64	1,93	650,87
1,83	490,69	1,85	508,40	1,81	590,55	1,82	640,26	1,84	588,48
1,80	500,97	1,74	509,67	1,75	545,23	1,74	736,62	1,79	553,75
1,75	537,81	1,69	517,47	1,70	447,12	1,69	597,98	1,72	593,74
1,68	516,75	1,61	565,69	1,65	563,28	1,61	657,69	1,64	488,08
1,61	529,66	1,51	418,80	1,54	591,41	1,48	596,29	1,54	526,97
1,48	544,13	1,39	539,24	1,44	533,65	1,32	493,39	1,43	412,93
1,41	561,99	1,27	549,76	1,34	602,60	1,28	506,43	1,29	341,98
1,23	470,80	1,13	485,88	1,24	499,04	1,13	460,42	1,20	434,58
1,17	575,01	1,02	492,15	1,11	510,55	1,03	448,37	1,09	388,31
1,05	522,02	0,92	464,42	1,02	507,85	0,92	462,01	0,95	387,18
0,96	514,08	0,76	482,52	0,86	471,77	0,76	486,52	0,80	444,33
0,78	517,59	0,60	535,99	0,76	486,37	0,62	524,83	0,65	486,57
0,61	548,61	0,46	584,14	0,57	555,94	0,41	527,28	0,44	513,52
0,38	588,10	0,36	541,27	0,40	554,11	0,30	464,57	0,30	461,18
0,28	479,99	0,29	454,85	0,27	443,76	0,25	434,73	0,11	306,52
0,16	400,33	0,15	380,36	0,20	384,96	0,15	343,07	0,00	299,94
0,00	310,26	0,00	306,13	0,00	306,83	0,00	316,27		

Tabela B.21: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$0,9 \times 10^{-2}$	$0,9 \times 10^{-2}$	$0,9 \times 10^{-2}$	$0,9 \times 10^{-2}$	$0,9 \times 10^{-2}$				
f [Hz]	10,51	10,51	10,51	10,51	10,51				
Γ [-]	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00				
d_p [m]	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$				
ϕ [-]	0,0000	0,0009	0,0018	0,0036	0,0072				
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$				
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro				
U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)
2,00	1371,26	1,97	1400,77	1,95	1491,72	1,98	1471,78	1,94	1521,19
1,94	1362,32	1,92	1441,38	1,93	1426,71	1,90	1457,75	1,92	1450,58
1,86	1420,94	1,85	1392,75	1,85	1511,28	1,82	1497,55	1,82	1453,93
1,78	1391,28	1,76	1391,60	1,78	1451,29	1,75	1464,75	1,75	1481,92
1,74	1280,87	1,67	1364,19	1,68	1439,85	1,66	1433,40	1,64	1479,23
1,60	1383,94	1,58	1404,92	1,60	1422,91	1,57	1446,80	1,53	1435,35
1,53	1304,33	1,49	1336,47	1,49	1387,96	1,48	1404,29	1,44	1422,80
1,44	1342,94	1,39	1354,47	1,36	1404,13	1,36	1449,95	1,37	1398,29
1,27	1305,26	1,28	1395,12	1,26	1402,39	1,28	1403,08	1,26	1388,07
1,20	1281,01	1,17	1353,63	1,15	1335,82	1,19	1348,72	1,16	1367,30
1,11	1215,23	1,06	1281,44	1,11	1304,14	1,06	1383,43	1,03	1331,09
1,01	1242,41	0,98	1281,06	0,96	1365,79	1,01	1368,90	0,98	1307,04
0,87	1214,29	0,85	1304,97	0,86	1300,83	0,89	1368,70	0,85	1137,52
0,75	1196,14	0,70	1322,11	0,79	1317,35	0,71	1272,21	0,72	924,18
0,58	896,92	0,59	1124,81	0,63	987,32	0,64	884,56	0,58	746,93
0,40	562,46	0,47	749,26	0,55	746,99	0,47	571,84	0,44	557,01
0,23	328,33	0,36	563,19	0,35	504,94	0,34	353,07	0,33	346,97
0,00	0,00	0,19	392,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		0,00	0,00						

Tabela B.22: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,9x10 ⁻²									
f [Hz]	10,51		10,51		10,51		10,51		10,51	
Γ [-]	4,00		4,00		4,00		4,00		4,00	
d _p [m]	1,10x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,00	538,42	1,97	508,22	1,95	636,20	1,98	710,91	1,94	499,10
	1,94	541,47	1,92	592,80	1,93	592,25	1,90	662,35	1,92	790,32
	1,86	545,18	1,85	584,43	1,85	501,10	1,82	571,42	1,82	559,58
	1,78	655,99	1,76	510,14	1,78	485,43	1,75	463,33	1,75	517,51
	1,74	618,82	1,67	560,25	1,68	503,06	1,66	487,58	1,64	401,39
	1,60	524,62	1,58	531,34	1,60	494,82	1,57	470,41	1,53	417,71
	1,53	560,01	1,49	516,69	1,49	561,24	1,48	486,13	1,44	351,58
	1,44	551,77	1,39	500,46	1,36	477,59	1,36	433,71	1,37	434,57
	1,27	428,41	1,28	468,02	1,26	441,71	1,28	511,96	1,26	343,68
	1,20	510,75	1,17	417,61	1,15	403,37	1,19	459,94	1,16	318,15
	1,11	498,82	1,06	412,81	1,11	437,69	1,06	328,20	1,03	281,34
	1,01	400,67	0,98	404,06	0,96	312,75	1,01	260,05	0,98	253,51
	0,87	383,84	0,85	323,25	0,86	283,82	0,89	260,83	0,85	347,07
	0,75	294,49	0,70	251,15	0,79	294,36	0,71	230,43	0,72	335,40
	0,58	251,70	0,59	232,32	0,63	229,50	0,64	225,64	0,58	208,84
	0,40	194,83	0,47	227,63	0,55	220,56	0,47	223,44	0,44	216,75
	0,23	260,83	0,36	239,90	0,35	240,91	0,34	232,55	0,33	194,74
	0,00	259,68	0,19	248,38	0,00	274,50	0,00	270,91	0,00	225,24
			0,00	255,97						

Tabela B.23: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$				
f [Hz]	8,14	8,14	8,14	8,14	8,14				
Γ [-]	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00				
d_p [m]	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$				
ϕ [-]	0,0000	0,0009	0,0018	0,0036	0,0072				
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$				
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro				
U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)
2,11	1400,04	2,05	1433,39	2,06	1466,54	2,08	1470,15	2,05	1579,93
2,08	1485,53	2,04	1388,78	2,04	1446,32	2,04	1492,87	2,01	1548,46
2,03	1331,68	1,99	1409,06	1,98	1490,03	2,00	1498,15	1,98	1521,21
1,98	1401,62	1,94	1392,09	1,97	1469,45	1,92	1481,03	1,94	1490,69
1,94	1389,17	1,89	1352,71	1,94	1443,92	1,87	1452,64	1,89	1475,09
1,87	1397,29	1,83	1398,99	1,88	1488,88	1,81	1472,27	1,86	1471,93
1,81	1402,85	1,75	1337,41	1,83	1437,40	1,76	1468,40	1,82	1500,94
1,76	1387,03	1,67	1398,08	1,73	1455,42	1,64	1484,15	1,75	1487,86
1,69	1361,90	1,57	1419,70	1,65	1438,14	1,55	1434,40	1,66	1479,35
1,61	1364,53	1,50	1363,83	1,53	1446,55	1,48	1513,34	1,55	1442,01
1,51	1327,07	1,38	1376,89	1,45	1355,55	1,40	1492,76	1,46	1453,64
1,42	1342,02	1,25	1340,17	1,34	1387,11	1,29	1425,94	1,34	1466,19
1,31	1333,36	1,16	1317,57	1,25	1317,17	1,00	1222,61	1,26	1385,98
1,19	1271,23	1,05	1128,92	1,16	1415,57	0,86	1075,52	1,14	1451,23
1,06	1133,18	0,88	1082,88	1,02	1405,87	0,68	851,98	0,94	1152,65
0,92	959,21	0,64	825,74	0,87	1102,98	0,51	690,50	0,82	968,81
0,59	704,19	0,60	717,15	0,73	905,37	0,38	504,66	0,65	835,75
0,38	428,39	0,42	511,18	0,57	755,59	0,32	284,91	0,50	694,46
0,33	219,33	0,36	335,61	0,41	492,94	0,00	0,00	0,42	552,44
0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	307,78			0,35	270,66
				0,00	0,00			0,00	0,00

Tabela B.24: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$				
f [Hz]	8,14	8,14	8,14	8,14	8,14				
Γ [-]	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00				
d_p [m]	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$				
ϕ [-]	0,0000	0,0009	0,0018	0,0036	0,0072				
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$				
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro				
U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)
2,11	625,18	2,05	632,82	2,06	653,52	2,08	527,50	2,05	593,80
2,08	730,78	2,04	597,22	2,04	564,50	2,04	640,67	2,01	644,96
2,03	583,16	1,99	567,32	1,98	587,89	2,00	660,88	1,98	580,72
1,98	697,79	1,94	581,97	1,97	503,08	1,92	546,77	1,94	572,12
1,94	622,60	1,89	603,76	1,94	593,96	1,87	540,68	1,89	498,17
1,87	572,09	1,83	539,93	1,88	583,60	1,81	520,96	1,86	494,23
1,81	632,90	1,75	572,69	1,83	550,09	1,76	509,00	1,82	447,19
1,76	575,80	1,67	469,20	1,73	519,50	1,64	475,35	1,75	467,82
1,69	604,32	1,57	460,38	1,65	520,24	1,55	411,78	1,66	476,63
1,61	494,32	1,50	541,98	1,53	478,45	1,48	423,93	1,55	428,61
1,51	585,59	1,38	443,48	1,45	442,84	1,40	379,78	1,46	426,69
1,42	474,41	1,25	422,12	1,34	376,93	1,29	389,84	1,34	376,32
1,31	428,96	1,16	433,18	1,25	433,09	1,00	364,29	1,26	449,88
1,19	435,07	1,05	448,64	1,16	354,15	0,86	399,42	1,14	325,34
1,06	461,77	0,88	376,47	1,02	334,38	0,68	412,72	0,94	348,17
0,92	405,61	0,64	439,18	0,87	383,33	0,51	433,05	0,82	389,89
0,59	440,88	0,60	441,91	0,73	422,75	0,38	388,98	0,65	378,04
0,38	423,49	0,42	448,44	0,57	396,12	0,32	272,54	0,50	389,59
0,33	290,09	0,36	362,12	0,41	399,08	0,00	271,17	0,42	361,55
0,00	313,02	0,00	306,67	0,32	300,09			0,35	246,21
				0,00	293,08			0,00	229,39

Tabela B.25: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$2,1 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-2}$				
f [Hz]	6,88	6,88	6,88	6,88	6,88				
Γ [-]	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00				
d_p [m]	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$				
ϕ [-]	0,0000	0,0009	0,0018	0,0036	0,0072				
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$				
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro				
U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)
2,08	1338,77	2,06	1368,49	2,06	1353,09	1,98	1490,01	1,95	1475,95
2,04	1353,23	2,03	1295,93	2,00	1389,86	1,93	1435,02	1,90	1475,91
1,96	1415,47	1,96	1254,53	1,93	1384,68	1,90	1385,40	1,86	1394,28
1,91	1381,89	1,89	1324,32	1,89	1345,53	1,79	1407,26	1,79	1403,28
1,84	1370,54	1,84	1280,84	1,83	1371,08	1,71	1432,54	1,68	1405,09
1,79	1327,00	1,76	1302,58	1,77	1347,73	1,65	1385,18	1,57	1363,39
1,68	1365,45	1,71	1236,30	1,72	1370,19	1,54	1359,87	1,48	1356,09
1,66	1331,03	1,65	1286,79	1,63	1331,89	1,45	1348,66	1,41	1378,98
1,59	1306,07	1,56	1281,89	1,52	1342,50	1,34	1352,51	1,27	1445,20
1,50	1336,12	1,49	1278,87	1,45	1323,80	1,27	1356,03	1,23	1355,84
1,44	1317,28	1,42	1278,93	1,42	1292,44	1,14	1365,13	1,04	1363,69
1,38	1317,26	1,36	1245,75	1,32	1368,21	1,02	1201,39	0,97	1326,94
1,26	1274,83	1,24	1244,83	1,21	1297,49	0,85	1005,15	0,81	984,37
1,15	1253,41	1,14	1222,09	1,12	1245,87	0,76	838,83	0,69	778,64
1,03	1071,01	1,01	1089,69	0,99	1245,54	0,59	701,04	0,50	643,03
0,95	933,13	0,88	868,05	0,87	1226,61	0,46	544,12	0,41	455,53
0,78	762,12	0,82	687,47	0,79	1080,96	0,47	415,76	0,37	329,50
0,64	444,75	0,68	594,82	0,64	879,13	0,29	255,95	0,26	241,93
0,00	0,00	0,58	352,02	0,45	671,74	0,00	0,00	0,00	0,00
		0,00	0,00	0,43	559,45				
				0,34	402,90				
				0,00	0,00				

Tabela B.26: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	2,1x10 ⁻²									
f [Hz]	6,88		6,88		6,88		6,88		6,88	
Γ [-]	4,00		4,00		4,00		4,00		4,00	
d _p [m]	1,10x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,08	597,01	2,06	601,03	2,06	585,92	1,98	516,45	1,95	641,35
	2,04	583,09	2,03	674,82	2,00	686,69	1,93	690,12	1,90	676,56
	1,96	692,11	1,96	617,54	1,93	605,58	1,90	610,86	1,86	641,02
	1,91	605,08	1,89	644,65	1,89	624,06	1,79	557,06	1,79	638,65
	1,84	669,10	1,84	631,49	1,83	622,42	1,71	597,10	1,68	608,81
	1,79	617,16	1,76	630,28	1,77	612,45	1,65	647,18	1,57	561,17
	1,68	600,53	1,71	627,72	1,72	615,25	1,54	469,53	1,48	538,87
	1,66	545,24	1,65	593,75	1,63	622,29	1,45	551,03	1,41	545,95
	1,59	602,09	1,56	615,16	1,52	648,26	1,34	557,17	1,27	501,66
	1,50	639,07	1,49	632,86	1,45	639,77	1,27	529,15	1,23	554,64
	1,44	552,57	1,42	608,35	1,42	575,52	1,14	479,88	1,04	477,44
	1,38	512,85	1,36	578,84	1,32	591,09	1,02	541,98	0,97	510,04
	1,26	503,03	1,24	507,22	1,21	620,38	0,85	493,12	0,81	514,62
	1,15	423,28	1,14	437,29	1,12	635,57	0,76	487,89	0,69	480,94
	1,03	416,54	1,01	395,45	0,99	524,63	0,59	512,92	0,50	410,79
	0,95	405,69	0,88	402,17	0,87	516,83	0,46	400,47	0,41	266,88
	0,78	436,68	0,82	399,89	0,79	506,79	0,47	286,01	0,37	233,45
	0,64	339,56	0,68	446,24	0,64	486,77	0,29	227,60	0,26	219,76
	0,00	379,39	0,58	334,09	0,45	424,72	0,00	254,29	0,00	256,76
			0,00	414,74	0,43	407,42				
					0,34	305,93				
					0,00	299,24				

Tabela B.27: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,0x10 ⁻²									
f [Hz]	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
Γ [-]	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
d _p [m]	2,19x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)								
	2,47	1414,44	2,46	1437,56	2,47	1447,48	2,42	1441,98	2,50	1436,97
	2,43	1406,27	2,41	1445,93	2,42	1431,40	2,41	1472,53	2,49	1427,85
	2,39	1426,11	2,39	1417,44	2,39	1438,18	2,38	1448,60	2,41	1431,42
	2,33	1421,28	2,35	1427,23	2,34	1459,18	2,33	1463,48	2,36	1462,97
	2,30	1437,34	2,30	1440,63	2,29	1449,73	2,28	1460,76	2,31	1410,19
	2,25	1437,63	2,27	1429,36	2,24	1451,86	2,22	1467,75	2,27	1441,36
	2,19	1429,10	2,23	1452,19	2,18	1443,81	2,17	1462,10	2,17	1414,14
	2,16	1429,79	2,17	1442,04	2,12	1428,52	2,11	1447,05	2,16	1399,15
	2,09	1423,26	2,15	1444,78	2,07	1429,41	2,05	1446,87	2,09	1356,17
	2,04	1403,42	2,07	1452,09	2,01	1434,19	1,98	1456,87	1,98	1310,99
	1,96	1427,96	2,07	1428,29	1,92	1419,91	1,94	1408,57	1,92	1302,01
	1,92	1415,08	2,02	1429,91	1,88	1395,98	1,87	1390,41	1,85	1290,42
	1,84	1404,60	1,97	1449,39	1,78	1373,02	1,80	1369,39	1,73	1227,20
	1,78	1383,15	1,93	1413,42	1,68	1345,64	1,68	1375,79	1,66	1258,19
	1,71	1376,66	1,86	1413,52	1,63	1339,88	1,63	1313,77	1,57	1151,10
	1,60	1394,93	1,78	1413,97	1,48	1336,35	1,51	1213,25	1,50	1097,97
	1,48	1317,09	1,68	1398,60	1,39	1295,32	1,41	1151,19	1,44	1049,90
	1,36	1349,93	1,60	1417,04	1,27	1093,72	1,30	1059,67	1,37	997,67
	1,22	1339,05	1,51	1392,73	1,21	1014,20	1,22	986,56	1,28	917,59
	1,08	1366,83	1,37	1335,71	1,11	886,78	1,10	869,45	1,19	861,55
	1,02	1357,28	1,28	1275,54	0,99	793,72	1,02	784,08	1,11	754,55
	0,89	1299,40	1,19	1130,04	0,90	687,85	0,93	713,63	1,06	704,98
	0,73	1012,76	1,05	942,53	0,80	560,06	0,82	575,74	0,95	612,98
	0,61	761,40	0,97	863,95	0,73	490,62	0,71	476,15	0,85	525,61
	0,52	607,02	0,89	717,24	0,64	407,54	0,61	385,28	0,76	447,95
	0,40	451,81	0,73	581,48	0,53	318,20	0,45	266,87	0,61	331,43
	0,21	291,85	0,67	481,29	0,41	219,73	0,00	0,00	0,49	213,62
	0,00	0,00	0,55	386,20	0,00	0,00			0,00	0,00
			0,44	292,80						
			0,32	166,46						
			0,00	0,00						

Tabela B.28: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,0x10 ⁻²									
f [Hz]	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
Γ [-]	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
d _p [m]	2,19x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,47	321,91	2,46	302,19	2,47	303,75	2,42	368,34	2,50	357,27
	2,43	385,28	2,41	400,34	2,42	285,58	2,41	361,88	2,49	301,54
	2,39	288,12	2,39	329,40	2,39	336,32	2,38	351,98	2,41	291,66
	2,33	387,68	2,35	302,05	2,34	244,59	2,33	292,46	2,36	377,36
	2,30	305,96	2,30	310,83	2,29	304,13	2,28	278,37	2,31	279,17
	2,25	346,01	2,27	353,57	2,24	257,63	2,22	271,17	2,27	331,76
	2,19	324,43	2,23	315,26	2,18	270,82	2,17	252,94	2,17	222,51
	2,16	252,77	2,17	274,51	2,12	265,01	2,11	296,78	2,16	204,87
	2,09	339,91	2,15	268,91	2,07	243,81	2,05	248,49	2,09	172,95
	2,04	299,88	2,07	251,24	2,01	253,47	1,98	208,01	1,98	138,03
	1,96	248,27	2,07	302,07	1,92	226,74	1,94	162,41	1,92	129,58
	1,92	329,96	2,02	285,56	1,88	222,24	1,87	133,06	1,85	118,56
	1,84	308,51	1,97	307,91	1,78	173,67	1,80	124,05	1,73	96,23
	1,78	337,09	1,93	289,07	1,68	138,39	1,68	104,95	1,66	87,25
	1,71	327,60	1,86	249,89	1,63	128,79	1,63	109,74	1,57	84,84
	1,60	290,55	1,78	258,57	1,48	112,76	1,51	104,27	1,50	81,17
	1,48	321,77	1,68	237,38	1,39	109,17	1,41	100,63	1,44	71,82
	1,36	271,52	1,60	190,83	1,27	98,11	1,30	89,78	1,37	77,00
	1,22	212,36	1,51	165,38	1,21	90,77	1,22	88,22	1,28	71,27
	1,08	155,54	1,37	119,74	1,11	84,02	1,10	72,11	1,19	73,06
	1,02	119,72	1,28	106,80	0,99	73,81	1,02	72,89	1,11	73,11
	0,89	106,67	1,19	99,13	0,90	69,89	0,93	73,57	1,06	72,84
	0,73	96,81	1,05	91,01	0,80	65,53	0,82	69,80	0,95	81,26
	0,61	78,67	0,97	81,68	0,73	71,80	0,71	79,85	0,85	88,82
	0,52	68,06	0,89	74,85	0,64	78,19	0,61	87,66	0,76	90,76
	0,40	74,10	0,73	65,93	0,53	87,15	0,45	91,54	0,61	91,21
	0,21	86,39	0,67	72,89	0,41	99,14	0,00	0,00	0,49	96,58
	0,00	0,00	0,55	77,66	0,00	0,00			0,00	0,00
			0,44	90,50						
			0,32	93,83						
			0,00	0,00						

Tabela B.31: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$0,9 \times 10^{-2}$	$0,9 \times 10^{-2}$	$0,9 \times 10^{-2}$	$0,9 \times 10^{-2}$	$0,9 \times 10^{-2}$					
f [Hz]	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25					
Γ [-]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00					
d_p [m]	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$					
ϕ [-]	0,0000	0,0009	0,0018	0,0036	0,0072					
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$					
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro					
	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)
	2,40	1291,71	2,43	1310,46	2,40	1293,03	2,47	1346,58	2,46	1404,18
	2,38	1293,63	2,38	1306,36	2,34	1341,95	2,42	1316,96	2,42	1375,79
	2,35	1301,62	2,35	1288,54	2,28	1333,12	2,35	1335,38	2,38	1373,47
	2,34	1281,99	2,31	1299,47	2,23	1347,59	2,30	1306,58	2,34	1401,11
	2,29	1249,13	2,26	1254,80	2,18	1328,85	2,24	1326,05	2,30	1396,83
	2,22	1329,75	2,23	1281,83	2,17	1287,38	2,21	1326,99	2,30	1367,77
	2,21	1266,71	2,18	1287,11	2,13	1302,80	2,20	1296,50	2,25	1385,09
	2,18	1264,48	2,13	1272,13	2,07	1345,73	2,18	1287,40	2,23	1384,34
	2,16	1258,49	2,07	1215,84	2,00	1327,99	2,09	1309,51	2,22	1367,43
	2,08	1305,09	1,99	1256,72	1,94	1336,24	2,05	1311,48	2,14	1387,59
	2,03	1241,32	1,94	1256,64	1,90	1297,23	2,00	1283,81	2,08	1400,99
	2,00	1214,39	1,87	1243,21	1,83	1309,38	1,96	1277,12	2,04	1383,36
	1,90	1280,85	1,81	1242,48	1,75	1242,14	1,89	1299,79	2,02	1311,35
	1,85	1255,19	1,74	1252,27	1,68	1205,18	1,81	1252,79	1,95	1376,70
	1,78	1190,76	1,72	1219,72	1,59	1283,06	1,73	1237,36	1,91	1346,27
	1,75	1193,76	1,68	1142,94	1,51	1200,18	1,66	1216,05	1,87	1345,18
	1,72	1185,41	1,62	1207,65	1,39	1148,58	1,57	1194,86	1,82	1293,67
	1,66	1188,59	1,54	1170,84	1,26	1086,88	1,47	1178,73	1,71	1293,34
	1,61	1126,33	1,49	1121,39	1,17	1061,89	1,35	1080,23	1,64	1287,03
	1,53	1151,47	1,44	1083,29	1,07	901,04	1,25	1025,84	1,52	1289,46
	1,44	1122,19	1,34	1070,98	0,97	815,08	1,08	941,18	1,42	1240,59
	1,36	1054,29	1,24	1039,02	0,88	733,35	0,97	892,47	1,29	1164,47
	1,29	1042,67	1,12	882,10	0,82	621,70	0,82	815,03	1,18	1089,87
	1,22	1009,58	1,02	766,07	0,73	519,82	0,67	728,77	1,02	1039,00
	1,10	847,68	0,89	617,00	0,53	347,81	0,57	589,58	0,93	1004,45
	1,03	753,46	0,79	527,07	0,38	194,88	0,36	342,99	0,83	941,74
	0,93	690,52	0,70	438,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,73	875,62
	0,83	543,46	0,60	351,01					0,53	655,68
	0,70	426,69	0,43	227,07					0,45	486,36
	0,42	218,58	0,00	0,00					0,22	181,07
	0,00	0,00							0,00	0,00

Tabela B.32: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,9x10 ⁻²									
f [Hz]	5,25		5,25		5,25		5,25		5,25	
Γ [-]	1,00		1,00		1,00		1,00		1,00	
d _p [m]	2,19x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,40	499,99	2,43	437,09	2,40	470,04	2,47	432,69	2,46	481,34
	2,38	400,48	2,38	460,40	2,34	446,70	2,42	475,74	2,42	413,97
	2,35	394,57	2,35	462,11	2,28	447,24	2,35	446,06	2,38	430,82
	2,34	422,21	2,31	420,12	2,23	449,70	2,30	429,18	2,34	500,15
	2,29	518,27	2,26	414,04	2,18	493,03	2,24	439,84	2,30	485,56
	2,22	504,62	2,23	377,96	2,17	498,28	2,21	464,24	2,30	512,12
	2,21	556,64	2,18	525,09	2,13	465,89	2,20	397,54	2,25	392,99
	2,18	427,99	2,13	470,03	2,07	489,42	2,18	305,77	2,23	528,78
	2,16	487,27	2,07	381,37	2,00	424,25	2,09	426,70	2,22	532,46
	2,08	479,50	1,99	372,91	1,94	458,20	2,05	381,68	2,14	445,96
	2,03	459,44	1,94	457,01	1,90	438,80	2,00	286,48	2,08	433,80
	2,00	460,22	1,87	409,63	1,83	401,47	1,96	371,25	2,04	414,70
	1,90	515,56	1,81	446,56	1,75	421,00	1,89	297,37	2,02	413,98
	1,85	445,14	1,74	423,44	1,68	415,47	1,81	314,77	1,95	214,82
	1,78	469,63	1,72	418,28	1,59	363,86	1,73	288,20	1,91	370,73
	1,75	439,72	1,68	408,22	1,51	366,37	1,66	266,91	1,87	360,98
	1,72	445,57	1,62	343,78	1,39	334,90	1,57	229,80	1,82	306,83
	1,66	382,12	1,54	296,30	1,26	268,73	1,47	201,34	1,71	278,66
	1,61	333,53	1,49	233,98	1,17	237,56	1,35	182,63	1,64	257,29
	1,53	295,13	1,44	285,68	1,07	206,94	1,25	173,76	1,52	222,59
	1,44	234,26	1,34	243,02	0,97	185,23	1,08	149,18	1,42	178,64
	1,36	238,51	1,24	219,66	0,88	159,92	0,97	134,83	1,29	154,91
	1,29	224,91	1,12	189,58	0,82	116,46	0,82	118,29	1,18	146,66
	1,22	216,04	1,02	147,67	0,73	88,96	0,67	99,81	1,02	135,83
	1,10	162,37	0,89	112,71	0,53	74,06	0,57	94,06	0,93	130,39
	1,03	147,13	0,79	90,88	0,38	90,54	0,36	103,83	0,83	122,40
	0,93	126,57	0,70	84,53	0,00	98,31	0,00	129,37	0,73	110,20
	0,83	95,43	0,60	86,95					0,53	94,28
	0,70	84,69	0,43	95,68					0,45	109,89
	0,42	100,02	0,00	99,77					0,22	131,36
	0,00	98,88							0,00	121,72

Tabela B.33: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$					
f [Hz]	4,07	4,07	4,07	4,07	4,07					
Γ [-]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00					
d_p [m]	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$					
ϕ [-]	0,0000	0,0009	0,0018	0,0036	0,0072					
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$					
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro					
	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)
	2,60	1303,52	2,60	1342,26	2,59	1255,02	2,48	1346,06	2,48	1336,82
	2,49	1321,86	2,57	1285,10	2,49	1265,80	2,44	1308,60	2,42	1300,75
	2,45	1333,85	2,54	1283,01	2,45	1247,39	2,40	1336,74	2,38	1283,70
	2,41	1296,34	2,51	1237,49	2,40	1235,31	2,37	1303,38	2,33	1360,78
	2,37	1267,92	2,48	1242,78	2,33	1246,46	2,36	1264,04	2,30	1314,95
	2,29	1305,48	2,46	1234,80	2,30	1262,40	2,34	1246,34	2,25	1359,06
	2,25	1255,80	2,44	1249,40	2,28	1197,36	2,26	1332,20	2,21	1370,34
	2,21	1276,54	2,40	1287,84	2,23	1226,78	2,21	1282,01	2,16	1388,20
	2,15	1314,51	2,36	1267,51	2,19	1329,48	2,16	1288,19	2,15	1363,69
	2,11	1278,93	2,32	1271,67	2,16	1294,69	2,10	1388,65	2,14	1346,73
	2,05	1214,61	2,28	1256,31	2,13	1215,06	2,09	1252,43	2,08	1409,19
	2,02	1244,53	2,21	1256,87	2,09	1221,54	2,06	1237,54	2,04	1362,22
	1,97	1198,90	2,13	1243,44	2,03	1259,15	1,97	1358,69	1,99	1358,74
	1,91	1167,99	2,07	1253,30	2,02	1245,83	1,94	1251,31	1,95	1387,31
	1,84	1234,03	2,03	1212,09	1,94	1238,59	1,87	1281,41	1,87	1404,80
	1,82	1219,69	1,96	1244,31	1,89	1214,98	1,81	1282,61	1,81	1374,03
	1,76	1218,03	1,90	1222,78	1,85	1213,47	1,73	1325,71	1,75	1395,79
	1,68	1266,70	1,85	1177,87	1,78	1287,19	1,68	1266,39	1,64	1383,77
	1,64	1230,65	1,80	1246,20	1,70	1241,48	1,60	1257,43	1,51	1270,92
	1,57	1242,83	1,76	1207,81	1,64	1229,19	1,53	1223,38	1,43	1235,00
	1,52	1185,54	1,69	1245,96	1,55	1195,04	1,41	1211,52	1,29	1164,49
	1,48	1168,74	1,63	1235,59	1,43	1191,86	1,29	1103,25	1,11	1023,51
	1,39	1099,26	1,56	1262,66	1,29	1109,10	1,21	1074,36	0,97	947,59
	1,30	1011,46	1,53	1218,61	1,14	997,73	1,06	977,47	0,81	868,32
	1,07	859,25	1,47	1215,08	0,99	911,73	0,94	900,92	0,68	749,09
	0,95	719,12	1,39	1138,91	0,82	756,26	0,81	814,79	0,56	631,50
	0,79	588,97	1,26	1064,52	0,67	612,16	0,70	695,91	0,44	522,07
	0,64	432,88	1,17	968,23	0,53	471,33	0,56	577,93	0,29	363,73
	0,37	227,85	1,00	862,01	0,37	284,90	0,41	452,75	0,11	203,13
	0,00	0,00	0,85	732,17	0,00	0,00	0,37	370,94	0,00	0,00
			0,66	561,18			0,25	246,41		
			0,53	379,48			0,00	0,00		
			0,31	206,58						
			0,00	0,00						

Tabela B.34: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	1,5x10 ⁻²									
f [Hz]	4,07		4,07		4,07		4,07		4,07	
Γ [-]	1,00		1,00		1,00		1,00		1,00	
d _p [m]	2,19x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,60	574,35	2,60	640,25	2,59	617,76	2,48	701,80	2,48	718,93
	2,49	576,06	2,57	574,71	2,49	535,35	2,44	506,35	2,42	655,68
	2,45	557,21	2,54	596,37	2,45	554,66	2,40	568,79	2,38	668,90
	2,41	529,24	2,51	496,21	2,40	590,67	2,37	567,21	2,33	610,90
	2,37	551,44	2,48	522,46	2,33	444,51	2,36	658,03	2,30	616,88
	2,29	537,86	2,46	513,91	2,30	503,89	2,34	634,88	2,25	428,21
	2,25	516,60	2,44	496,40	2,28	533,39	2,26	575,41	2,21	455,56
	2,21	481,07	2,40	595,26	2,23	522,16	2,21	556,24	2,16	453,12
	2,15	588,18	2,36	529,50	2,19	423,85	2,16	519,42	2,15	459,15
	2,11	525,89	2,32	501,18	2,16	524,69	2,10	380,34	2,14	548,74
	2,05	459,81	2,28	444,04	2,13	557,40	2,09	488,37	2,08	409,78
	2,02	444,42	2,21	499,53	2,09	476,45	2,06	496,98	2,04	501,51
	1,97	411,25	2,13	497,90	2,03	466,32	1,97	318,86	1,99	388,79
	1,91	407,94	2,07	538,96	2,02	493,69	1,94	473,71	1,95	327,55
	1,84	389,72	2,03	489,31	1,94	441,01	1,87	398,16	1,87	279,57
	1,82	395,21	1,96	444,36	1,89	360,78	1,81	492,41	1,81	266,36
	1,76	342,00	1,90	457,69	1,85	422,92	1,73	419,17	1,75	145,47
	1,68	375,49	1,85	375,75	1,78	390,84	1,68	448,84	1,64	146,77
	1,64	372,45	1,80	374,49	1,70	433,24	1,60	429,54	1,51	294,28
	1,57	362,89	1,76	375,59	1,64	371,24	1,53	387,17	1,43	291,10
	1,52	318,21	1,69	345,61	1,55	344,90	1,41	331,92	1,29	258,95
	1,48	213,25	1,63	364,67	1,43	295,43	1,29	293,29	1,11	268,76
	1,39	209,75	1,56	334,16	1,29	281,52	1,21	308,78	0,97	237,61
	1,30	243,99	1,53	315,04	1,14	311,08	1,06	298,27	0,81	197,60
	1,07	237,57	1,47	268,01	0,99	283,42	0,94	263,47	0,68	145,09
	0,95	214,30	1,39	233,19	0,82	231,75	0,81	219,76	0,56	115,65
	0,79	172,38	1,26	264,06	0,67	159,59	0,70	158,92	0,44	85,18
	0,64	128,10	1,17	272,51	0,53	111,20	0,56	116,90	0,29	80,83
	0,37	77,69	1,00	263,09	0,37	72,47	0,41	78,66	0,11	94,03
	0,00	85,80	0,85	222,98	0,00	94,04	0,37	74,44	0,00	97,38
			0,66	150,23			0,25	74,55		
			0,53	99,90			0,00	96,58		
			0,31	77,49						
			0,00	88,07						

Tabela B.35: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	2,1x10 ⁻²									
f [Hz]	3,44		3,44		3,44		3,44		3,44	
Γ [-]	1,00		1,00		1,00		1,00		1,00	
d _p [m]	2,19x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)								
	2,52	1369,01	2,49	1352,58	2,57	1180,53	2,54	1280,79	2,53	1432,50
	2,46	1323,53	2,47	1261,14	2,51	1306,43	2,49	1336,32	2,47	1416,32
	2,44	1274,16	2,43	1310,40	2,48	1285,88	2,44	1362,51	2,42	1484,04
	2,39	1214,63	2,40	1286,75	2,43	1299,46	2,41	1325,62	2,41	1425,13
	2,34	1282,57	2,35	1235,98	2,41	1303,39	2,35	1358,80	2,39	1454,33
	2,29	1271,67	2,29	1290,45	2,39	1275,96	2,34	1336,70	2,37	1418,27
	2,26	1252,37	2,26	1253,36	2,35	1328,96	2,27	1373,24	2,33	1420,85
	2,18	1273,01	2,17	1232,58	2,32	1324,96	2,21	1393,99	2,28	1407,83
	2,15	1270,18	2,07	1267,63	2,30	1266,70	2,12	1384,60	2,20	1429,77
	2,12	1290,16	2,01	1292,93	2,26	1333,15	2,02	1436,16	2,15	1460,71
	2,02	1287,15	1,93	1361,35	2,20	1378,14	1,91	1464,10	2,10	1470,37
	1,95	1349,18	1,91	1296,36	2,16	1405,64	1,79	1454,69	2,05	1449,25
	1,90	1372,68	1,79	1361,02	2,15	1317,67	1,71	1436,53	2,02	1453,65
	1,80	1375,40	1,70	1353,88	2,06	1356,23	1,65	1428,72	1,97	1442,32
	1,74	1331,40	1,61	1368,02	1,98	1361,06	1,59	1393,43	1,89	1440,60
	1,65	1333,59	1,50	1347,27	1,89	1371,71	1,48	1334,73	1,81	1439,95
	1,51	1403,55	1,37	1331,62	1,77	1390,08	1,37	1278,11	1,71	1416,49
	1,43	1322,22	1,26	1257,08	1,69	1419,30	1,27	1250,22	1,62	1387,54
	1,29	1237,57	1,13	1212,43	1,63	1414,72	1,16	1187,18	1,52	1371,43
	1,18	1176,96	1,01	1121,86	1,53	1390,41	1,07	1147,80	1,42	1342,46
	1,01	1092,19	0,87	1057,77	1,42	1317,65	0,86	1061,76	1,27	1263,50
	0,85	979,51	0,73	907,13	1,33	1276,17	0,75	918,21	1,13	1210,01
	0,75	909,17	0,61	785,29	1,22	1236,09	0,60	783,89	0,97	1147,10
	0,64	785,63	0,44	555,16	1,08	1166,62	0,46	615,55	0,76	954,83
	0,39	493,64	0,37	452,43	0,93	1099,21	0,31	431,88	0,61	816,21
	0,19	279,64	0,27	317,41	0,80	976,05	0,19	283,46	0,48	657,75
	0,00	0,00	0,07	144,94	0,70	849,72	0,12	106,01	0,32	409,01
			0,00	0,00	0,56	675,28	0,00	0,00	0,18	216,16
					0,49	568,61			0,00	0,00
					0,35	378,88				
					0,20	180,52				
					0,00	0,00				

Tabela B.36: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	2,1x10 ⁻²									
f [Hz]	3,44		3,44		3,44		3,44		3,44	
Γ [-]	1,00		1,00		1,00		1,00		1,00	
d _p [m]	2,19x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,52	752,92	2,49	769,05	2,57	733,31	2,54	781,29	2,53	626,82
	2,46	773,35	2,47	633,42	2,51	787,57	2,49	640,18	2,47	577,13
	2,44	633,03	2,43	648,32	2,48	753,03	2,44	587,59	2,42	631,00
	2,39	683,97	2,40	682,96	2,43	688,59	2,41	587,62	2,41	622,19
	2,34	668,67	2,35	721,11	2,41	706,16	2,35	622,30	2,39	502,05
	2,29	689,57	2,29	688,01	2,39	650,34	2,34	536,42	2,37	558,05
	2,26	626,29	2,26	640,11	2,35	645,29	2,27	497,51	2,33	496,77
	2,18	572,65	2,17	563,54	2,32	603,62	2,21	472,83	2,28	521,53
	2,15	535,66	2,07	494,19	2,30	596,70	2,12	446,53	2,20	410,93
	2,12	545,56	2,01	485,12	2,26	537,34	2,02	274,78	2,15	385,09
	2,02	455,75	1,93	420,98	2,20	464,95	1,91	241,31	2,10	333,54
	1,95	410,34	1,91	417,99	2,16	491,67	1,79	238,49	2,05	350,93
	1,90	328,25	1,79	268,10	2,15	540,65	1,71	255,01	2,02	307,25
	1,80	332,31	1,70	227,16	2,06	478,17	1,65	237,31	1,97	314,23
	1,74	305,48	1,61	217,06	1,98	331,34	1,59	277,15	1,89	296,81
	1,65	279,13	1,50	227,32	1,89	245,60	1,48	303,65	1,81	276,12
	1,51	178,75	1,37	230,85	1,77	228,80	1,37	336,32	1,71	263,22
	1,43	213,07	1,26	264,47	1,69	219,17	1,27	308,60	1,62	266,45
	1,29	246,78	1,13	291,54	1,63	200,96	1,16	334,70	1,52	257,31
	1,18	276,20	1,01	300,43	1,53	223,03	1,07	321,55	1,42	272,29
	1,01	297,30	0,87	281,50	1,42	257,99	0,86	270,13	1,27	299,98
	0,85	271,53	0,73	249,84	1,33	268,47	0,75	238,79	1,13	294,60
	0,75	244,50	0,61	196,98	1,22	281,97	0,60	174,24	0,97	270,41
	0,64	213,45	0,44	132,57	1,08	301,24	0,46	118,27	0,76	203,97
	0,39	125,39	0,37	99,68	0,93	288,68	0,31	86,44	0,61	163,50
	0,19	84,86	0,27	81,74	0,80	249,04	0,19	80,56	0,48	123,47
	0,00	88,09	0,07	79,76	0,70	213,85	0,12	85,00	0,32	87,95
			0,00	88,40	0,56	156,77	0,00	93,26	0,18	68,76
					0,49	118,49			0,00	92,13
					0,35	79,85				
					0,20	76,03				
					0,00	89,10				

Tabela B.37: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,3x10 ⁻²									
f [Hz]	12,87		12,87		12,87		12,87		12,87	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00		2,00		2,00	
d _p [m]	2,19x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)								
	2,48	405,11	2,53	510,47	2,49	483,47	2,50	491,29	2,49	425,92
	2,43	365,71	2,48	492,60	2,45	430,26	2,47	338,78	2,46	451,96
	2,42	373,74	2,46	414,42	2,40	338,53	2,43	480,53	2,44	455,96
	2,40	528,27	2,43	397,71	2,35	320,61	2,39	441,89	2,39	360,56
	2,37	396,09	2,42	473,69	2,28	285,55	2,33	377,94	2,36	420,54
	2,34	433,84	2,40	409,92	2,24	364,74	2,33	359,21	2,32	414,40
	2,33	471,56	2,38	366,79	2,18	331,00	2,29	402,18	2,30	475,63
	2,27	392,31	2,34	337,80	2,13	250,63	2,24	411,14	2,28	481,84
	2,25	354,81	2,28	461,53	2,07	282,49	2,21	360,19	2,25	419,94
	2,22	428,11	2,24	351,87	2,03	249,47	2,15	411,01	2,24	409,22
	2,18	339,26	2,15	391,69	1,98	288,66	2,10	346,08	2,18	346,42
	2,13	412,02	2,09	390,90	1,96	244,04	2,07	456,68	2,19	412,74
	2,11	359,25	2,04	305,02	1,92	291,91	2,01	293,15	2,13	345,92
	2,08	457,15	1,99	388,11	1,85	252,94	1,98	312,82	2,07	317,94
	2,05	439,98	1,96	292,19	1,79	193,87	1,93	303,60	2,05	324,39
	2,02	437,91	1,90	326,94	1,75	141,24	1,86	233,89	1,98	364,20
	2,00	445,90	1,83	227,51	1,74	147,85	1,79	270,94	1,93	305,65
	1,96	430,50	1,78	184,58	1,69	106,82	1,71	271,96	1,86	259,57
	1,93	393,06	1,70	212,49	1,61	93,18	1,67	243,70	1,82	233,65
	1,83	362,54	1,64	163,26	1,53	103,38	1,58	222,68	1,77	181,92
	1,74	358,87	1,58	132,44	1,43	99,81	1,49	136,26	1,73	223,18
	1,72	338,06	1,55	107,59	1,35	123,21	1,42	136,53	1,68	147,99
	1,62	331,20	1,50	102,00	1,27	106,21	1,36	127,12	1,63	134,89
	1,56	266,48	1,47	98,25	1,18	114,90	1,33	126,13	1,59	136,50
	1,48	238,85	1,40	104,51	1,05	129,62	1,24	129,06	1,54	119,30
	1,38	166,29	1,34	115,99	0,92	137,93	1,19	132,62	1,49	127,89
	1,32	137,99	1,27	119,96	0,82	147,29	1,14	134,56	1,44	120,02
	1,27	134,82	1,19	130,24	0,65	161,27	1,06	136,11	1,41	120,80
	1,21	134,21	1,04	122,93	0,42	144,31	0,99	123,74	1,39	118,83
	1,15	121,91	0,95	125,16	0,00	115,07	0,92	100,79	1,35	112,03
	1,08	114,06	0,79	129,50			0,82	90,71	1,28	111,21
	1,01	113,65	0,00	128,21			0,72	98,27	1,25	116,85
	0,94	125,67					0,00	135,29	1,21	121,67
	0,86	110,52							1,10	115,53
	0,79	104,37							1,04	106,22
	0,69	108,26							0,96	99,04
	0,00	141,22							0,87	97,17
									0,77	101,79
									0,56	125,90
									0,00	132,54

Tabela B.38: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,3x10 ⁻²									
f [Hz]	12,87		12,87		12,87		12,87		12,87	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00		2,00		2,00	
d _p [m]	2,19x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,48	405,11	2,53	510,47	2,49	483,47	2,50	491,29	2,49	425,92
	2,43	365,71	2,48	492,60	2,45	430,26	2,47	338,78	2,46	451,96
	2,42	373,74	2,46	414,42	2,40	338,53	2,43	480,53	2,44	455,96
	2,40	528,27	2,43	397,71	2,35	320,61	2,39	441,89	2,39	360,56
	2,37	396,09	2,42	473,69	2,28	285,55	2,33	377,94	2,36	420,54
	2,34	433,84	2,40	409,92	2,24	364,74	2,33	359,21	2,32	414,40
	2,33	471,56	2,38	366,79	2,18	331,00	2,29	402,18	2,30	475,63
	2,27	392,31	2,34	337,80	2,13	250,63	2,24	411,14	2,28	481,84
	2,25	354,81	2,28	461,53	2,07	282,49	2,21	360,19	2,25	419,94
	2,22	428,11	2,24	351,87	2,03	249,47	2,15	411,01	2,24	409,22
	2,18	339,26	2,15	391,69	1,98	288,66	2,10	346,08	2,18	346,42
	2,13	412,02	2,09	390,90	1,96	244,04	2,07	456,68	2,19	412,74
	2,11	359,25	2,04	305,02	1,92	291,91	2,01	293,15	2,13	345,92
	2,08	457,15	1,99	388,11	1,85	252,94	1,98	312,82	2,07	317,94
	2,05	439,98	1,96	292,19	1,79	193,87	1,93	303,60	2,05	324,39
	2,02	437,91	1,90	326,94	1,75	141,24	1,86	233,89	1,98	364,20
	2,00	445,90	1,83	227,51	1,74	147,85	1,79	270,94	1,93	305,65
	1,96	430,50	1,78	184,58	1,69	106,82	1,71	271,96	1,86	259,57
	1,93	393,06	1,70	212,49	1,61	93,18	1,67	243,70	1,82	233,65
	1,83	362,54	1,64	163,26	1,53	103,38	1,58	222,68	1,77	181,92
	1,74	358,87	1,58	132,44	1,43	99,81	1,49	136,26	1,73	223,18
	1,72	338,06	1,55	107,59	1,35	123,21	1,42	136,53	1,68	147,99
	1,62	331,20	1,50	102,00	1,27	106,21	1,36	127,12	1,63	134,89
	1,56	266,48	1,47	98,25	1,18	114,90	1,33	126,13	1,59	136,50
	1,48	238,85	1,40	104,51	1,05	129,62	1,24	129,06	1,54	119,30
	1,38	166,29	1,34	115,99	0,92	137,93	1,19	132,62	1,49	127,89
	1,32	137,99	1,27	119,96	0,82	147,29	1,14	134,56	1,44	120,02
	1,27	134,82	1,19	130,24	0,65	161,27	1,06	136,11	1,41	120,80
	1,21	134,21	1,04	122,93	0,42	144,31	0,99	123,74	1,39	118,83
	1,15	121,91	0,95	125,16	0,00	115,07	0,92	100,79	1,35	112,03
	1,08	114,06	0,79	129,50			0,82	90,71	1,28	111,21
	1,01	113,65	0,00	128,21			0,72	98,27	1,25	116,85
	0,94	125,67					0,00	135,29	1,21	121,67
	0,86	110,52							1,10	115,53
	0,79	104,37							1,04	106,22
	0,69	108,26							0,96	99,04
	0,00	141,22							0,87	97,17
									0,77	101,79
									0,56	125,90
									0,00	132,54

Tabela B.41: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$1,5 \times 10^{-2}$									
f [Hz]	5,76		5,76		5,76		5,76		5,76	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00		2,00		2,00	
d_p [m]	$2,19 \times 10^{-3}$									
ϕ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$									
partícula	vidro									
	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)								
	2,49	1265,15	2,51	1265,50	2,52	1314,81	2,54	1383,93	2,46	1401,85
	2,45	1294,04	2,46	1220,58	2,49	1338,62	2,50	1348,86	2,43	1364,08
	2,38	1319,29	2,40	1244,65	2,44	1363,78	2,45	1381,45	2,39	1363,30
	2,36	1233,85	2,37	1270,59	2,40	1363,68	2,42	1420,68	2,36	1369,86
	2,32	1274,76	2,35	1222,26	2,34	1357,94	2,39	1402,74	2,32	1334,83
	2,28	1277,09	2,33	1223,10	2,31	1332,88	2,35	1412,85	2,28	1345,54
	2,25	1277,54	2,28	1255,63	2,26	1341,20	2,32	1370,45	2,26	1331,97
	2,22	1263,13	2,25	1243,04	2,22	1341,12	2,26	1385,53	2,18	1360,62
	2,19	1306,49	2,21	1209,62	2,14	1373,15	2,20	1398,09	2,15	1386,45
	2,16	1270,80	2,15	1231,22	2,11	1352,44	2,16	1446,89	2,11	1372,87
	2,07	1270,37	2,10	1230,97	2,04	1344,63	2,14	1417,58	2,05	1378,58
	1,99	1252,57	2,06	1176,86	1,97	1340,97	2,09	1404,18	2,03	1293,25
	1,88	1208,82	1,96	1239,57	1,87	1378,91	2,07	1397,06	1,98	1339,60
	1,78	1193,66	1,91	1197,92	1,76	1365,25	2,02	1389,56	1,93	1360,61
	1,64	1242,23	1,80	1217,49	1,68	1243,96	1,95	1390,35	1,84	1263,88
	1,57	1096,72	1,69	1161,30	1,55	1210,90	1,91	1400,56	1,77	1180,04
	1,38	1065,80	1,63	1191,69	1,44	1189,22	1,87	1371,83	1,66	1235,57
	1,28	1006,17	1,49	1149,88	1,35	1125,81	1,86	1293,91	1,58	1183,89
	1,14	905,97	1,40	1088,59	1,26	1074,40	1,79	1276,50	1,52	1130,58
	0,96	841,84	1,33	1002,08	1,14	1064,40	1,68	1266,04	1,44	1092,59
	0,86	731,38	1,25	976,19	1,00	931,59	1,62	1231,99	1,37	1078,07
	0,82	630,66	1,18	946,62	0,88	795,92	1,52	1192,94	1,26	1029,48
	0,72	517,28	1,09	942,89	0,79	681,04	1,41	1180,69	1,14	946,07
	0,57	410,04	0,97	848,33	0,64	554,43	1,30	1117,15	1,07	897,80
	0,42	301,83	0,88	750,61	0,54	374,94	1,13	1044,00	0,97	781,16
	0,31	175,51	0,83	659,35	0,36	230,68	1,03	894,16	0,85	647,53
	0,00	0,00	0,67	506,18	0,14	51,59	0,88	789,79	0,76	584,54
			0,54	396,47	0,00	0,00	0,68	590,80	0,66	484,70
			0,38	242,94			0,54	464,63	0,53	376,56
			0,29	141,15			0,38	323,16	0,36	225,14
			0,00	0,00			0,28	187,95	0,00	0,00
							0,00	0,00		

Tabela B.42: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	1,5x10 ⁻²									
f [Hz]	5,76		5,76		5,76		5,76		5,76	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00		2,00		2,00	
d _p [m]	2,19x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,49	555,11	2,51	421,24	2,52	463,28	2,54	511,51	2,46	415,06
	2,45	626,01	2,46	546,81	2,49	461,33	2,50	510,69	2,43	544,78
	2,38	471,61	2,40	594,11	2,44	489,97	2,45	518,81	2,39	535,77
	2,36	617,50	2,37	372,07	2,40	616,10	2,42	439,52	2,36	446,77
	2,32	525,91	2,35	558,70	2,34	463,24	2,39	489,25	2,32	592,12
	2,28	535,58	2,33	594,07	2,31	390,20	2,35	540,09	2,28	534,17
	2,25	518,11	2,28	529,95	2,26	462,33	2,32	455,09	2,26	419,60
	2,22	541,40	2,25	518,45	2,22	489,31	2,26	452,25	2,18	510,20
	2,19	469,12	2,21	394,46	2,14	376,91	2,20	412,81	2,15	472,47
	2,16	472,73	2,15	498,51	2,11	372,05	2,16	393,18	2,11	448,82
	2,07	467,39	2,10	474,39	2,04	403,65	2,14	330,21	2,05	428,35
	1,99	535,53	2,06	396,85	1,97	435,74	2,09	433,71	2,03	506,98
	1,88	500,96	1,96	473,05	1,87	325,40	2,07	410,37	1,98	478,86
	1,78	463,23	1,91	498,11	1,76	353,27	2,02	403,06	1,93	448,67
	1,64	417,98	1,80	514,37	1,68	400,97	1,95	368,79	1,84	494,50
	1,57	353,29	1,69	465,49	1,55	387,73	1,91	361,44	1,77	489,42
	1,38	366,30	1,63	446,72	1,44	344,40	1,87	357,10	1,66	454,24
	1,28	354,64	1,49	414,77	1,35	331,68	1,86	355,09	1,58	455,64
	1,14	318,08	1,40	373,39	1,26	344,04	1,79	363,52	1,52	419,64
	0,96	284,26	1,33	363,09	1,14	372,65	1,68	360,00	1,44	396,55
	0,86	230,60	1,25	317,56	1,00	352,77	1,62	332,25	1,37	413,61
	0,82	218,60	1,18	310,80	0,88	342,35	1,52	332,70	1,26	367,72
	0,72	200,74	1,09	325,98	0,79	306,26	1,41	329,45	1,14	298,27
	0,57	178,02	0,97	272,02	0,64	267,45	1,30	306,92	1,07	257,28
	0,42	156,99	0,88	247,82	0,54	205,23	1,13	330,56	0,97	221,94
	0,31	140,34	0,83	231,56	0,36	143,22	1,03	336,00	0,85	212,89
	0,00	132,23	0,67	215,73	0,14	107,88	0,88	316,33	0,76	187,04
			0,54	187,89	0,00	104,32	0,68	263,00	0,66	178,44
			0,38	152,93			0,54	222,20	0,53	154,90
			0,29	148,30			0,38	175,98	0,36	155,39
			0,00	128,75			0,28	139,87	0,00	141,00
							0,00	100,02		

Tabela B.43: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$2,1 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-2}$					
f [Hz]	4,86	4,86	4,86	4,86	4,86					
Γ [-]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00					
d_p [m]	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$					
ϕ [-]	0,0000	0,0009	0,0018	0,0036	0,0072					
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$					
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro					
	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)
	2,45	1266,16	2,45	1207,09	2,41	1270,95	2,43	1322,24	2,45	1298,14
	2,40	1320,04	2,41	1256,88	2,37	1236,33	2,42	1276,82	2,42	1320,56
	2,35	1339,30	2,36	1204,85	2,32	1248,36	2,37	1274,68	2,36	1295,54
	2,30	1315,44	2,32	1208,39	2,28	1263,22	2,34	1293,62	2,32	1270,77
	2,26	1287,72	2,27	1255,42	2,26	1268,70	2,31	1311,65	2,28	1334,86
	2,22	1252,95	2,24	1265,62	2,22	1257,20	2,27	1321,61	2,23	1341,91
	2,18	1245,58	2,17	1231,52	2,19	1234,92	2,23	1282,94	2,17	1355,93
	2,13	1181,74	2,14	1226,99	2,17	1200,35	2,19	1243,33	2,13	1232,27
	2,06	1201,15	2,08	1206,62	2,14	1218,22	2,12	1280,68	2,06	1186,09
	1,98	1164,13	2,06	1197,09	2,06	1247,14	2,02	1198,46	2,04	1165,88
	1,94	1135,64	2,03	1216,26	2,03	1222,11	1,96	1250,07	2,01	1201,67
	1,92	1160,83	1,99	1193,08	1,94	1186,87	1,84	1200,07	1,93	1194,08
	1,86	1174,22	1,94	1187,21	1,87	1155,28	1,74	1124,13	1,88	1195,18
	1,78	1139,66	1,86	1161,92	1,76	1183,02	1,68	1108,93	1,80	1137,37
	1,70	1145,60	1,82	1139,06	1,72	1134,01	1,60	1100,85	1,72	1124,93
	1,64	1084,99	1,70	1124,48	1,60	1075,22	1,50	1061,44	1,62	1110,81
	1,52	1069,50	1,63	1098,64	1,49	1044,31	1,41	1047,03	1,53	1090,91
	1,43	997,68	1,48	1076,31	1,41	1022,64	1,33	1007,96	1,45	1084,79
	1,28	982,54	1,38	998,88	1,29	977,05	1,22	960,90	1,37	1065,15
	1,18	900,23	1,29	945,63	1,17	938,27	1,04	792,94	1,26	1003,57
	1,03	768,88	1,14	937,11	1,06	880,78	0,91	683,24	1,16	852,93
	0,91	702,34	0,94	765,01	0,96	769,41	0,77	599,14	0,98	738,83
	0,83	616,23	0,86	702,18	0,87	644,56	0,66	470,30	0,89	671,19
	0,70	519,89	0,76	581,68	0,75	569,63	0,57	382,19	0,71	531,95
	0,59	440,79	0,57	450,14	0,62	424,79	0,41	253,40	0,63	450,59
	0,48	343,98	0,34	250,52	0,46	330,42	0,00	0,00	0,50	364,04
	0,26	163,64	0,00	0,00	0,29	190,58			0,36	211,49
	0,00	0,00			0,00	0,00			0,00	0,00

Tabela B.44: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	2,1x10 ⁻²									
f [Hz]	4,86		4,86		4,86		4,86		4,86	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00		2,00		2,00	
d _p [m]	2,19x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,45	480,57	2,45	479,16	2,41	503,74	2,43	437,78	2,45	614,04
	2,40	464,22	2,41	499,35	2,37	416,09	2,42	530,16	2,42	555,79
	2,35	492,74	2,36	558,31	2,32	440,60	2,37	535,01	2,36	474,41
	2,30	471,05	2,32	541,55	2,28	504,24	2,34	534,58	2,32	550,67
	2,26	545,22	2,27	438,44	2,26	434,99	2,31	453,13	2,28	506,47
	2,22	494,33	2,24	389,45	2,22	501,26	2,27	437,96	2,23	462,49
	2,18	486,03	2,17	475,55	2,19	489,07	2,23	478,88	2,17	333,73
	2,13	491,44	2,14	423,37	2,17	467,27	2,19	503,11	2,13	583,47
	2,06	446,51	2,08	454,09	2,14	468,53	2,12	383,91	2,06	577,82
	1,98	465,06	2,06	489,44	2,06	504,49	2,02	553,22	2,04	600,38
	1,94	445,67	2,03	437,87	2,03	448,15	1,96	530,91	2,01	588,48
	1,92	416,49	1,99	428,96	1,94	436,63	1,84	532,76	1,93	579,56
	1,86	476,70	1,94	464,27	1,87	497,24	1,74	475,42	1,88	557,15
	1,78	467,99	1,86	463,89	1,76	501,31	1,68	497,15	1,80	563,15
	1,70	499,51	1,82	452,18	1,72	499,50	1,60	482,82	1,72	551,99
	1,64	483,01	1,70	487,57	1,60	467,50	1,50	465,95	1,62	514,41
	1,52	495,87	1,63	462,54	1,49	443,66	1,41	490,80	1,53	497,72
	1,43	482,42	1,48	457,91	1,41	455,00	1,33	459,35	1,45	494,58
	1,28	463,30	1,38	441,08	1,29	452,79	1,22	421,38	1,37	459,46
	1,18	384,71	1,29	458,26	1,17	396,09	1,04	317,40	1,26	391,06
	1,03	308,06	1,14	416,39	1,06	365,07	0,91	287,50	1,16	331,18
	0,91	267,79	0,94	326,65	0,96	315,29	0,77	247,73	0,98	308,71
	0,83	255,37	0,86	318,21	0,87	300,97	0,66	202,87	0,89	286,83
	0,70	221,65	0,76	285,08	0,75	274,55	0,57	177,01	0,71	221,22
	0,59	213,70	0,57	242,85	0,62	219,70	0,41	164,15	0,63	197,81
	0,48	188,60	0,34	166,19	0,46	187,53	0,00	136,24	0,50	170,26
	0,26	144,63	0,00	154,66	0,29	155,25			0,36	134,44
	0,00	141,50			0,00	143,25			0,00	0,00

Tabela B.45: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$0,3 \times 10^{-2}$	$0,3 \times 10^{-2}$	$0,3 \times 10^{-2}$	$0,3 \times 10^{-2}$	$0,3 \times 10^{-2}$					
f [Hz]	18,20	18,20	18,20	18,20	18,20					
Γ [-]	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00					
d_p [m]	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$					
ϕ [-]	0,0000	0,0009	0,0018	0,0036	0,0072					
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$					
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro					
	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)
	2,44	1380,03	2,44	1377,66	2,44	1398,98	2,44	1455,85	2,39	1480,75
	2,40	1392,21	2,40	1412,23	2,41	1421,75	2,39	1407,67	2,32	1432,87
	2,38	1394,01	2,36	1400,25	2,40	1415,21	2,36	1476,00	2,30	1422,98
	2,33	1387,49	2,34	1392,40	2,37	1404,14	2,33	1447,96	2,27	1452,56
	2,29	1407,89	2,32	1394,92	2,35	1399,04	2,29	1460,09	2,26	1431,28
	2,29	1395,64	2,30	1390,26	2,33	1414,07	2,28	1446,10	2,24	1420,21
	2,27	1396,93	2,26	1399,07	2,31	1404,23	2,26	1456,13	2,24	1424,62
	2,23	1412,57	2,21	1395,96	2,29	1400,32	2,24	1447,34	2,20	1458,18
	2,17	1407,48	2,16	1406,98	2,28	1380,05	2,18	1494,83	2,12	1407,72
	2,13	1364,57	2,11	1417,80	2,25	1434,10	2,12	1471,06	2,11	1429,70
	2,07	1416,51	2,07	1418,17	2,19	1414,28	2,12	1464,33	2,04	1420,79
	2,01	1407,28	2,04	1376,04	2,16	1429,60	2,07	1475,15	2,00	1400,99
	1,95	1371,18	2,00	1415,14	2,14	1413,84	2,02	1459,87	1,92	1439,49
	1,89	1425,81	1,96	1386,67	2,09	1436,75	2,00	1484,13	1,87	1403,50
	1,79	1388,95	1,93	1380,51	2,07	1422,15	1,90	1490,16	1,81	1390,41
	1,70	1398,66	1,89	1386,03	2,06	1408,02	1,83	1481,29	1,72	1417,67
	1,62	1395,48	1,84	1437,77	2,00	1444,95	1,78	1480,88	1,67	1397,61
	1,54	1392,45	1,80	1387,51	1,98	1415,15	1,71	1462,63	1,64	1373,64
	1,42	1399,26	1,74	1363,65	1,91	1432,35	1,67	1463,18	1,56	1383,13
	1,31	1364,71	1,66	1414,13	1,87	1402,43	1,52	1433,00	1,51	1362,20
	1,22	1400,18	1,58	1393,05	1,80	1417,54	1,43	1439,65	1,43	1382,49
	1,07	1343,53	1,51	1408,69	1,75	1433,18	1,32	1456,10	1,36	1399,77
	0,95	1235,97	1,39	1437,55	1,67	1434,80	1,19	1445,88	1,28	1378,90
	0,82	1004,67	1,30	1427,91	1,52	1433,12	1,08	1442,14	1,16	1375,34
	0,73	771,44	1,19	1356,18	1,38	1438,90	0,99	1380,36	1,06	1252,93
	0,58	604,68	1,09	1300,80	1,25	1422,70	0,92	1271,17	0,94	925,33
	0,44	433,24	0,91	898,73	1,13	1318,15	0,82	1056,57	0,88	735,01
	0,27	245,87	0,76	721,24	0,99	1157,41	0,74	954,01	0,80	603,54
	0,04	74,37	0,57	592,01	0,86	1055,80	0,62	597,78	0,72	554,02
	0,00	0,00	0,45	368,92	0,67	658,57	0,50	514,28	0,59	347,84
			0,33	207,90	0,53	525,85	0,32	368,57	0,46	221,93
			0,00	0,00	0,31	217,62	0,18	194,36	0,00	0,00
					0,00	0,00	0,00	0,00		

Tabela B.46: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,3x10 ⁻²									
f [Hz]	18,20		18,20		18,20		18,20		18,20	
Γ [-]	4,00		4,00		4,00		4,00		4,00	
d _p [m]	2,19x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,44	403,21	2,44	429,82	2,44	289,87	2,44	413,97	2,39	589,37
	2,40	399,76	2,40	442,40	2,41	354,80	2,39	442,81	2,32	493,93
	2,38	391,84	2,36	381,47	2,40	331,72	2,36	415,41	2,30	428,54
	2,33	444,37	2,34	331,36	2,37	358,41	2,33	384,74	2,27	425,78
	2,29	435,47	2,32	300,36	2,35	348,95	2,29	375,58	2,26	460,68
	2,29	389,15	2,30	460,25	2,33	444,22	2,28	317,84	2,24	423,54
	2,27	410,14	2,26	334,47	2,31	372,38	2,26	409,76	2,24	386,96
	2,23	355,32	2,21	352,42	2,29	382,60	2,24	403,67	2,20	405,78
	2,17	363,28	2,16	344,42	2,28	291,61	2,18	419,21	2,12	386,94
	2,13	422,75	2,11	325,59	2,25	299,85	2,12	353,90	2,11	440,99
	2,07	283,18	2,07	307,65	2,19	326,24	2,12	358,87	2,04	392,82
	2,01	372,35	2,04	347,00	2,16	345,35	2,07	373,06	2,00	393,15
	1,95	337,39	2,00	338,75	2,14	336,14	2,02	343,69	1,92	430,39
	1,89	318,95	1,96	323,36	2,09	304,68	2,00	329,81	1,87	385,80
	1,79	333,82	1,93	399,89	2,07	304,05	1,90	308,31	1,81	375,17
	1,70	358,14	1,89	346,68	2,06	362,62	1,83	311,82	1,72	354,89
	1,62	333,33	1,84	299,07	2,00	315,04	1,78	300,15	1,67	341,63
	1,54	280,39	1,80	304,18	1,98	320,70	1,71	291,62	1,64	351,80
	1,42	289,25	1,74	300,31	1,91	307,18	1,67	325,94	1,56	350,05
	1,31	298,25	1,66	293,89	1,87	325,06	1,52	325,69	1,51	337,71
	1,22	288,53	1,58	272,76	1,80	276,52	1,43	306,43	1,43	360,03
	1,07	309,34	1,51	254,90	1,75	244,02	1,32	313,30	1,36	361,82
	0,95	341,63	1,39	265,04	1,67	296,75	1,19	344,03	1,28	376,31
	0,82	360,22	1,30	280,93	1,52	281,42	1,08	361,50	1,16	378,44
	0,73	344,45	1,19	291,64	1,38	284,53	0,99	382,89	1,06	391,40
	0,58	332,05	1,09	302,48	1,25	292,10	0,92	403,17	0,94	341,72
	0,44	272,21	0,91	335,40	1,13	303,10	0,82	385,33	0,88	282,42
	0,27	200,95	0,76	321,13	0,99	330,61	0,74	366,97	0,80	275,94
	0,04	154,21	0,57	340,72	0,86	354,87	0,62	282,63	0,72	263,01
	0,00	150,39	0,45	261,37	0,67	329,86	0,50	271,36	0,59	213,71
			0,33	209,20	0,53	334,23	0,32	236,79	0,46	177,50
			0,00	154,83	0,31	218,21	0,18	174,63	0,00	164,53
					0,00	156,93	0,00	144,28		

Tabela B.49: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$				
f [Hz]	8,14	8,14	8,14	8,14	8,14				
Γ [-]	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00				
d_p [m]	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$				
ϕ [-]	0,0000	0,0009	0,0018	0,0036	0,0072				
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$				
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro				
U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)
2,54	1353,72	2,51	1282,73	2,58	1261,49	2,58	1375,64	2,52	1378,77
2,50	1343,14	2,47	1255,37	2,53	1264,37	2,49	1395,05	2,49	1430,19
2,46	1350,40	2,44	1266,41	2,50	1300,63	2,46	1377,98	2,43	1458,81
2,40	1362,67	2,39	1263,31	2,43	1318,72	2,43	1392,34	2,41	1402,82
2,39	1296,35	2,29	1234,14	2,35	1295,03	2,37	1391,33	2,38	1402,54
2,32	1287,15	2,22	1262,48	2,32	1293,02	2,34	1402,31	2,35	1400,49
2,23	1246,36	2,19	1184,77	2,27	1278,95	2,34	1329,48	2,33	1360,81
2,13	1290,66	2,14	1236,22	2,20	1249,70	2,30	1331,23	2,31	1402,99
2,04	1295,30	2,07	1221,37	2,19	1210,80	2,24	1366,15	2,27	1425,08
1,96	1270,60	2,02	1171,25	2,15	1266,88	2,17	1410,89	2,20	1410,03
1,85	1299,23	1,91	1194,03	2,12	1296,25	2,17	1371,46	2,15	1403,45
1,80	1266,26	1,86	1181,70	2,02	1300,78	2,10	1417,23	2,04	1452,57
1,73	1223,61	1,73	1175,22	1,97	1218,53	2,04	1372,06	1,96	1401,88
1,64	1202,13	1,59	1134,15	1,89	1227,59	1,99	1342,07	1,90	1411,13
1,57	1230,63	1,46	1163,30	1,81	1233,83	1,93	1386,25	1,88	1386,55
1,52	1202,34	1,35	1151,41	1,70	1214,54	1,86	1373,67	1,76	1400,64
1,47	1168,14	1,26	1113,34	1,60	1234,19	1,78	1358,11	1,65	1418,85
1,39	1031,13	1,17	1080,54	1,52	1224,64	1,70	1350,72	1,54	1381,44
1,34	941,43	1,10	871,21	1,47	1157,20	1,61	1339,10	1,50	1269,74
1,21	772,97	0,94	655,10	1,38	1179,71	1,53	1302,16	1,33	1098,76
1,12	693,38	0,86	571,90	1,31	938,63	1,41	1182,26	1,15	937,31
0,98	584,97	0,69	417,44	1,20	797,29	1,25	1005,81	1,00	797,12
0,79	460,13	0,54	284,98	1,12	685,20	1,11	847,44	0,87	660,86
0,53	293,51	0,00	0,00	1,05	618,88	0,96	705,05	0,72	575,75
0,44	193,82			0,93	540,38	0,73	561,11	0,49	394,57
0,00	0,00			0,80	437,66	0,57	455,06	0,36	212,99
				0,62	297,08	0,44	269,86	0,00	0,00
				0,00	0,00	0,27	141,15		
						0,00	0,00		

Tabela B.50: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$				
f [Hz]	8,14	8,14	8,14	8,14	8,14				
Γ [-]	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00				
d_p [m]	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$				
ϕ [-]	0,0000	0,0009	0,0018	0,0036	0,0072				
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$				
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro				
U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)	U_s (m/s)	δp (N/m ²)
2,54	541,34	2,51	527,03	2,58	553,70	2,58	471,94	2,52	569,39
2,50	610,58	2,47	524,07	2,53	507,83	2,49	498,28	2,49	635,11
2,46	564,89	2,44	480,67	2,50	472,98	2,46	523,90	2,43	594,18
2,40	513,12	2,39	514,59	2,43	551,91	2,43	600,40	2,41	501,94
2,39	479,09	2,29	484,52	2,35	532,22	2,37	554,54	2,38	597,19
2,32	526,48	2,22	577,76	2,32	525,21	2,34	419,40	2,35	534,06
2,23	498,53	2,19	516,12	2,27	599,27	2,34	521,55	2,33	509,36
2,13	450,12	2,14	539,40	2,20	550,19	2,30	493,23	2,31	462,19
2,04	427,08	2,07	553,69	2,19	510,80	2,24	458,00	2,27	421,72
1,96	494,11	2,02	486,60	2,15	568,12	2,17	500,76	2,20	414,48
1,85	453,96	1,91	537,17	2,12	539,18	2,17	419,03	2,15	436,96
1,80	415,66	1,86	543,86	2,02	461,86	2,10	402,05	2,04	395,78
1,73	431,25	1,73	501,52	1,97	502,43	2,04	384,81	1,96	371,60
1,64	404,15	1,59	475,39	1,89	491,45	1,99	376,05	1,90	379,23
1,57	407,14	1,46	430,55	1,81	463,91	1,93	337,00	1,88	397,18
1,52	339,96	1,35	413,52	1,70	440,94	1,86	343,33	1,76	353,23
1,47	349,48	1,26	377,25	1,60	445,58	1,78	348,23	1,65	350,62
1,39	305,72	1,17	354,51	1,52	391,58	1,70	334,59	1,54	345,19
1,34	307,28	1,10	354,79	1,47	380,20	1,61	329,92	1,50	351,37
1,21	285,39	0,94	268,63	1,38	328,11	1,53	337,37	1,33	387,43
1,12	239,32	0,86	267,28	1,31	326,66	1,41	355,13	1,15	367,36
0,98	290,75	0,69	259,46	1,20	296,24	1,25	356,38	1,00	374,19
0,79	268,80	0,54	246,10	1,12	251,26	1,11	334,95	0,87	329,25
0,53	241,76	0,00	232,36	1,05	265,43	0,96	352,35	0,72	326,70
0,44	228,30			0,93	283,56	0,73	312,91	0,49	260,62
0,00	205,98			0,80	271,70	0,57	309,38	0,36	188,37
				0,62	248,12	0,44	223,03	0,00	163,29
				0,00	235,69	0,27	177,18		
						0,00	168,02		

Tabela B.51: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	2,1x10 ⁻²	2,1x10 ⁻²	2,1x10 ⁻²	2,1x10 ⁻²	2,1x10 ⁻²					
f [Hz]	6,88	6,88	6,88	6,88	6,88					
Γ [-]	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00					
d _p [m]	2,19x10 ⁻³	2,19x10 ⁻³	2,19x10 ⁻³	2,19x10 ⁻³	2,19x10 ⁻³					
φ [-]	0,0000	0,0009	0,0018	0,0036	0,0072					
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²	10,0x10 ⁻²	10,0x10 ⁻²	10,0x10 ⁻²	10,0x10 ⁻²					
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro					
	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)								
	2,49	1282,97	2,49	1195,55	2,46	1313,59	2,46	1267,43	2,48	1291,22
	2,47	1236,04	2,45	1260,36	2,43	1302,81	2,41	1320,80	2,45	1281,19
	2,43	1267,42	2,40	1244,50	2,39	1275,62	2,39	1287,34	2,42	1317,09
	2,35	1248,32	2,37	1193,07	2,38	1245,87	2,34	1278,96	2,38	1365,10
	2,32	1241,42	2,34	1141,92	2,32	1319,32	2,28	1274,15	2,34	1336,03
	2,29	1222,08	2,27	1247,78	2,29	1301,85	2,24	1244,57	2,28	1349,60
	2,23	1237,13	2,23	1192,65	2,25	1277,08	2,18	1305,06	2,26	1268,43
	2,18	1223,32	2,18	1274,56	2,25	1192,14	2,15	1293,17	2,24	1310,16
	2,11	1276,26	2,16	1239,35	2,19	1262,41	2,11	1254,90	2,18	1301,65
	2,01	1248,76	2,13	1206,74	2,14	1272,64	2,05	1276,26	2,17	1299,61
	1,93	1263,06	2,05	1176,04	2,12	1234,81	1,98	1258,69	2,13	1283,32
	1,88	1220,74	2,00	1222,11	2,08	1212,02	1,95	1162,51	2,10	1298,05
	1,83	1221,63	1,94	1176,11	2,02	1206,81	1,90	1250,09	2,07	1295,99
	1,73	1176,45	1,86	1164,41	1,95	1238,00	1,88	1185,48	2,01	1314,13
	1,63	1114,52	1,80	1154,13	1,91	1217,38	1,81	1190,01	1,94	1292,05
	1,54	1028,88	1,66	1146,34	1,76	1222,79	1,72	1219,34	1,85	1306,63
	1,46	923,44	1,62	1080,35	1,67	1165,41	1,66	1162,55	1,78	1216,69
	1,38	849,55	1,49	1087,47	1,62	1263,64	1,59	1098,18	1,70	1156,65
	1,28	795,22	1,39	1053,51	1,55	1079,95	1,47	1082,76	1,63	1103,73
	1,20	739,86	1,29	916,21	1,44	1020,91	1,43	1021,82	1,53	959,53
	1,13	633,63	1,15	775,37	1,34	932,42	1,39	876,14	1,42	967,49
	1,04	604,54	1,06	684,97	1,27	885,46	1,28	885,99	1,34	850,04
	0,98	570,82	0,95	607,69	1,18	795,72	1,20	821,57	1,27	814,16
	0,89	482,14	0,84	510,53	1,06	728,16	1,13	752,08	1,17	710,75
	0,77	361,47	0,75	446,94	0,98	646,37	1,00	650,87	1,08	635,82
	0,54	205,35	0,61	361,03	0,85	554,13	0,93	578,00	0,98	575,11
	0,00	0,00	0,49	243,08	0,79	492,34	0,81	544,58	0,89	544,40
			0,44	144,33	0,67	421,62	0,71	467,06	0,79	383,31
			0,00	0,00	0,49	201,03	0,64	297,36	0,59	219,53
					0,00	0,00	0,42	175,05	0,00	0,00
							0,00	0,00		

Tabela B.52: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	2,1x10 ⁻²									
f [Hz]	6,88		6,88		6,88		6,88		6,88	
Γ [-]	4,00		4,00		4,00		4,00		4,00	
d _p [m]	2,19x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,49	591,01	2,49	490,03	2,46	569,49	2,46	556,64	2,48	598,12
	2,47	583,96	2,45	589,12	2,43	554,04	2,41	642,35	2,45	519,15
	2,43	565,22	2,40	624,92	2,39	538,25	2,39	546,84	2,42	573,37
	2,35	550,69	2,37	539,28	2,38	574,14	2,34	518,45	2,38	554,23
	2,32	600,68	2,34	633,53	2,32	536,44	2,28	622,03	2,34	501,30
	2,29	556,93	2,27	563,35	2,29	507,07	2,24	593,40	2,28	554,83
	2,23	575,12	2,23	554,13	2,25	510,39	2,18	573,72	2,26	568,93
	2,18	536,29	2,18	531,99	2,25	546,83	2,15	528,85	2,24	540,78
	2,11	485,01	2,16	520,17	2,19	552,33	2,11	578,85	2,18	489,90
	2,01	538,46	2,13	516,62	2,14	504,08	2,05	541,35	2,17	525,81
	1,93	493,01	2,05	525,42	2,12	589,05	1,98	551,62	2,13	528,00
	1,88	519,41	2,00	541,89	2,08	533,37	1,95	574,46	2,10	528,69
	1,83	508,08	1,94	535,43	2,02	529,96	1,90	499,58	2,07	527,07
	1,73	498,06	1,86	530,19	1,95	526,69	1,88	542,29	2,01	538,31
	1,63	496,17	1,80	531,73	1,91	522,06	1,81	503,71	1,94	505,53
	1,54	452,95	1,66	511,99	1,76	480,66	1,72	491,60	1,85	489,65
	1,46	452,82	1,62	522,35	1,67	493,52	1,66	483,07	1,78	476,94
	1,38	404,98	1,49	500,65	1,62	486,78	1,59	493,89	1,70	504,07
	1,28	400,43	1,39	490,34	1,55	488,54	1,47	488,72	1,63	482,83
	1,20	364,15	1,29	495,99	1,44	509,77	1,43	502,65	1,53	467,45
	1,13	367,14	1,15	417,19	1,34	454,21	1,39	468,10	1,42	432,22
	1,04	342,77	1,06	417,47	1,27	444,74	1,28	439,19	1,34	417,89
	0,98	337,01	0,95	368,90	1,18	428,12	1,20	444,90	1,27	434,02
	0,89	307,86	0,84	346,27	1,06	394,31	1,13	412,50	1,17	402,37
	0,77	268,81	0,75	331,94	0,98	372,66	1,00	364,85	1,08	367,54
	0,54	227,72	0,61	287,29	0,85	345,92	0,93	344,99	0,98	329,54
	0,00	195,53	0,49	241,11	0,79	318,84	0,81	339,20	0,89	329,92
			0,44	219,03	0,67	285,28	0,71	297,56	0,79	253,94
			0,00	195,76	0,49	226,08	0,64	247,15	0,59	243,94
					0,00	207,53	0,42	219,73	0,00	200,30
							0,00	200,45		

Tabela B.55: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$0,3 \times 10^{-2}$	$0,3 \times 10^{-2}$	$0,3 \times 10^{-2}$	$0,3 \times 10^{-2}$	$0,3 \times 10^{-2}$					
f [Hz]	9,10	9,10	9,10	9,10	9,10					
Γ [-]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00					
d_p [m]	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$					
ϕ [-]	0,0000	0,0009	0,0018	0,0036	0,0072					
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$					
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro					
	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)
	2,86	1370,23	2,88	1442,20	2,94	1445,59	2,94	1463,01	2,99	1404,85
	2,79	1397,71	2,84	1395,36	2,91	1413,08	2,91	1450,97	2,94	1425,06
	2,74	1322,83	2,79	1433,18	2,87	1416,14	2,88	1432,00	2,91	1405,67
	2,70	1377,50	2,75	1430,26	2,81	1422,82	2,83	1459,25	2,87	1449,42
	2,67	1363,14	2,71	1424,34	2,77	1393,00	2,79	1441,85	2,85	1421,62
	2,59	1386,13	2,67	1398,58	2,69	1418,13	2,75	1425,11	2,79	1452,46
	2,55	1367,95	2,65	1397,84	2,65	1424,41	2,72	1445,91	2,77	1429,60
	2,52	1337,61	2,60	1429,72	2,63	1401,50	2,69	1411,30	2,72	1430,64
	2,44	1360,18	2,56	1433,18	2,58	1427,90	2,67	1393,66	2,68	1409,62
	2,38	1335,62	2,51	1362,65	2,55	1392,01	2,62	1403,11	2,60	1415,52
	2,34	1340,03	2,47	1390,39	2,51	1389,38	2,59	1393,52	2,56	1386,16
	2,32	1298,30	2,43	1370,25	2,45	1395,15	2,55	1430,66	2,50	1389,63
	2,29	1321,71	2,37	1377,58	2,43	1388,60	2,53	1388,86	2,46	1395,45
	2,23	1300,99	2,31	1389,69	2,40	1384,97	2,50	1397,22	2,40	1378,71
	2,18	1331,19	2,28	1393,67	2,37	1402,40	2,46	1388,73	2,37	1376,68
	2,12	1321,65	2,22	1402,48	2,32	1380,56	2,43	1380,55	2,29	1388,33
	2,07	1337,39	2,19	1378,79	2,29	1382,44	2,41	1392,27	2,25	1366,44
	2,03	1351,47	2,13	1383,90	2,23	1391,41	2,36	1380,70	2,21	1364,85
	1,98	1305,13	2,05	1380,58	2,18	1390,22	2,32	1393,12	2,18	1358,22
	1,86	1351,43	2,00	1400,16	2,11	1396,79	2,27	1393,61	2,13	1354,88
	1,79	1304,33	1,94	1391,55	2,06	1396,59	2,22	1378,57	2,06	1339,62
	1,74	1269,11	1,86	1386,39	2,02	1406,52	2,17	1386,44	2,02	1332,01
	1,68	1207,15	1,81	1348,21	1,94	1398,97	2,11	1392,56	1,95	1326,01
	1,58	1158,85	1,75	1240,34	1,89	1385,52	2,03	1386,35	1,89	1297,56
	1,42	1018,60	1,71	1231,59	1,84	1321,05	1,97	1384,96	1,80	1200,30
	1,30	931,07	1,65	1209,86	1,78	1247,51	1,93	1372,48	1,73	1172,17
	1,16	812,82	1,59	1170,19	1,70	1225,37	1,88	1346,96	1,68	1149,05
	0,94	639,84	1,50	1114,44	1,59	1153,09	1,80	1261,97	1,59	1094,20
	0,77	486,31	1,37	1004,62	1,47	1070,68	1,73	1220,05	1,55	1052,08
	0,59	325,43	1,23	931,63	1,35	990,68	1,65	1173,99	1,51	1011,82
	0,00	0,00	0,95	703,14	1,24	958,95	1,52	1089,38	1,44	941,65
			0,71	452,31	1,13	851,74	1,40	998,04	1,38	922,19
			0,46	241,49	1,01	764,70	1,32	961,15	1,32	890,07
			0,00	0,00	0,84	586,11	1,09	781,45	1,27	841,48
					0,58	293,69	0,90	593,38	1,17	759,93
							0,71	403,62	1,06	678,53
							0,46	195,54	0,96	572,17
							0,00	0,00	0,81	419,31
									0,60	212,38
									0,00	0,00

Tabela B.56: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,3x10 ⁻²									
f [Hz]	9,10		9,10		9,10		9,10		9,10	
Γ [-]	1,00		1,00		1,00		1,00		1,00	
d _p [m]	3,67x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,86	384,33	2,88	348,71	2,94	392,90	2,94	420,67	2,99	308,02
	2,79	512,19	2,84	325,41	2,91	518,98	2,91	322,21	2,94	329,60
	2,74	399,99	2,79	329,98	2,87	378,81	2,88	428,93	2,91	423,69
	2,70	385,97	2,75	317,34	2,81	270,62	2,83	346,64	2,87	411,96
	2,67	337,70	2,71	406,29	2,77	293,16	2,79	415,70	2,85	305,09
	2,59	316,83	2,67	265,01	2,69	295,28	2,75	321,89	2,79	356,19
	2,55	319,26	2,65	424,04	2,65	247,55	2,72	353,64	2,77	301,22
	2,52	346,67	2,60	355,44	2,63	283,84	2,69	301,44	2,72	311,53
	2,44	267,97	2,56	337,54	2,58	275,58	2,67	360,20	2,68	265,06
	2,38	293,15	2,51	281,39	2,55	232,81	2,62	256,10	2,60	281,32
	2,34	251,09	2,47	314,42	2,51	290,45	2,59	239,42	2,56	244,24
	2,32	272,04	2,43	268,49	2,45	278,44	2,55	283,26	2,50	164,49
	2,29	251,42	2,37	217,28	2,43	225,45	2,53	261,72	2,46	171,12
	2,23	245,62	2,31	210,70	2,40	217,68	2,50	267,89	2,40	151,72
	2,18	193,08	2,28	191,66	2,37	227,06	2,46	197,49	2,37	154,08
	2,12	197,78	2,22	202,22	2,32	178,75	2,43	180,88	2,29	114,07
	2,07	171,39	2,19	140,66	2,29	195,62	2,41	251,71	2,25	120,42
	2,03	137,43	2,13	129,57	2,23	162,10	2,36	153,49	2,21	103,54
	1,98	126,70	2,05	111,22	2,18	109,28	2,32	162,42	2,18	111,77
	1,86	95,93	2,00	94,49	2,11	117,17	2,27	192,14	2,13	101,19
	1,79	94,57	1,94	97,48	2,06	110,18	2,22	114,64	2,06	90,38
	1,74	99,42	1,86	89,36	2,02	103,85	2,17	114,71	2,02	99,50
	1,68	101,79	1,81	85,56	1,94	90,90	2,11	102,66	1,95	89,90
	1,58	98,62	1,75	105,43	1,89	86,07	2,03	94,24	1,89	96,77
	1,42	103,60	1,71	101,13	1,84	104,62	1,97	87,74	1,80	93,33
	1,30	101,10	1,65	111,62	1,78	107,61	1,93	90,48	1,73	96,42
	1,16	98,41	1,59	98,63	1,70	100,70	1,88	88,49	1,68	95,30
	0,94	117,88	1,50	102,47	1,59	97,77	1,80	103,00	1,59	83,19
	0,77	125,27	1,37	101,09	1,47	97,48	1,73	95,31	1,55	79,49
	0,59	114,70	1,23	98,14	1,35	100,54	1,65	98,85	1,51	82,20
	0,00	96,62	0,95	117,68	1,24	90,25	1,52	91,80	1,44	88,76
			0,71	121,66	1,13	104,19	1,40	101,59	1,38	89,11
			0,46	100,57	1,01	108,14	1,32	94,51	1,32	91,61
			0,00	88,02	0,84	124,41	1,09	95,60	1,27	92,88
					0,58	103,12	0,90	118,12	1,17	91,71
					0,00	92,35	0,71	124,87	1,06	88,98
							0,46	105,19	0,96	82,39
							0,00	93,98	0,81	106,97
									0,60	126,17
									0,00	105,03

Tabela B.57: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,9x10 ⁻²									
f [Hz]	5,25		5,25		5,25		5,25		5,25	
Γ [-]	1,00		1,00		1,00		1,00		1,00	
d _p [m]	3,67x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)								
	2,89	1411,84	2,80	1351,84	2,85	1379,47	2,88	1372,45	2,82	1335,72
	2,84	1408,27	2,76	1357,81	2,80	1366,01	2,83	1386,13	2,76	1346,78
	2,79	1381,08	2,73	1361,69	2,75	1377,93	2,80	1382,67	2,72	1350,29
	2,77	1343,13	2,69	1363,35	2,72	1338,76	2,77	1395,33	2,68	1372,51
	2,72	1359,96	2,66	1382,50	2,66	1347,06	2,75	1349,65	2,64	1353,47
	2,66	1382,33	2,62	1400,33	2,60	1361,71	2,69	1356,92	2,59	1409,08
	2,63	1364,65	2,58	1362,04	2,55	1359,22	2,65	1365,23	2,56	1338,11
	2,59	1390,52	2,51	1417,12	2,51	1336,14	2,62	1362,70	2,52	1385,52
	2,56	1377,07	2,48	1393,61	2,46	1395,98	2,58	1371,21	2,47	1399,71
	2,51	1332,26	2,44	1390,36	2,41	1425,55	2,56	1375,71	2,42	1397,70
	2,49	1332,57	2,40	1375,11	2,36	1396,70	2,52	1411,49	2,38	1416,65
	2,45	1363,25	2,38	1392,97	2,30	1421,54	2,46	1398,24	2,33	1396,91
	2,43	1346,19	2,34	1379,72	2,26	1394,81	2,42	1411,51	2,29	1406,81
	2,35	1360,26	2,27	1355,55	2,19	1372,67	2,35	1399,31	2,26	1339,29
	2,33	1344,94	2,22	1370,64	2,14	1323,54	2,28	1395,29	2,19	1395,08
	2,26	1391,86	2,17	1414,44	2,08	1307,09	2,24	1356,39	2,18	1275,40
	2,21	1326,60	2,11	1416,24	2,02	1296,18	2,19	1336,88	2,09	1254,21
	2,16	1280,71	2,08	1289,25	1,96	1270,59	2,15	1306,35	2,02	1228,27
	2,12	1257,53	2,01	1286,83	1,93	1281,01	2,10	1294,46	1,98	1249,40
	2,07	1243,82	1,95	1300,39	1,85	1263,63	2,04	1261,00	1,91	1219,65
	2,02	1253,25	1,89	1304,10	1,76	1257,33	2,00	1247,68	1,84	1212,05
	1,99	1235,66	1,84	1304,03	1,69	1257,11	1,90	1263,69	1,80	1209,72
	1,94	1265,34	1,74	1305,86	1,56	1192,18	1,88	1246,85	1,78	1179,27
	1,86	1293,32	1,66	1278,96	1,49	1083,92	1,79	1236,87	1,70	1137,64
	1,79	1236,45	1,49	1175,34	1,40	999,43	1,72	1193,96	1,64	1046,34
	1,68	1166,86	1,40	1088,70	1,32	935,27	1,67	1180,62	1,56	973,08
	1,57	1129,74	1,24	981,43	1,18	837,32	1,58	1094,39	1,43	893,39
	1,39	1008,84	1,08	836,96	1,06	732,65	1,52	1012,17	1,36	841,44
	1,28	933,17	0,95	716,11	0,92	640,84	1,42	935,14	1,21	728,26
	1,12	811,39	0,86	661,04	0,83	548,90	1,34	877,10	1,10	630,68
	1,01	738,20	0,70	521,67	0,66	381,86	1,26	821,55	1,01	549,48
	0,83	548,05	0,59	405,88	0,55	285,97	1,15	744,15	0,90	448,47
	0,73	505,13	0,42	261,69	0,38	138,05	1,05	674,22	0,67	270,39
	0,59	365,81	0,31	154,55	0,00	0,00	1,01	629,49	0,52	166,81
	0,42	218,08	0,00	0,00			0,90	570,11	0,00	0,00
	0,00	0,00					0,78	437,34		
							0,67	318,33		
							0,52	201,73		
							0,27	68,93		
							0,00	0,00		

Tabela B.58: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,9x10 ⁻²									
f [Hz]	5,25		5,25		5,25		5,25		5,25	
Γ [-]	1,00		1,00		1,00		1,00		1,00	
d _p [m]	3,67x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,89	501,06	2,80	448,51	2,85	378,79	2,88	419,73	2,82	458,76
	2,84	439,53	2,76	448,52	2,80	427,02	2,83	407,10	2,76	340,96
	2,79	494,20	2,73	337,91	2,75	370,47	2,80	359,68	2,72	383,58
	2,77	464,43	2,69	352,73	2,72	408,70	2,77	342,05	2,68	410,12
	2,72	410,91	2,66	450,80	2,66	397,58	2,75	307,32	2,64	386,10
	2,66	367,71	2,62	432,69	2,60	362,76	2,69	306,52	2,59	324,67
	2,63	350,99	2,58	438,59	2,55	387,97	2,65	335,45	2,56	396,93
	2,59	448,25	2,51	263,17	2,51	445,91	2,62	367,63	2,52	358,62
	2,56	368,76	2,48	355,37	2,46	307,12	2,58	361,36	2,47	311,86
	2,51	426,19	2,44	361,37	2,41	243,07	2,56	401,03	2,42	358,83
	2,49	417,87	2,40	330,82	2,36	270,62	2,52	294,38	2,38	254,16
	2,45	348,94	2,38	347,26	2,30	264,34	2,46	247,86	2,33	298,83
	2,43	332,86	2,34	283,32	2,26	244,20	2,42	252,67	2,29	260,10
	2,35	293,99	2,27	277,27	2,19	242,10	2,35	271,69	2,26	297,08
	2,33	284,37	2,22	280,10	2,14	281,52	2,28	245,41	2,19	240,13
	2,26	220,98	2,17	239,20	2,08	293,57	2,24	297,33	2,18	309,90
	2,21	225,22	2,11	213,47	2,02	282,22	2,19	280,84	2,09	282,90
	2,16	275,32	2,08	254,54	1,96	259,40	2,15	304,57	2,02	268,20
	2,12	250,98	2,01	255,51	1,93	274,75	2,10	276,63	1,98	276,37
	2,07	248,59	1,95	226,80	1,85	253,96	2,04	272,41	1,91	253,27
	2,02	248,26	1,89	236,50	1,76	250,32	2,00	268,76	1,84	240,91
	1,99	251,71	1,84	238,46	1,69	248,35	1,90	265,00	1,80	233,77
	1,94	240,65	1,74	223,71	1,56	239,50	1,88	261,13	1,78	229,04
	1,86	241,95	1,66	232,49	1,49	224,70	1,79	243,42	1,70	199,41
	1,79	232,00	1,49	236,55	1,40	217,87	1,72	225,65	1,64	185,48
	1,68	201,32	1,40	247,05	1,32	204,19	1,67	227,16	1,56	179,67
	1,57	207,24	1,24	228,03	1,18	168,99	1,58	202,27	1,43	169,19
	1,39	211,99	1,08	184,52	1,06	135,36	1,52	200,64	1,36	143,21
	1,28	209,79	0,95	148,65	0,92	104,33	1,42	180,40	1,21	111,58
	1,12	170,38	0,86	129,44	0,83	84,93	1,34	179,54	1,10	93,10
	1,01	162,59	0,70	102,16	0,66	71,38	1,26	160,73	1,01	84,16
	0,83	110,38	0,59	90,20	0,55	78,12	1,15	122,88	0,90	82,38
	0,73	103,82	0,42	81,49	0,38	85,42	1,05	110,56	0,67	91,70
	0,59	89,92	0,31	79,08	0,00	93,54	1,01	94,64	0,52	101,00
	0,42	75,79	0,00	87,23			0,90	86,34	0,00	100,93
	0,00	92,17					0,78	76,63		
							0,67	76,47		
							0,52	85,16		
							0,27	99,46		
							0,00	100,95		

Tabela B.59: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$					
f [Hz]	4,07	4,07	4,07	4,07	4,07					
Γ [-]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00					
d_p [m]	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$					
ϕ [-]	0,0000	0,0009	0,0018	0,0036	0,0072					
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$					
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro					
	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)
	2,80	1226,34	2,91	1240,01	2,93	1306,59	2,98	1293,68	3,01	1335,28
	2,72	1264,67	2,86	1243,83	2,91	1279,06	2,93	1305,07	2,98	1358,80
	2,68	1249,56	2,82	1268,66	2,86	1319,15	2,87	1296,41	2,96	1290,45
	2,63	1273,49	2,78	1240,28	2,78	1338,34	2,84	1239,53	2,92	1284,89
	2,60	1275,86	2,74	1253,66	2,78	1226,33	2,78	1250,70	2,88	1264,51
	2,55	1260,38	2,68	1267,27	2,69	1271,56	2,72	1263,98	2,84	1306,51
	2,49	1270,68	2,66	1192,14	2,67	1236,89	2,65	1197,42	2,81	1245,48
	2,42	1300,57	2,61	1222,84	2,63	1214,83	2,60	1209,52	2,74	1232,77
	2,40	1259,46	2,54	1243,29	2,59	1193,64	2,54	1317,52	2,68	1306,32
	2,34	1300,56	2,50	1219,57	2,55	1176,41	2,50	1209,68	2,63	1288,81
	2,30	1334,70	2,41	1175,06	2,49	1247,34	2,43	1292,84	2,59	1242,91
	2,26	1233,44	2,38	1187,69	2,46	1247,64	2,37	1328,80	2,52	1264,63
	2,24	1238,47	2,36	1219,52	2,39	1290,65	2,30	1337,59	2,46	1323,75
	2,18	1257,98	2,31	1273,36	2,36	1264,56	2,29	1320,62	2,42	1352,17
	2,13	1233,39	2,27	1302,18	2,36	1249,23	2,23	1325,68	2,38	1359,71
	2,06	1236,32	2,26	1251,19	2,30	1342,35	2,18	1299,98	2,35	1370,25
	2,03	1205,93	2,20	1302,89	2,25	1311,84	2,10	1261,35	2,32	1361,75
	1,97	1172,87	2,15	1199,21	2,20	1315,08	2,02	1284,23	2,27	1378,76
	1,91	1089,78	2,09	1212,92	2,11	1259,02	1,94	1262,51	2,24	1397,68
	1,83	1034,94	2,01	1245,45	2,07	1270,30	1,88	1231,11	2,22	1308,75
	1,76	974,02	1,89	1219,11	2,00	1298,19	1,82	1169,48	2,17	1279,88
	1,69	912,16	1,82	1161,46	1,94	1279,36	1,76	1083,64	2,12	1290,83
	1,56	849,14	1,74	1086,33	1,88	1251,06	1,66	1062,53	2,05	1317,21
	1,45	812,27	1,62	990,19	1,82	1158,51	1,56	979,58	1,99	1321,38
	1,25	729,67	1,49	922,43	1,76	1092,57	1,44	932,71	1,93	1256,31
	1,08	650,47	1,29	824,92	1,68	1055,25	1,26	810,18	1,85	1186,94
	0,95	579,64	1,13	712,05	1,61	1010,70	1,13	703,83	1,79	1144,45
	0,75	464,42	1,01	623,75	1,45	956,62	1,02	631,54	1,72	1097,60
	0,66	386,11	0,88	530,91	1,33	886,45	0,90	558,31	1,65	1066,67
	0,57	336,46	0,77	471,77	1,22	784,87	0,71	408,89	1,56	1022,21
	0,41	217,31	0,67	382,78	1,06	668,12	0,61	320,73	1,41	924,23
	0,22	119,31	0,45	231,91	0,97	590,30	0,43	198,58	1,28	846,67
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,87	520,26	0,34	121,44	1,20	796,19
					0,70	401,89	0,00	0,00	1,01	650,40
					0,56	314,80			0,86	550,06
					0,33	153,82			0,71	430,43
					0,00	0,00			0,57	313,58
									0,41	211,74
									0,21	77,74
									0,00	0,00

Tabela B.60: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	1,5x10 ⁻²									
f [Hz]	4,07		4,07		4,07		4,07		4,07	
Γ [-]	1,00		1,00		1,00		1,00		1,00	
d _p [m]	3,67x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,80	500,00	2,91	496,99	2,93	481,73	2,98	649,54	3,01	584,58
	2,72	491,39	2,86	409,57	2,91	430,89	2,93	611,63	2,98	544,75
	2,68	517,69	2,82	575,31	2,86	516,15	2,87	545,34	2,96	623,97
	2,63	467,24	2,78	465,75	2,78	295,60	2,84	570,75	2,92	570,44
	2,60	461,98	2,74	485,56	2,78	534,13	2,78	556,73	2,88	589,71
	2,55	410,89	2,68	515,06	2,69	560,94	2,72	551,52	2,84	640,62
	2,49	452,09	2,66	517,97	2,67	543,24	2,65	510,65	2,81	561,43
	2,42	486,39	2,61	520,29	2,63	516,77	2,60	474,11	2,74	592,20
	2,40	435,44	2,54	477,11	2,59	463,98	2,54	312,56	2,68	595,04
	2,34	472,50	2,50	376,70	2,55	483,71	2,50	511,72	2,63	468,98
	2,30	296,24	2,41	470,44	2,49	371,07	2,43	393,49	2,59	562,52
	2,26	431,66	2,38	448,45	2,46	473,97	2,37	372,76	2,52	473,15
	2,24	432,78	2,36	365,97	2,39	358,26	2,30	284,71	2,46	480,43
	2,18	437,23	2,31	332,40	2,36	402,77	2,29	333,09	2,42	260,68
	2,13	421,71	2,27	386,55	2,36	457,70	2,23	417,81	2,38	302,16
	2,06	388,09	2,26	385,09	2,30	332,90	2,18	349,82	2,35	284,42
	2,03	209,81	2,20	344,02	2,25	357,50	2,10	344,74	2,32	283,39
	1,97	203,05	2,15	346,30	2,20	329,23	2,02	298,96	2,27	230,34
	1,91	215,99	2,09	345,50	2,11	338,93	1,94	248,05	2,24	222,02
	1,83	230,22	2,01	333,37	2,07	330,57	1,88	201,80	2,22	374,71
	1,76	235,80	1,89	295,02	2,00	322,70	1,82	230,70	2,17	358,67
	1,69	223,17	1,82	274,90	1,94	313,13	1,76	249,76	2,12	327,60
	1,56	227,28	1,74	263,60	1,88	276,70	1,66	255,54	2,05	290,01
	1,45	214,22	1,62	285,50	1,82	247,17	1,56	254,13	1,99	248,36
	1,25	177,71	1,49	273,81	1,76	264,69	1,44	234,40	1,93	184,89
	1,08	137,67	1,29	229,26	1,68	274,94	1,26	198,72	1,85	214,28
	0,95	109,13	1,13	169,95	1,61	281,85	1,13	160,35	1,79	230,64
	0,75	88,93	1,01	128,02	1,45	258,78	1,02	130,98	1,72	238,15
	0,66	77,06	0,88	105,96	1,33	239,34	0,90	109,71	1,65	242,85
	0,57	77,95	0,77	88,44	1,22	192,74	0,71	73,79	1,56	237,65
	0,41	91,43	0,67	72,61	1,06	148,61	0,61	73,09	1,41	220,65
	0,22	94,72	0,45	77,19	0,97	115,61	0,43	77,95	1,28	203,94
	0,00	97,90	0,00	97,63	0,87	91,32	0,34	83,11	1,20	179,93
					0,70	74,60	0,00	94,52	1,01	135,26
					0,56	79,11			0,86	97,67
					0,33	83,88			0,71	74,16
					0,00	96,45			0,57	77,21
									0,41	79,77
									0,21	94,21
									0,00	95,18

Tabela B.63: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$0,3 \times 10^{-2}$	$0,3 \times 10^{-2}$	$0,3 \times 10^{-2}$	$0,3 \times 10^{-2}$	$0,3 \times 10^{-2}$					
f [Hz]	12,87	12,87	12,87	12,87	12,87					
Γ [-]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00					
d_p [m]	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$					
ϕ [-]	0,0000	0,0009	0,0018	0,0036	0,0072					
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$					
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro					
	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)
	2,54	1313,02	2,48	1283,45	2,58	1277,33	2,57	1398,36	2,67	1353,29
	2,53	1276,95	2,43	1261,83	2,54	1345,90	2,52	1406,46	2,65	1396,36
	2,49	1287,14	2,35	1297,24	2,48	1367,60	2,48	1413,18	2,64	1366,80
	2,44	1304,85	2,33	1277,96	2,48	1240,94	2,42	1414,78	2,62	1392,51
	2,39	1299,61	2,29	1297,84	2,42	1373,31	2,38	1413,87	2,58	1363,66
	2,33	1293,74	2,22	1304,11	2,36	1400,76	2,33	1415,97	2,55	1369,89
	2,28	1302,25	2,12	1290,11	2,29	1366,73	2,26	1387,57	2,50	1415,65
	2,26	1297,56	2,03	1220,76	2,26	1386,34	2,19	1402,27	2,47	1383,23
	2,23	1294,40	1,99	1238,45	2,21	1357,69	2,16	1382,07	2,43	1406,93
	2,22	1299,22	1,85	1264,54	2,17	1383,62	2,05	1370,72	2,38	1390,50
	2,17	1296,65	1,79	1264,61	2,15	1362,40	1,98	1373,15	2,33	1391,54
	2,14	1292,04	1,74	1260,63	2,10	1356,32	1,94	1371,53	2,29	1402,03
	2,09	1296,87	1,68	1261,71	2,00	1309,38	1,86	1371,29	2,25	1388,29
	1,99	1303,56	1,61	1264,13	1,96	1303,21	1,78	1348,84	2,24	1393,03
	1,98	1302,75	1,48	1244,24	1,89	1337,85	1,72	1344,90	2,20	1392,43
	1,91	1300,92	1,42	964,28	1,85	1329,27	1,66	1319,66	2,16	1378,27
	1,86	1311,85	1,30	989,79	1,79	1335,11	1,58	1269,12	2,09	1367,45
	1,80	1302,98	1,21	808,26	1,73	1333,66	1,51	1167,23	2,06	1386,02
	1,69	1173,38	1,09	703,86	1,70	1332,61	1,46	1074,01	2,03	1373,89
	1,61	1108,36	1,00	663,96	1,62	1327,09	1,40	978,65	1,98	1365,38
	1,52	991,64	0,90	581,42	1,55	1319,02	1,31	834,71	1,92	1376,66
	1,46	913,92	0,77	470,32	1,48	1285,04	1,23	761,62	1,89	1372,63
	1,37	847,65	0,64	352,68	1,43	1253,44	1,12	722,62	1,82	1372,88
	1,29	788,69	0,51	235,15	1,39	1012,31	1,03	654,97	1,77	1361,32
	1,18	701,07	0,28	112,51	1,24	909,77	0,95	579,98	1,71	1349,96
	1,09	615,09	0,00	0,00	1,14	741,70	0,84	457,43	1,64	1331,57
	0,90	445,71			1,05	689,28	0,71	332,56	1,55	1310,81
	0,82	362,92			0,95	582,66	0,60	243,01	1,48	1260,57
	0,63	249,21			0,82	456,07	0,50	175,00	1,43	1122,47
	0,47	148,40			0,70	341,51	0,00	0,00	1,31	881,89
	0,30	83,00			0,55	228,35			1,19	749,07
	0,00	0,00			0,00	0,00			1,13	721,69
									1,03	642,20
									0,97	580,59
									0,89	479,94
									0,79	379,25
									0,71	285,79
									0,59	199,15
									0,00	0,00

Tabela B.64: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,3x10 ⁻²									
f [Hz]	12,87		12,87		12,87		12,87		12,87	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00		2,00		2,00	
d _p [m]	3,67x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,54	175,67	2,48	221,44	2,58	455,63	2,57	256,82	2,67	437,38
	2,53	171,89	2,43	358,49	2,54	322,42	2,52	227,99	2,65	182,77
	2,49	195,51	2,35	215,08	2,48	329,49	2,48	225,01	2,64	286,42
	2,44	192,33	2,33	292,26	2,48	446,50	2,42	142,85	2,62	228,46
	2,39	161,52	2,29	230,51	2,42	240,23	2,38	177,78	2,58	260,22
	2,33	185,15	2,22	190,24	2,36	213,74	2,33	222,03	2,55	313,50
	2,28	158,75	2,12	213,21	2,29	280,45	2,26	156,66	2,50	239,51
	2,26	142,42	2,03	212,48	2,26	228,60	2,19	142,72	2,47	381,61
	2,23	140,05	1,99	246,66	2,21	189,32	2,16	142,49	2,43	176,26
	2,22	167,82	1,85	168,91	2,17	239,88	2,05	147,84	2,38	228,65
	2,17	161,39	1,79	150,44	2,15	209,94	1,98	134,58	2,33	149,49
	2,14	164,86	1,74	146,19	2,10	179,42	1,94	144,03	2,29	166,19
	2,09	134,15	1,68	148,11	2,00	228,62	1,86	139,60	2,25	158,65
	1,99	129,06	1,61	146,40	1,96	227,51	1,78	139,07	2,24	158,03
	1,98	138,45	1,48	149,10	1,89	149,68	1,72	144,49	2,20	166,72
	1,91	134,95	1,42	155,02	1,85	163,84	1,66	138,63	2,16	168,16
	1,86	120,55	1,30	143,06	1,79	157,45	1,58	149,77	2,09	157,26
	1,80	125,60	1,21	139,52	1,73	150,84	1,51	158,75	2,06	143,16
	1,69	157,21	1,09	134,79	1,70	151,97	1,46	159,06	2,03	146,86
	1,61	158,63	1,00	122,98	1,62	142,02	1,40	150,32	1,98	153,55
	1,52	164,16	0,90	106,86	1,55	147,31	1,31	143,06	1,92	142,93
	1,46	162,68	0,77	107,24	1,48	149,05	1,23	142,67	1,89	150,04
	1,37	164,44	0,64	98,19	1,43	140,09	1,12	126,83	1,82	143,67
	1,29	157,26	0,51	95,38	1,39	149,13	1,03	118,56	1,77	145,91
	1,18	143,87	0,28	102,76	1,24	134,26	0,95	109,46	1,71	146,29
	1,09	122,18	0,00	99,58	1,14	120,40	0,84	94,94	1,64	147,19
	0,90	93,70			1,05	125,66	0,71	95,34	1,55	146,02
	0,82	90,19			0,95	105,74	0,60	105,28	1,48	133,65
	0,63	86,07			0,82	96,77	0,50	100,30	1,43	144,10
	0,47	81,07			0,70	103,25	0,00	103,95	1,31	127,32
	0,30	90,78			0,55	106,21			1,19	117,32
	0,00	92,31			0,00	105,28			1,13	119,26
									1,03	106,97
									0,97	107,50
									0,89	101,53
									0,79	95,45
									0,71	94,73
									0,59	101,60
									0,00	99,25

Tabela B.67: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$					
f [Hz]	5,76	5,76	5,76	5,76	5,76					
Γ [-]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00					
d_p [m]	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$					
ϕ [-]	0,0000	0,0009	0,0018	0,0036	0,0072					
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$					
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro					
	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)
	2,91	1280,22	3,04	1202,82	2,99	1271,03	2,96	1421,10	3,06	1358,92
	2,85	1275,83	2,96	1220,91	2,92	1298,09	2,92	1395,68	2,98	1390,18
	2,83	1273,06	2,91	1244,58	2,88	1228,16	2,86	1407,06	2,92	1378,32
	2,79	1256,42	2,90	1207,41	2,82	1289,44	2,80	1355,13	2,88	1366,95
	2,74	1285,79	2,85	1240,23	2,77	1226,18	2,76	1347,71	2,84	1378,28
	2,67	1285,56	2,78	1293,47	2,70	1259,01	2,69	1373,49	2,77	1376,44
	2,60	1300,98	2,71	1216,88	2,63	1286,78	2,64	1332,77	2,74	1408,97
	2,57	1285,48	2,65	1244,09	2,58	1309,41	2,56	1358,99	2,71	1350,89
	2,56	1264,99	2,61	1237,89	2,55	1311,42	2,49	1381,24	2,68	1345,32
	2,54	1226,68	2,56	1235,89	2,50	1244,25	2,43	1381,82	2,63	1387,67
	2,51	1248,74	2,51	1265,46	2,45	1257,91	2,40	1388,26	2,59	1380,85
	2,45	1227,68	2,47	1246,48	2,40	1281,26	2,35	1244,12	2,55	1395,42
	2,43	1193,28	2,41	1295,08	2,37	1280,31	2,28	1251,67	2,48	1381,67
	2,36	1210,06	2,36	1255,70	2,34	1260,03	2,25	1224,09	2,46	1345,78
	2,32	1221,32	2,30	1241,83	2,29	1264,32	2,21	1238,98	2,40	1385,58
	2,26	1203,49	2,23	1237,27	2,28	1242,26	2,14	1188,60	2,33	1402,00
	2,22	1168,97	2,17	1229,90	2,23	1242,85	2,07	1161,38	2,32	1372,70
	2,18	1109,30	2,12	1122,64	2,20	1184,83	2,04	1148,29	2,28	1279,39
	2,11	1046,40	2,03	1134,36	2,18	1144,70	1,97	1150,54	2,20	1249,22
	2,05	1038,54	1,91	1005,81	2,16	1197,92	1,91	1153,21	2,20	1220,11
	2,00	1000,25	1,79	971,80	2,07	1116,47	1,83	1119,13	2,13	1228,28
	1,95	962,86	1,71	941,94	2,00	1046,18	1,73	1084,23	2,09	1178,20
	1,85	908,69	1,62	893,31	1,91	989,67	1,64	1009,67	2,04	1148,37
	1,76	846,17	1,43	845,44	1,73	967,91	1,54	976,52	1,98	1125,21
	1,62	768,07	1,29	773,07	1,65	910,02	1,43	873,87	1,90	1130,46
	1,49	697,40	1,11	622,75	1,53	871,50	1,29	796,28	1,85	1138,88
	1,33	615,65	0,97	553,76	1,35	824,64	1,11	660,48	1,77	1138,52
	1,18	537,41	0,80	426,36	1,20	713,89	0,98	545,07	1,71	1121,64
	1,09	491,32	0,62	306,53	1,11	609,41	0,86	464,77	1,62	1064,72
	0,91	395,07	0,49	206,36	1,01	562,53	0,65	326,75	1,51	987,68
	0,79	324,15	0,17	87,91	0,88	478,70	0,53	230,24	1,42	900,40
	0,66	253,20	0,00	0,00	0,70	361,44	0,25	103,80	1,31	837,25
	0,57	214,21			0,58	280,42	0,00	0,00	1,16	741,06
	0,45	151,32			0,48	202,02			1,00	599,98
	0,00	0,00			0,36	139,14			0,89	508,20
					0,00	0,00			0,79	424,75
									0,57	262,29
									0,42	168,60
									0,31	97,65
									0,00	0,00

Tabela B.68: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	1,5x10 ⁻²									
f [Hz]	5,76		5,76		5,76		5,76		5,76	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00		2,00		2,00	
d _p [m]	3,67x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,91	416,82	3,04	490,46	2,99	505,37	2,96	410,61	3,06	488,69
	2,85	468,65	2,96	488,24	2,92	409,87	2,92	443,76	2,98	508,93
	2,83	429,31	2,91	428,00	2,88	337,63	2,86	463,51	2,92	532,87
	2,79	473,12	2,90	602,08	2,82	404,29	2,80	437,74	2,88	354,13
	2,74	454,04	2,85	468,73	2,77	445,87	2,76	390,72	2,84	456,80
	2,67	403,82	2,78	394,29	2,70	518,71	2,69	439,67	2,77	362,84
	2,60	411,30	2,71	415,65	2,63	423,27	2,64	443,52	2,74	403,33
	2,57	385,85	2,65	444,73	2,58	376,82	2,56	397,96	2,71	414,34
	2,56	393,59	2,61	495,03	2,55	498,06	2,49	377,48	2,68	411,84
	2,54	401,21	2,56	510,27	2,50	503,78	2,43	329,17	2,63	378,04
	2,51	391,53	2,51	466,58	2,45	487,42	2,40	320,47	2,59	466,64
	2,45	394,03	2,47	423,09	2,40	485,45	2,35	380,68	2,55	415,16
	2,43	403,42	2,41	444,80	2,37	442,11	2,28	311,62	2,48	319,97
	2,36	370,64	2,36	453,22	2,34	428,25	2,25	339,12	2,46	412,67
	2,32	357,97	2,30	426,63	2,29	458,13	2,21	309,80	2,40	327,87
	2,26	313,15	2,23	432,33	2,28	438,04	2,14	287,18	2,33	326,88
	2,22	340,32	2,17	416,35	2,23	425,97	2,07	297,69	2,32	335,34
	2,18	352,72	2,12	418,02	2,20	396,41	2,04	286,78	2,28	377,10
	2,11	344,19	2,03	393,26	2,18	423,49	1,97	291,04	2,20	337,79
	2,05	388,89	1,91	351,32	2,16	407,95	1,91	298,37	2,20	337,08
	2,00	379,32	1,79	343,29	2,07	385,12	1,83	277,54	2,13	341,54
	1,95	352,44	1,71	337,59	2,00	364,37	1,73	283,38	2,09	309,59
	1,85	347,66	1,62	341,67	1,91	336,91	1,64	283,45	2,04	299,98
	1,76	337,76	1,43	305,58	1,73	329,77	1,54	261,12	1,98	307,36
	1,62	273,78	1,29	288,35	1,65	325,67	1,43	278,11	1,90	290,23
	1,49	226,73	1,11	244,00	1,53	306,58	1,29	274,32	1,85	289,28
	1,33	209,68	0,97	219,65	1,35	275,30	1,11	255,56	1,77	284,44
	1,18	193,63	0,80	181,79	1,20	233,88	0,98	221,60	1,71	297,76
	1,09	173,78	0,62	138,85	1,11	213,46	0,86	198,90	1,62	285,42
	0,91	163,62	0,49	133,81	1,01	203,18	0,65	160,46	1,51	274,53
	0,79	152,47	0,17	115,92	0,88	177,83	0,53	139,89	1,42	272,45
	0,66	135,34	0,00	114,66	0,70	154,14	0,25	109,20	1,31	278,31
	0,57	127,22			0,58	133,59	0,00	94,26	1,16	276,32
	0,45	124,68			0,48	128,98			1,00	243,84
	0,00	110,46			0,36	123,52			0,89	204,58
					0,00	108,35			0,79	185,26
									0,57	132,76
									0,42	110,58
									0,31	106,03
									0,00	95,40

Tabela B.71: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$0,3 \times 10^{-2}$	$0,3 \times 10^{-2}$	$0,3 \times 10^{-2}$	$0,3 \times 10^{-2}$	$0,3 \times 10^{-2}$					
f [Hz]	18,20	18,20	18,20	18,20	18,20					
Γ [-]	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00					
d_p [m]	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$					
ϕ [-]	0,0000	0,0009	0,0018	0,0036	0,0072					
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$					
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro					
	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)
	2,67	1334,25	2,82	1351,24	2,78	1416,66	2,87	1458,89	2,71	1459,59
	2,65	1353,70	2,79	1316,75	2,76	1407,25	2,83	1444,88	2,70	1458,03
	2,63	1337,24	2,76	1333,74	2,70	1414,68	2,80	1418,27	2,65	1461,21
	2,60	1321,56	2,74	1321,06	2,66	1397,64	2,77	1419,92	2,63	1437,39
	2,57	1349,44	2,71	1331,59	2,63	1397,60	2,73	1457,01	2,61	1438,33
	2,56	1278,83	2,68	1336,92	2,58	1398,92	2,72	1397,74	2,58	1438,07
	2,50	1326,14	2,65	1298,85	2,53	1389,34	2,68	1407,37	2,55	1452,70
	2,46	1290,18	2,62	1354,09	2,49	1385,36	2,64	1413,01	2,52	1451,56
	2,40	1303,41	2,58	1353,73	2,47	1367,89	2,60	1408,16	2,49	1441,24
	2,35	1282,23	2,57	1324,62	2,42	1353,56	2,57	1383,03	2,47	1457,51
	2,31	1275,22	2,53	1306,72	2,39	1332,96	2,54	1407,35	2,45	1447,35
	2,25	1266,58	2,49	1299,81	2,33	1349,85	2,50	1405,18	2,41	1441,30
	2,18	1265,69	2,44	1317,72	2,28	1348,87	2,47	1386,45	2,38	1421,99
	2,12	1258,88	2,41	1310,97	2,22	1298,34	2,40	1376,44	2,34	1447,16
	2,09	1232,93	2,35	1266,75	2,17	1325,29	2,38	1363,97	2,32	1440,19
	2,05	1214,18	2,26	1269,43	2,11	1311,91	2,32	1390,17	2,30	1451,67
	1,99	1237,93	2,21	1241,03	2,05	1328,80	2,27	1385,97	2,26	1446,52
	1,90	1208,80	2,16	1277,11	2,00	1317,57	2,22	1377,82	2,26	1417,83
	1,82	1226,86	2,10	1142,25	1,95	1329,00	2,16	1350,85	2,24	1441,94
	1,76	1201,36	2,05	1234,36	1,91	1322,69	2,09	1360,03	2,16	1427,15
	1,69	1236,49	2,00	1260,42	1,84	1320,48	2,04	1342,75	2,11	1446,70
	1,62	1202,80	1,95	1194,26	1,80	1334,09	1,98	1356,87	2,07	1451,19
	1,53	1195,17	1,88	1199,22	1,76	1331,58	1,94	1366,76	2,01	1432,92
	1,48	1153,49	1,82	1227,14	1,72	1314,84	1,89	1350,61	1,95	1452,97
	1,39	1044,34	1,75	1235,27	1,68	1301,32	1,83	1352,04	1,91	1456,30
	1,34	765,10	1,67	1233,18	1,63	1304,54	1,75	1346,86	1,84	1473,10
	1,26	672,91	1,62	1237,93	1,56	1304,35	1,72	1352,92	1,72	1453,60
	1,14	618,59	1,56	1260,71	1,49	1076,83	1,66	1364,14	1,64	1440,25
	1,04	524,88	1,49	1225,62	1,43	994,31	1,62	1295,47	1,52	1426,40
	0,86	383,55	1,44	1129,51	1,34	756,22	1,55	1168,06	1,41	1245,80
	0,64	251,95	1,38	983,34	1,26	696,27	1,46	894,75	1,33	1068,35
	0,40	127,95	1,30	755,35	1,14	647,22	1,36	855,37	1,23	913,78
	0,00	0,00	1,22	676,58	0,99	540,17	1,22	728,60	1,00	693,84
			1,09	608,16	0,80	406,31	1,09	637,14	0,81	517,94
			0,94	479,64	0,58	242,54	0,97	568,65	0,71	397,75
			0,73	309,39	0,33	119,95	0,79	445,91	0,55	259,61
			0,49	198,69	0,00	0,00	0,66	328,98	0,30	126,44
			0,00	0,00			0,34	151,28	0,00	0,00
							0,00	0,00		

Tabela B.72: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,3x10 ⁻²									
f [Hz]	18,20		18,20		18,20		18,20		18,20	
Γ [-]	4,00		4,00		4,00		4,00		4,00	
d _p [m]	3,67x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,67	446,39	2,82	335,76	2,78	386,07	2,87	488,59	2,71	324,77
	2,65	387,82	2,79	396,01	2,76	332,75	2,83	386,16	2,70	416,44
	2,63	452,10	2,76	268,90	2,70	349,16	2,80	323,00	2,65	310,04
	2,60	411,84	2,74	279,26	2,66	315,81	2,77	368,12	2,63	338,99
	2,57	407,59	2,71	326,86	2,63	334,22	2,73	403,09	2,61	256,85
	2,56	400,11	2,68	394,17	2,58	274,44	2,72	291,66	2,58	307,51
	2,50	346,82	2,65	450,99	2,53	285,34	2,68	470,80	2,55	311,19
	2,46	407,37	2,62	319,52	2,49	347,55	2,64	286,14	2,52	311,76
	2,40	288,88	2,58	297,35	2,47	291,11	2,60	353,06	2,49	298,15
	2,35	368,84	2,57	278,87	2,42	341,11	2,57	294,64	2,47	232,27
	2,31	360,98	2,53	318,88	2,39	371,76	2,54	328,29	2,45	272,21
	2,25	304,50	2,49	415,61	2,33	340,86	2,50	318,70	2,41	250,94
	2,18	272,38	2,44	349,70	2,28	403,38	2,47	291,16	2,38	241,18
	2,12	350,10	2,41	403,78	2,22	352,46	2,40	305,85	2,34	248,05
	2,09	346,73	2,35	484,31	2,17	320,21	2,38	245,81	2,32	246,15
	2,05	330,95	2,26	332,74	2,11	336,84	2,32	264,19	2,30	244,75
	1,99	307,93	2,21	397,89	2,05	303,18	2,27	315,84	2,26	248,33
	1,90	285,48	2,16	332,93	2,00	304,59	2,22	281,39	2,26	233,45
	1,82	271,75	2,10	399,78	1,95	263,87	2,16	303,91	2,24	240,36
	1,76	251,65	2,05	341,76	1,91	271,22	2,09	255,08	2,16	246,16
	1,69	264,01	2,00	274,99	1,84	263,54	2,04	267,80	2,11	228,03
	1,62	251,51	1,95	309,48	1,80	249,96	1,98	236,49	2,07	237,50
	1,53	253,37	1,88	297,37	1,76	256,03	1,94	247,90	2,01	233,20
	1,48	248,23	1,82	255,22	1,72	260,64	1,89	237,92	1,95	240,53
	1,39	229,62	1,75	265,80	1,68	253,94	1,83	244,44	1,91	247,59
	1,34	197,88	1,67	258,76	1,63	265,92	1,75	254,96	1,84	252,56
	1,26	191,18	1,62	257,76	1,56	277,24	1,72	252,75	1,72	255,77
	1,14	188,97	1,56	271,19	1,49	216,40	1,66	260,64	1,64	253,87
	1,04	191,18	1,49	277,19	1,43	214,61	1,62	257,12	1,52	276,57
	0,86	188,88	1,44	242,76	1,34	206,42	1,55	229,48	1,41	283,21
	0,64	179,76	1,38	219,68	1,26	210,28	1,46	229,23	1,33	280,39
	0,40	172,62	1,30	214,57	1,14	224,71	1,36	223,04	1,23	296,12
	0,00	149,94	1,22	198,70	0,99	246,19	1,22	229,20	1,00	273,36
			1,09	203,20	0,80	237,64	1,09	251,88	0,81	259,04
			0,94	232,32	0,58	209,37	0,97	265,48	0,71	212,64
			0,73	222,57	0,33	172,07	0,79	255,91	0,55	178,90
			0,49	185,71	0,00	147,63	0,66	231,49	0,30	127,48
			0,00	157,88			0,34	182,74	0,00	120,38
							0,00	139,92		

Tabela B.73: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,9x10 ⁻²									
f [Hz]	10,51		10,51		10,51		10,51		10,51	
Γ [-]	4,00		4,00		4,00		4,00		4,00	
d _p [m]	3,67x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)								
	3,12	1318,23	3,06	1281,78	3,19	1276,03	3,19	1218,19	3,19	1286,55
	3,07	1306,00	3,02	1294,02	3,13	1298,38	3,13	1307,75	3,15	1318,59
	3,01	1302,92	2,99	1258,83	3,10	1309,24	3,09	1294,65	3,09	1355,68
	2,98	1338,28	2,95	1327,71	3,07	1308,76	3,05	1337,37	3,03	1359,90
	2,93	1305,43	2,91	1275,63	3,00	1330,72	3,04	1276,00	3,00	1381,04
	2,90	1340,58	2,86	1286,63	2,96	1226,67	2,99	1274,23	2,97	1368,72
	2,86	1320,14	2,82	1263,55	2,92	1295,48	2,95	1316,33	2,91	1340,41
	2,82	1343,72	2,80	1272,80	2,89	1328,47	2,90	1354,70	2,87	1319,08
	2,76	1345,62	2,76	1333,79	2,84	1198,44	2,84	1292,16	2,82	1327,67
	2,71	1346,98	2,72	1299,52	2,76	1286,18	2,80	1304,45	2,76	1357,78
	2,68	1338,38	2,70	1277,19	2,69	1324,68	2,75	1354,44	2,71	1357,52
	2,63	1357,83	2,67	1278,17	2,66	1276,94	2,69	1346,47	2,65	1374,48
	2,58	1359,70	2,63	1346,33	2,60	1330,00	2,61	1360,60	2,60	1378,55
	2,54	1366,98	2,59	1331,65	2,57	1338,60	2,56	1347,38	2,57	1355,25
	2,50	1333,27	2,55	1302,40	2,54	1333,82	2,50	1367,77	2,51	1381,35
	2,44	1349,45	2,51	1328,39	2,51	1325,18	2,44	1355,92	2,47	1371,52
	2,40	1332,87	2,46	1317,03	2,46	1346,44	2,39	1337,82	2,38	1381,44
	2,32	1334,64	2,41	1361,22	2,42	1308,73	2,36	1317,69	2,33	1383,73
	2,26	1328,05	2,33	1335,25	2,37	1340,65	2,29	1316,39	2,25	1361,03
	2,20	1330,45	2,26	1329,74	2,32	1333,77	2,18	1302,36	2,17	1356,60
	2,06	1309,06	2,20	1343,00	2,25	1324,58	2,11	1302,55	2,12	1347,94
	1,97	1278,46	2,13	1321,87	2,21	1301,65	1,99	1291,73	2,07	1341,05
	1,86	1096,18	2,01	1317,86	2,13	1289,63	1,89	1273,16	1,96	1337,86
	1,80	1028,10	1,92	1299,95	2,10	1283,70	1,80	1175,47	1,87	1318,52
	1,69	974,41	1,88	1210,79	2,02	1255,45	1,75	1062,47	1,77	1324,99
	1,63	869,55	1,80	1292,05	1,91	1241,71	1,69	1020,17	1,69	1216,64
	1,54	763,01	1,70	1282,56	1,83	1249,52	1,62	856,52	1,62	1056,49
	1,46	683,31	1,63	1234,01	1,80	1095,20	1,52	765,11	1,55	922,22
	1,37	600,99	1,64	940,33	1,69	1111,49	1,37	609,04	1,47	811,12
	1,29	535,48	1,59	866,82	1,61	848,55	1,24	505,01	1,33	680,33
	1,18	456,07	1,51	821,80	1,50	821,82	1,07	382,18	1,19	541,62
	1,06	397,82	1,45	761,59	1,40	788,08	0,87	288,43	1,06	431,89
	0,90	316,71	1,31	714,47	1,32	727,68	0,54	158,49	0,91	350,95
	0,77	260,79	1,17	599,39	1,23	643,54	0,00	0,00	0,66	232,70
	0,57	168,72	1,01	471,93	1,08	510,05			0,35	115,09
	0,34	91,90	0,86	370,93	0,95	442,08			0,00	0,00
	0,00	0,00	0,69	273,38	0,81	360,11				
			0,48	161,68	0,64	259,21				
			0,24	75,78	0,27	73,44				
			0,00	0,00	0,00	0,00				

Tabela B.74: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,9x10 ⁻²									
f [Hz]	10,51		10,51		10,51		10,51		10,51	
Γ [-]	4,00		4,00		4,00		4,00		4,00	
d _p [m]	3,67x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	3,12	409,34	3,06	509,65	3,19	400,43	3,19	512,24	3,19	536,69
	3,07	413,13	3,02	435,24	3,13	374,08	3,13	339,50	3,15	317,02
	3,01	339,90	2,99	472,35	3,10	452,17	3,09	385,56	3,09	429,44
	2,98	361,66	2,95	352,32	3,07	555,58	3,05	353,65	3,03	446,72
	2,93	340,86	2,91	477,76	3,00	455,76	3,04	337,85	3,00	392,55
	2,90	271,58	2,86	429,88	2,96	527,75	2,99	465,41	2,97	422,59
	2,86	282,11	2,82	421,77	2,92	469,15	2,95	419,23	2,91	369,39
	2,82	301,95	2,80	336,32	2,89	326,78	2,90	391,55	2,87	398,20
	2,76	301,97	2,76	407,19	2,84	536,49	2,84	351,38	2,82	352,21
	2,71	234,71	2,72	387,33	2,76	425,93	2,80	403,34	2,76	400,75
	2,68	258,64	2,70	387,77	2,69	325,78	2,75	334,55	2,71	321,78
	2,63	264,49	2,67	328,65	2,66	426,93	2,69	358,27	2,65	310,93
	2,58	270,52	2,63	250,41	2,60	318,55	2,61	279,87	2,60	381,96
	2,54	249,62	2,59	312,56	2,57	280,26	2,56	236,21	2,57	301,45
	2,50	299,96	2,55	343,98	2,54	346,61	2,50	255,01	2,51	256,69
	2,44	322,67	2,51	286,64	2,51	321,55	2,44	283,40	2,47	256,06
	2,40	335,78	2,46	293,87	2,46	313,99	2,39	275,60	2,38	231,17
	2,32	284,61	2,41	215,44	2,42	300,54	2,36	269,42	2,33	250,89
	2,26	269,71	2,33	304,06	2,37	247,78	2,29	210,17	2,25	274,70
	2,20	183,39	2,26	242,93	2,32	230,96	2,18	235,55	2,17	225,87
	2,06	177,97	2,20	259,15	2,25	218,13	2,11	225,16	2,12	232,03
	1,97	193,23	2,13	239,69	2,21	216,36	1,99	198,33	2,07	235,79
	1,86	200,34	2,01	227,46	2,13	260,26	1,89	197,31	1,96	209,53
	1,80	212,58	1,92	242,92	2,10	215,02	1,80	208,96	1,87	216,51
	1,69	228,67	1,88	229,04	2,02	220,58	1,75	200,36	1,77	211,60
	1,63	201,25	1,80	207,09	1,91	214,00	1,69	197,19	1,69	213,87
	1,54	232,18	1,70	207,02	1,83	201,45	1,62	208,29	1,62	214,36
	1,46	204,30	1,63	216,14	1,80	252,63	1,52	213,16	1,55	242,18
	1,37	201,45	1,64	238,55	1,69	225,59	1,37	163,46	1,47	199,20
	1,29	200,69	1,59	248,43	1,61	257,98	1,24	148,60	1,33	186,40
	1,18	158,64	1,51	252,10	1,50	248,31	1,07	161,24	1,19	166,42
	1,06	152,84	1,45	264,49	1,40	186,44	0,87	139,61	1,06	151,47
	0,90	141,75	1,31	207,72	1,32	177,83	0,54	137,21	0,91	149,33
	0,77	131,59	1,17	193,76	1,23	168,73	0,00	124,79	0,66	153,67
	0,57	131,73	1,01	164,84	1,08	153,59			0,35	134,39
	0,34	113,11	0,86	165,17	0,95	153,43			0,00	128,27
	0,00	111,58	0,69	141,06	0,81	155,26				
			0,48	138,34	0,64	163,95				
			0,24	124,87	0,27	149,98				
			0,00	129,02	0,00	143,72				

Tabela B.75: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$				
f [Hz]	8,14	8,14	8,14	8,14	8,14				
Γ [-]	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00				
d_p [m]	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$				
ϕ [-]	0,0000	0,0009	0,0018	0,0036	0,0072				
H_0 [m]	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$	$10,0 \times 10^{-2}$				
partícula	vidro	vidro	vidro	vidro	vidro				
U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)	U_s (m/s)	Δp (N/m ²)
3,22	1381,36	3,19	1265,00	3,18	1331,01	3,19	1280,88	3,16	1393,92
3,17	1406,78	3,16	1309,79	3,12	1305,14	3,12	1326,75	3,14	1334,52
3,14	1391,24	3,12	1330,15	3,07	1300,18	3,07	1348,84	3,07	1368,24
3,08	1411,90	3,07	1301,28	3,03	1308,99	3,03	1340,24	3,05	1370,76
3,04	1386,35	2,98	1312,51	2,98	1272,28	3,01	1314,85	3,01	1319,73
3,02	1381,07	2,94	1355,07	2,95	1283,12	2,96	1304,32	2,97	1336,69
2,97	1393,71	2,88	1283,95	2,90	1313,62	2,94	1322,53	2,93	1372,01
2,95	1359,12	2,86	1259,92	2,88	1289,38	2,88	1322,58	2,92	1307,10
2,91	1390,20	2,83	1315,99	2,83	1346,40	2,86	1327,57	2,89	1340,84
2,87	1384,34	2,78	1290,03	2,79	1330,21	2,80	1364,01	2,83	1357,82
2,82	1352,85	2,73	1242,11	2,77	1289,57	2,78	1346,13	2,78	1273,53
2,79	1329,58	2,65	1277,31	2,68	1400,42	2,75	1338,32	2,73	1270,31
2,74	1358,63	2,60	1302,26	2,66	1281,61	2,70	1283,43	2,68	1355,94
2,67	1341,90	2,57	1267,14	2,60	1295,06	2,65	1297,87	2,62	1326,20
2,64	1319,09	2,53	1282,81	2,56	1321,86	2,61	1339,87	2,55	1330,46
2,59	1329,64	2,47	1303,47	2,53	1272,85	2,56	1338,21	2,51	1312,58
2,54	1289,33	2,43	1275,33	2,48	1275,67	2,49	1303,24	2,47	1341,18
2,48	1259,48	2,32	1273,42	2,45	1183,02	2,43	1352,55	2,40	1318,21
2,45	1236,08	2,25	1252,49	2,43	1206,52	2,44	1170,67	2,36	1277,35
2,36	1174,68	2,23	1258,58	2,33	1315,70	2,28	1271,87	2,29	1307,48
2,30	1125,97	2,16	1253,36	2,25	1250,33	2,20	1305,65	2,25	1265,20
2,21	1028,82	2,07	1249,68	2,17	1290,32	2,13	1310,52	2,17	1307,72
2,12	991,25	1,97	1129,80	2,04	1263,86	2,08	1261,73	2,12	1291,59
2,07	922,25	1,88	1119,65	2,00	1128,11	1,97	1146,96	2,07	1286,35
2,02	910,05	1,81	1052,30	1,93	1131,46	1,92	1139,39	1,98	1169,34
1,95	865,53	1,73	894,39	1,89	1088,68	1,87	1075,36	1,90	1109,51
1,89	824,03	1,64	804,08	1,81	1039,76	1,81	1077,71	1,86	1096,39
1,81	791,15	1,56	761,03	1,75	972,09	1,74	1020,31	1,82	1034,26
1,74	730,08	1,48	692,92	1,68	911,41	1,70	946,04	1,76	1016,30
1,64	663,66	1,34	616,33	1,61	827,22	1,65	854,24	1,70	942,65
1,60	631,49	1,24	558,58	1,53	769,90	1,56	816,78	1,65	869,88
1,52	617,45	1,05	480,10	1,44	681,89	1,51	738,25	1,58	792,86
1,46	561,91	0,94	420,16	1,27	581,22	1,39	655,69	1,51	748,34
1,35	528,88	0,72	273,94	1,15	526,45	1,27	583,97	1,39	665,22
1,22	454,22	0,52	165,22	0,97	448,38	1,14	517,70	1,24	590,92
1,09	374,11	0,00	0,00	0,79	326,74	0,99	447,93	1,11	523,73
0,81	222,40			0,61	201,96	0,85	355,39	0,92	392,40
0,61	146,12			0,00	0,00	0,61	209,13	0,68	237,12
0,00	0,00					0,00	0,00	0,45	112,90
								0,00	0,00

Tabela B.76: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	1,5x10 ⁻²									
f [Hz]	8,14		8,14		8,14		8,14		8,14	
Γ [-]	4,00		4,00		4,00		4,00		4,00	
d _p [m]	3,67x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	3,22	382,90	3,19	469,74	3,18	546,02	3,19	574,33	3,16	538,65
	3,17	422,13	3,16	492,55	3,12	450,19	3,12	473,28	3,14	599,17
	3,14	383,45	3,12	475,99	3,07	552,52	3,07	602,81	3,07	547,57
	3,08	363,60	3,07	471,60	3,03	497,92	3,03	577,56	3,05	512,22
	3,04	408,62	2,98	496,59	2,98	488,74	3,01	600,23	3,01	511,23
	3,02	426,15	2,94	459,91	2,95	497,72	2,96	567,25	2,97	520,03
	2,97	413,04	2,88	438,89	2,90	435,38	2,94	531,54	2,93	511,54
	2,95	466,57	2,86	499,54	2,88	481,82	2,88	480,93	2,92	477,57
	2,91	409,75	2,83	474,35	2,83	512,58	2,86	496,87	2,89	486,35
	2,87	412,87	2,78	415,61	2,79	518,21	2,80	493,41	2,83	496,23
	2,82	403,39	2,73	469,18	2,77	493,09	2,78	498,98	2,78	459,66
	2,79	390,35	2,65	424,09	2,68	376,33	2,75	488,26	2,73	524,87
	2,74	342,32	2,60	402,87	2,66	470,43	2,70	437,28	2,68	472,27
	2,67	336,71	2,57	398,27	2,60	513,84	2,65	476,67	2,62	485,24
	2,64	320,06	2,53	387,61	2,56	450,74	2,61	425,23	2,55	458,27
	2,59	285,56	2,47	396,60	2,53	463,21	2,56	442,93	2,51	395,33
	2,54	275,55	2,43	368,70	2,48	407,03	2,49	432,63	2,47	426,09
	2,48	276,09	2,32	353,88	2,45	426,30	2,43	389,27	2,40	358,52
	2,45	265,68	2,25	350,09	2,43	512,56	2,44	543,95	2,36	427,71
	2,36	272,48	2,23	343,82	2,33	421,43	2,28	389,17	2,29	371,22
	2,30	296,02	2,16	349,48	2,25	359,62	2,20	341,66	2,25	411,08
	2,21	280,99	2,07	321,76	2,17	359,27	2,13	340,42	2,17	367,21
	2,12	275,32	1,97	320,61	2,04	315,67	2,08	352,84	2,12	373,07
	2,07	291,66	1,88	304,06	2,00	322,46	1,97	322,53	2,07	342,10
	2,02	291,16	1,81	323,80	1,93	339,83	1,92	308,64	1,98	320,01
	1,95	282,79	1,73	283,54	1,89	318,22	1,87	319,05	1,90	292,00
	1,89	308,13	1,64	254,84	1,81	314,87	1,81	300,69	1,86	308,30
	1,81	292,28	1,56	255,86	1,75	307,92	1,74	295,26	1,82	312,94
	1,74	279,16	1,48	274,19	1,68	292,80	1,70	306,03	1,76	313,08
	1,64	254,95	1,34	250,77	1,61	273,11	1,65	273,49	1,70	277,89
	1,60	251,57	1,24	250,94	1,53	284,55	1,56	283,35	1,65	287,06
	1,52	261,02	1,05	258,21	1,44	267,92	1,51	279,33	1,58	270,22
	1,46	242,85	0,94	260,76	1,27	248,52	1,39	272,53	1,51	278,21
	1,35	247,53	0,72	228,60	1,15	273,05	1,27	260,81	1,39	279,51
	1,22	219,60	0,52	208,42	0,97	259,72	1,14	271,88	1,24	268,19
	1,09	211,84	0,00	188,91	0,79	262,18	0,99	262,69	1,11	255,97
	0,81	186,38			0,61	226,00	0,85	265,20	0,92	245,24
	0,61	161,78			0,00	192,42	0,61	220,63	0,68	224,78
	0,00	153,32					0,00	189,24	0,45	193,30
								0,00		178,17

Tabela B.77: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	2,1x10 ⁻²									
f [Hz]	6,88		6,88		6,88		6,88		6,88	
Γ [-]	4,00		4,00		4,00		4,00		4,00	
d _p [m]	3,67x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)								
	2,96	1321,85	2,93	1279,50	2,95	1312,02	3,02	1304,85	3,01	1277,63
	2,92	1285,35	2,84	1261,23	2,92	1270,51	2,99	1309,30	2,95	1324,98
	2,89	1298,01	2,81	1248,53	2,87	1342,45	2,94	1294,79	2,90	1338,41
	2,83	1284,49	2,76	1275,25	2,81	1305,26	2,84	1305,50	2,87	1292,69
	2,75	1279,11	2,72	1271,22	2,80	1291,78	2,79	1329,55	2,82	1385,48
	2,72	1274,15	2,67	1268,58	2,75	1344,08	2,75	1269,89	2,81	1285,69
	2,67	1273,87	2,61	1305,38	2,71	1338,05	2,68	1326,84	2,76	1270,54
	2,63	1244,97	2,59	1225,74	2,67	1312,69	2,65	1301,46	2,72	1278,79
	2,59	1181,84	2,53	1253,71	2,61	1335,93	2,58	1307,90	2,67	1306,58
	2,54	1183,23	2,49	1257,98	2,59	1271,24	2,53	1277,94	2,61	1313,69
	2,50	1121,10	2,43	1201,28	2,53	1348,17	2,46	1301,26	2,56	1352,16
	2,45	1095,25	2,39	1194,72	2,51	1285,07	2,44	1325,89	2,54	1301,09
	2,41	1069,25	2,34	1197,18	2,48	1222,24	2,39	1327,97	2,50	1287,77
	2,38	1042,17	2,27	1120,78	2,42	1231,58	2,33	1291,87	2,45	1339,44
	2,36	1008,52	2,21	1142,92	2,36	1213,17	2,30	1292,34	2,40	1305,77
	2,35	963,58	2,13	1115,60	2,32	1187,08	2,28	1192,85	2,36	1277,98
	2,29	954,20	2,07	1081,25	2,29	1223,93	2,24	1179,85	2,31	1240,70
	2,28	918,66	1,99	1075,32	2,26	1222,45	2,20	1145,61	2,26	1177,32
	2,26	894,33	1,91	960,44	2,22	1190,90	2,10	1122,98	2,22	1217,60
	2,19	863,16	1,88	902,41	2,20	1192,52	2,03	1058,64	2,19	1154,48
	2,14	859,16	1,80	858,71	2,15	1181,36	1,95	1033,15	2,14	1142,80
	2,10	831,87	1,69	841,24	2,09	1139,32	1,91	969,93	2,09	1130,68
	2,06	813,94	1,54	763,75	2,05	1115,60	1,82	934,80	2,04	1059,65
	2,00	829,55	1,49	725,36	1,99	1046,48	1,75	859,54	1,99	1073,22
	1,96	791,86	1,37	667,87	1,93	1017,81	1,65	837,56	1,93	985,94
	1,88	780,80	1,27	622,59	1,87	948,53	1,53	782,55	1,82	959,95
	1,80	750,68	1,16	573,29	1,76	922,12	1,43	726,73	1,76	908,03
	1,71	732,82	1,00	511,74	1,66	858,95	1,31	657,12	1,65	879,96
	1,59	711,75	0,89	448,28	1,57	806,73	1,21	608,99	1,53	776,28
	1,50	625,17	0,77	354,36	1,46	762,17	1,05	553,34	1,41	744,35
	1,38	571,67	0,63	274,58	1,37	717,21	0,93	488,25	1,28	710,54
	1,22	463,18	0,48	180,28	1,26	642,31	0,81	380,53	1,11	610,93
	1,15	385,84	0,31	129,86	1,15	597,43	0,67	278,55	1,00	524,44
	1,00	313,51	0,00	0,00	1,03	575,81	0,52	182,73	0,89	422,77
	0,92	251,18			0,93	469,69	0,36	153,18	0,74	291,27
	0,78	201,16			0,77	362,37	0,00	0,00	0,58	227,70
	0,59	129,67			0,69	289,41			0,43	143,76
	0,00	0,00			0,54	202,79			0,00	0,00
					0,33	113,65				
					0,00	0,00				

Tabela B.78: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	2,1x10 ⁻²									
f [Hz]	6,88		6,88		6,88		6,88		6,88	
Γ [-]	4,00		4,00		4,00		4,00		4,00	
d _p [m]	3,67x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,96	470,17	2,93	493,75	2,95	566,17	3,02	473,99	3,01	555,74
	2,92	438,83	2,84	469,88	2,92	544,14	2,99	505,95	2,95	488,35
	2,89	436,30	2,81	503,36	2,87	510,05	2,94	547,88	2,90	515,74
	2,83	457,47	2,76	443,28	2,81	542,07	2,84	438,32	2,87	526,88
	2,75	409,86	2,72	452,47	2,80	477,67	2,79	470,57	2,82	506,48
	2,72	426,52	2,67	463,78	2,75	495,56	2,75	495,78	2,81	514,08
	2,67	387,33	2,61	408,25	2,71	450,80	2,68	489,04	2,76	483,15
	2,63	368,60	2,59	452,96	2,67	481,03	2,65	436,17	2,72	545,21
	2,59	351,33	2,53	434,01	2,61	429,88	2,58	417,03	2,67	436,33
	2,54	365,95	2,49	427,12	2,59	436,44	2,53	440,58	2,61	543,60
	2,50	341,81	2,43	441,95	2,53	417,91	2,46	405,83	2,56	481,06
	2,45	367,59	2,39	431,09	2,51	424,22	2,44	376,85	2,54	461,12
	2,41	363,52	2,34	428,56	2,48	445,41	2,39	385,73	2,50	434,82
	2,38	406,36	2,27	395,04	2,42	439,02	2,33	390,03	2,45	429,71
	2,36	396,87	2,21	408,17	2,36	427,49	2,30	364,12	2,40	415,95
	2,35	372,29	2,13	395,84	2,32	438,42	2,28	399,33	2,36	424,75
	2,29	430,18	2,07	402,39	2,29	399,68	2,24	408,34	2,31	423,93
	2,28	395,83	1,99	389,79	2,26	438,69	2,20	429,13	2,26	424,43
	2,26	421,80	1,91	390,72	2,22	413,05	2,10	391,39	2,22	428,76
	2,19	401,30	1,88	379,95	2,20	381,50	2,03	412,99	2,19	394,27
	2,14	419,01	1,80	383,25	2,15	426,97	1,95	401,18	2,14	400,71
	2,10	391,38	1,69	406,18	2,09	397,50	1,91	409,40	2,09	414,39
	2,06	396,12	1,54	363,16	2,05	422,01	1,82	394,01	2,04	403,90
	2,00	394,94	1,49	360,13	1,99	392,35	1,75	401,74	1,99	417,15
	1,96	397,16	1,37	371,07	1,93	408,03	1,65	385,48	1,93	411,53
	1,88	396,93	1,27	362,46	1,87	409,87	1,53	402,21	1,82	393,00
	1,80	402,42	1,16	373,57	1,76	397,46	1,43	381,35	1,76	421,30
	1,71	396,12	1,00	354,39	1,66	385,11	1,31	386,27	1,65	406,56
	1,59	397,64	0,89	333,22	1,57	371,93	1,21	389,68	1,53	400,48
	1,50	369,17	0,77	298,30	1,46	365,58	1,05	354,56	1,41	418,89
	1,38	333,28	0,63	253,10	1,37	379,87	0,93	317,60	1,28	410,93
	1,22	277,97	0,48	220,87	1,26	374,76	0,81	284,26	1,11	376,15
	1,15	245,42	0,31	194,80	1,15	357,63	0,67	251,10	1,00	335,79
	1,00	216,65	0,00	153,39	1,03	363,33	0,52	191,60	0,89	296,34
	0,92	201,83			0,93	328,36	0,36	185,42	0,74	256,37
	0,78	186,72			0,77	284,34	0,00	141,52	0,58	215,13
	0,59	155,02			0,69	258,21			0,43	185,48
	0,00	127,79			0,54	214,56			0,00	130,31
					0,33	169,25				
					0,00	145,58				

Tabela B.79: Valores das réplicas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,0x10 ⁻²									
f [Hz]	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
Γ [-]	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
d _p [m]	2,19x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)								
	2,48	1400,72	2,52	1444,46	2,44	1426,48	2,46	1403,33	2,42	1455,50
	2,42	1423,13	2,47	1413,17	2,39	1430,70	2,42	1442,26	2,39	1449,20
	2,37	1448,77	2,42	1426,93	2,36	1441,31	2,40	1446,58	2,36	1434,47
	2,34	1446,20	2,40	1412,38	2,34	1427,73	2,36	1453,01	2,32	1468,30
	2,30	1437,97	2,37	1417,26	2,32	1448,33	2,32	1460,72	2,31	1446,65
	2,26	1427,99	2,35	1417,80	2,27	1442,36	2,30	1437,52	2,26	1445,08
	2,20	1441,12	2,30	1408,93	2,25	1447,62	2,27	1453,09	2,22	1471,70
	2,14	1428,15	2,25	1422,92	2,22	1427,87	2,26	1421,80	2,21	1442,79
	2,08	1434,22	2,23	1418,96	2,17	1428,54	2,21	1422,99	2,13	1453,23
	2,01	1441,00	2,19	1413,51	2,11	1406,18	2,15	1427,31	2,10	1423,17
	1,96	1445,65	2,14	1417,42	2,06	1404,48	2,11	1421,92	2,06	1411,05
	1,91	1408,93	2,10	1418,05	2,03	1412,02	2,03	1426,24	2,04	1374,24
	1,83	1388,14	2,09	1416,03	2,00	1403,73	2,02	1422,16	2,01	1369,53
	1,77	1421,65	2,04	1408,95	1,95	1417,38	1,96	1407,16	1,98	1379,75
	1,66	1388,86	1,98	1436,14	1,92	1397,86	1,94	1384,32	1,94	1338,57
	1,55	1377,19	1,92	1437,99	1,85	1402,83	1,91	1392,72	1,91	1346,24
	1,47	1319,42	1,91	1429,72	1,78	1395,82	1,85	1372,61	1,87	1327,17
	1,32	1358,18	1,87	1424,20	1,69	1361,80	1,78	1365,98	1,83	1315,87
	1,21	1346,77	1,84	1415,38	1,66	1335,55	1,71	1363,15	1,78	1286,26
	1,08	1351,38	1,84	1378,74	1,59	1324,81	1,65	1331,93	1,71	1290,79
	0,99	1343,00	1,81	1394,99	1,51	1326,43	1,56	1316,93	1,64	1249,97
	0,86	1253,24	1,76	1420,21	1,44	1281,40	1,43	1293,41	1,58	1240,70
	0,75	1009,02	1,71	1416,18	1,37	1218,58	1,34	1171,89	1,53	1164,38
	0,60	760,50	1,68	1412,74	1,31	1142,02	1,26	1096,88	1,47	1104,32
	0,50	583,26	1,62	1392,36	1,24	1063,45	1,17	970,16	1,41	1061,50
	0,40	429,08	1,56	1377,93	1,18	990,64	1,08	875,17	1,34	1009,20
	0,10	240,60	1,50	1314,25	1,11	919,44	1,01	817,14	1,26	952,06
	0,00	0,00	1,45	1233,80	1,05	841,07	0,97	761,73	1,19	875,68
			1,38	1148,69	0,98	754,58	0,91	699,13	1,12	814,28
			1,30	1071,41	0,90	671,07	0,86	631,01	1,02	726,43
			1,12	934,95	0,81	590,78	0,79	559,24	0,96	646,35
			0,94	776,13	0,75	534,75	0,68	444,94	0,88	579,35
			0,79	613,37	0,71	483,35	0,57	363,25	0,79	479,40
			0,62	414,45	0,62	409,78	0,45	244,09	0,71	421,56
			0,00	0,00	0,54	367,79	0,00	0,00	0,63	353,36
					0,44	265,13			0,53	290,26
					0,00	0,00			0,43	188,88
									0,00	0,00

Tabela B.80: Valores das réplicas do desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,0x10 ⁻²									
f [Hz]	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
Γ [-]	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
d _p [m]	2,19x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,48	389,04	2,52	386,43	2,44	279,66	2,46	375,68	2,42	380,05
	2,42	313,61	2,47	372,11	2,39	317,42	2,42	226,46	2,39	319,36
	2,37	339,82	2,42	311,27	2,36	268,94	2,40	290,18	2,36	222,85
	2,34	315,07	2,40	294,06	2,34	292,24	2,36	352,13	2,32	319,58
	2,30	393,64	2,37	341,96	2,32	257,81	2,32	233,51	2,31	330,51
	2,26	302,72	2,35	274,38	2,27	250,11	2,30	226,63	2,26	296,31
	2,20	380,97	2,30	323,83	2,25	290,45	2,27	252,37	2,22	333,03
	2,14	355,04	2,25	404,45	2,22	285,49	2,26	300,82	2,21	322,35
	2,08	340,74	2,23	338,84	2,17	311,87	2,21	281,90	2,13	267,48
	2,01	373,46	2,19	286,18	2,11	194,90	2,15	346,93	2,10	228,52
	1,96	302,77	2,14	299,54	2,06	245,70	2,11	257,81	2,06	216,62
	1,91	403,97	2,10	254,07	2,03	199,40	2,03	281,92	2,04	163,87
	1,83	316,44	2,09	245,56	2,00	208,11	2,02	342,63	2,01	150,94
	1,77	279,07	2,04	294,58	1,95	243,54	1,96	209,62	1,98	198,04
	1,66	367,99	1,98	241,75	1,92	190,48	1,94	207,09	1,94	128,79
	1,55	348,44	1,92	184,81	1,85	176,46	1,91	212,45	1,91	164,23
	1,47	326,72	1,91	240,96	1,78	213,21	1,85	164,65	1,87	149,63
	1,32	252,23	1,87	245,06	1,69	158,94	1,78	152,64	1,83	109,43
	1,21	205,93	1,84	175,72	1,66	122,99	1,71	158,88	1,78	107,62
	1,08	140,11	1,84	308,13	1,59	117,05	1,65	131,69	1,71	101,49
	0,99	112,82	1,81	266,50	1,51	108,54	1,56	123,38	1,64	107,21
	0,86	108,37	1,76	247,77	1,44	105,33	1,43	106,57	1,58	100,69
	0,75	90,44	1,71	191,98	1,37	108,67	1,34	97,67	1,53	95,29
	0,60	72,61	1,68	175,46	1,31	103,37	1,26	94,53	1,47	90,84
	0,50	67,84	1,62	103,81	1,24	93,72	1,17	82,22	1,41	83,32
	0,40	84,82	1,56	71,06	1,18	88,55	1,08	76,07	1,34	79,98
	0,10	92,28	1,50	71,95	1,11	84,14	1,01	67,95	1,26	83,19
	0,00	100,00	1,45	75,15	1,05	80,04	0,97	70,21	1,19	73,75
			1,38	80,92	0,98	66,39	0,91	69,18	1,12	68,58
			1,30	85,86	0,90	64,38	0,86	67,34	1,02	67,84
			1,12	76,57	0,81	68,17	0,79	72,27	0,96	73,43
			0,94	89,31	0,75	70,36	0,68	78,33	0,88	71,60
			0,79	109,20	0,71	78,56	0,57	90,11	0,79	87,19
			0,62	120,71	0,62	85,10	0,45	93,61	0,71	89,21
			0,00	97,98	0,54	82,22	0,00	108,14	0,63	88,94
					0,44	95,42			0,53	89,64
					0,00	101,77			0,43	95,46
									0,00	117,83

Tabela B.83: Valores das réplicas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	2,1x10 ⁻²									
f [Hz]	4,860		4,860		4,860		4,860		4,860	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00		2,00		2,00	
d _p [m]	2,19x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)								
	2,48	1314,32	2,42	1211,70	2,44	1253,01	2,42	1335,45	2,45	1327,20
	2,45	1281,02	2,36	1260,02	2,42	1200,82	2,38	1232,37	2,40	1311,27
	2,37	1350,46	2,35	1267,37	2,39	1302,52	2,35	1239,08	2,38	1311,89
	2,34	1316,55	2,33	1254,64	2,38	1244,88	2,32	1263,50	2,37	1275,30
	2,31	1268,11	2,29	1257,25	2,34	1328,10	2,26	1251,26	2,31	1357,94
	2,28	1262,84	2,28	1265,40	2,32	1294,64	2,23	1311,13	2,26	1300,34
	2,21	1266,78	2,24	1254,48	2,31	1247,72	2,19	1231,92	2,24	1352,24
	2,14	1229,22	2,19	1248,96	2,26	1261,13	2,12	1233,12	2,18	1338,58
	2,10	1195,66	2,14	1242,80	2,25	1246,95	2,06	1312,00	2,12	1200,19
	2,05	1193,92	2,08	1217,14	2,19	1266,21	2,01	1164,44	1,98	1213,41
	1,99	1201,34	2,00	1211,27	2,13	1282,88	1,98	1191,00	1,93	1152,64
	1,92	1189,76	1,95	1165,06	2,05	1230,06	1,84	1184,33	1,88	1136,45
	1,82	1165,12	1,90	1135,74	1,98	1249,05	1,79	1129,78	1,80	1145,93
	1,78	1146,62	1,87	1126,31	1,92	1156,44	1,69	1150,29	1,68	1123,62
	1,66	1083,87	1,83	1131,86	1,85	1171,99	1,61	1098,44	1,62	1128,53
	1,56	1102,97	1,78	1113,57	1,77	1173,22	1,54	1064,71	1,52	1107,18
	1,50	1030,66	1,73	1130,68	1,66	1121,70	1,38	1030,02	1,44	1046,68
	1,41	989,73	1,59	1119,10	1,55	1078,25	1,24	981,31	1,33	1031,69
	1,26	957,44	1,53	1090,47	1,47	1064,24	1,10	832,55	1,22	974,03
	1,15	847,40	1,43	1038,81	1,39	1027,63	1,00	740,55	1,09	819,89
	0,97	712,73	1,31	1011,15	1,32	1003,11	0,86	627,44	0,99	724,26
	0,88	627,80	1,18	971,29	1,17	958,06	0,75	546,31	0,87	633,45
	0,78	557,00	1,08	903,73	1,08	900,92	0,61	423,63	0,75	548,18
	0,62	443,25	0,90	737,36	0,98	780,31	0,44	300,44	0,64	458,52
	0,53	377,89	0,76	643,02	0,87	655,10	0,33	210,13	0,50	332,03
	0,33	215,09	0,56	445,17	0,75	576,73	0,00	0,00	0,33	216,75
	0,00	0,00	0,48	358,30	0,61	489,59			0,00	0,00
			0,31	267,58	0,50	412,26				
			0,00	0,00	0,36	280,43				
					0,27	150,28				
					0,00	0,00				

Tabela B.84: Valores das réplicas do desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	2,1x10 ⁻²									
f [Hz]	4,860		4,860		4,860		4,860		4,860	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00		2,00		2,00	
d _p [m]	2,19x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,48	492,53	2,42	506,19	2,44	524,93	2,42	480,39	2,45	572,03
	2,45	466,04	2,36	487,24	2,42	534,73	2,38	499,07	2,40	519,48
	2,37	503,26	2,35	462,17	2,39	564,42	2,35	563,22	2,38	482,98
	2,34	507,68	2,33	522,07	2,38	573,75	2,32	528,27	2,37	540,82
	2,31	488,62	2,29	474,72	2,34	505,75	2,26	567,78	2,31	376,33
	2,28	485,53	2,28	404,24	2,32	482,51	2,23	381,42	2,26	527,69
	2,21	535,63	2,24	533,08	2,31	519,14	2,19	505,30	2,24	385,12
	2,14	495,67	2,19	502,47	2,26	518,17	2,12	529,68	2,18	306,47
	2,10	499,66	2,14	444,62	2,25	475,46	2,06	384,49	2,12	569,20
	2,05	457,03	2,08	471,99	2,19	514,06	2,01	562,71	1,98	580,03
	1,99	451,47	2,00	430,48	2,13	480,13	1,98	524,88	1,93	572,35
	1,92	460,79	1,95	481,27	2,05	418,36	1,84	549,11	1,88	564,91
	1,82	514,27	1,90	484,00	1,98	421,75	1,79	484,63	1,80	551,96
	1,78	511,98	1,87	450,01	1,92	459,50	1,69	495,26	1,68	553,92
	1,66	499,76	1,83	443,91	1,85	467,28	1,61	491,45	1,62	543,46
	1,56	507,13	1,78	442,89	1,77	441,06	1,54	476,67	1,52	527,47
	1,50	482,22	1,73	488,72	1,66	482,26	1,38	467,32	1,44	480,42
	1,41	480,57	1,59	456,81	1,55	436,85	1,24	429,22	1,33	451,30
	1,26	430,00	1,53	474,75	1,47	459,79	1,10	322,99	1,22	373,17
	1,15	383,56	1,43	450,66	1,39	461,31	1,00	310,38	1,09	326,17
	0,97	278,95	1,31	464,91	1,32	451,64	0,86	272,27	0,99	301,83
	0,88	271,56	1,18	427,28	1,17	405,55	0,75	244,23	0,87	276,69
	0,78	237,53	1,08	395,87	1,08	386,21	0,61	194,51	0,75	226,29
	0,62	192,57	0,90	357,71	0,98	350,64	0,44	173,13	0,64	201,58
	0,53	192,41	0,76	319,75	0,87	323,81	0,33	154,31	0,50	165,73
	0,33	165,01	0,56	244,88	0,75	297,87	0,00	133,36	0,33	145,20
	0,00	138,50	0,48	198,37	0,61	241,33			0,00	132,08
			0,31	170,81	0,50	206,09				
			0,00	134,01	0,36	167,40				
					0,27	142,43				
					0,00	150,94				

Tabela B.85: Valores das réplicas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,9x10 ⁻²									
f [Hz]	5,25		5,25		5,25		5,25		5,25	
Γ [-]	1,00		1,00		1,00		1,00		1,00	
d _p [m]	2,19x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)								
	2,55	1307,18	2,50	1353,23	2,48	1372,58	2,52	1399,31	2,51	1396,44
	2,47	1323,61	2,47	1300,07	2,42	1305,88	2,47	1409,31	2,48	1421,35
	2,38	1331,17	2,35	1346,93	2,40	1301,45	2,43	1402,04	2,43	1410,82
	2,35	1305,66	2,32	1329,73	2,35	1305,59	2,40	1372,53	2,39	1409,86
	2,29	1325,34	2,27	1318,32	2,29	1359,51	2,33	1381,08	2,36	1394,79
	2,24	1301,26	2,23	1335,82	2,23	1343,95	2,28	1393,40	2,32	1361,56
	2,16	1292,92	2,16	1312,74	2,15	1310,91	2,23	1385,89	2,30	1332,79
	2,10	1274,30	2,13	1310,32	2,05	1339,97	2,18	1371,83	2,24	1371,35
	2,02	1304,06	2,11	1258,60	1,98	1273,34	2,11	1338,40	2,16	1401,19
	1,91	1291,58	1,98	1339,77	1,90	1276,28	2,04	1379,62	2,14	1354,51
	1,81	1284,10	1,97	1284,49	1,84	1310,70	2,01	1344,39	2,09	1326,38
	1,73	1294,52	1,89	1328,00	1,81	1242,04	1,95	1343,08	2,02	1358,03
	1,70	1283,77	1,80	1269,07	1,73	1297,65	1,89	1286,87	1,98	1290,93
	1,65	1296,29	1,72	1301,87	1,60	1207,93	1,80	1308,60	1,95	1253,13
	1,58	1251,70	1,66	1290,65	1,49	1211,00	1,73	1353,14	1,85	1310,59
	1,50	1200,12	1,59	1209,45	1,40	1147,28	1,62	1290,66	1,77	1280,69
	1,39	1206,57	1,53	1216,53	1,31	1116,19	1,50	1224,96	1,70	1259,88
	1,26	1114,07	1,43	1224,96	1,18	1104,65	1,43	1233,38	1,58	1269,35
	1,16	1077,20	1,39	1135,90	1,08	1011,39	1,35	1218,74	1,43	1231,86
	1,06	1000,53	1,30	1123,05	1,02	884,32	1,28	1206,28	1,32	1222,02
	0,97	850,79	1,20	1086,64	0,92	791,95	1,17	1047,66	1,20	1165,10
	0,84	695,04	1,07	1000,29	0,82	694,33	1,08	956,36	1,10	1059,43
	0,72	538,25	0,97	857,80	0,72	601,10	0,99	853,12	1,02	975,92
	0,59	398,29	0,88	732,94	0,46	423,70	0,87	752,53	0,91	879,34
	0,40	199,06	0,75	552,28	0,30	206,25	0,72	622,04	0,80	787,91
	0,00	0,00	0,59	415,52	0,00	0,00	0,58	528,00	0,69	669,05
			0,44	264,73			0,34	235,79	0,59	584,87
			0,28	141,13			0,00	0,00	0,51	464,45
			0,00	0,00					0,40	316,35
									0,18	137,12
									0,00	0,00

Tabela B.86: Valores das réplicas do desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,9x10 ⁻²									
f [Hz]	5,25		5,25		5,25		5,25		5,25	
Γ [-]	1,00		1,00		1,00		1,00		1,00	
d _p [m]	2,19x10 ⁻³									
φ [-]	0,0000		0,0009		0,0018		0,0036		0,0072	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²									
partícula	vidro									
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)								
	2,55	552,91	2,50	495,84	2,48	490,30	2,52	570,99	2,51	477,33
	2,47	492,28	2,47	550,35	2,42	471,75	2,47	533,13	2,48	500,02
	2,38	435,13	2,35	348,81	2,40	518,74	2,43	524,08	2,43	500,77
	2,35	536,91	2,32	397,96	2,35	553,15	2,40	577,97	2,39	544,09
	2,29	514,19	2,27	443,99	2,29	450,64	2,33	408,87	2,36	434,56
	2,24	469,12	2,23	405,31	2,23	473,92	2,28	451,76	2,32	520,29
	2,16	523,40	2,16	417,96	2,15	395,88	2,23	538,97	2,30	540,94
	2,10	482,43	2,13	403,56	2,05	384,00	2,18	505,57	2,24	587,23
	2,02	482,12	2,11	499,46	1,98	426,20	2,11	412,66	2,16	526,35
	1,91	450,35	1,98	394,34	1,90	403,58	2,04	507,68	2,14	447,56
	1,81	493,86	1,97	396,17	1,84	387,34	2,01	470,65	2,09	559,35
	1,73	397,05	1,89	460,25	1,81	359,88	1,95	495,55	2,02	505,99
	1,70	535,66	1,80	460,68	1,73	340,00	1,89	487,90	1,98	514,93
	1,65	449,13	1,72	417,84	1,60	359,47	1,80	428,84	1,95	524,50
	1,58	422,06	1,66	397,70	1,49	357,44	1,73	311,75	1,85	486,88
	1,50	370,14	1,59	369,14	1,40	308,27	1,62	414,56	1,77	406,55
	1,39	327,42	1,53	351,48	1,31	281,10	1,50	401,27	1,70	418,30
	1,26	255,65	1,43	321,47	1,18	227,27	1,43	377,44	1,58	424,35
	1,16	224,89	1,39	305,10	1,08	207,48	1,35	323,97	1,43	357,06
	1,06	232,96	1,30	288,56	1,02	174,11	1,28	296,32	1,32	308,11
	0,97	187,68	1,20	251,30	0,92	147,01	1,17	222,38	1,20	246,38
	0,84	138,59	1,07	213,90	0,82	109,95	1,08	188,80	1,10	197,67
	0,72	93,35	0,97	189,92	0,72	96,89	0,99	146,99	1,02	192,96
	0,59	80,04	0,88	155,01	0,46	87,82	0,87	105,75	0,91	155,13
	0,40	88,61	0,75	98,81	0,30	92,72	0,72	88,81	0,80	123,12
	0,00	102,02	0,59	81,39	0,00	120,36	0,58	89,79	0,69	92,77
			0,44	85,67			0,34	92,92	0,59	80,28
			0,28	93,84			0,00	126,48	0,51	79,50
			0,00	100,72					0,40	92,41
									0,18	94,42
									0,00	103,05

APÊNDICE C

Dados experimentais da queda de pressão no leito, do seu desvio padrão e da segregação, para a análise da distribuição de partículas sobre a fluidodinâmica em leito fluidizado, vibrado e vibrofluidizado

Tabela C.1: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,0x10 ⁻²		0,0x10 ⁻²		0,0x10 ⁻²	
f [Hz]	0,00		0,00		0,00	
Γ [-]	0,00		0,00		0,00	
d _p [m]	1,28x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³		3,67x10 ⁻³	
φ [-]	0,0000		0,0000		0,0000	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²	
partícula	vidro		vidro		vidro	
	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)
	1,59	1479,03	2,23	1491,61	2,75	1445,54
	1,53	1476,21	2,19	1482,61	2,67	1525,45
	1,47	1483,12	2,12	1498,80	2,64	1481,94
	1,41	1494,17	2,04	1511,08	2,60	1448,16
	1,37	1482,01	1,99	1466,37	2,54	1460,27
	1,29	1478,29	1,94	1481,83	2,49	1483,32
	1,24	1417,62	1,86	1457,25	2,42	1501,56
	1,16	1447,50	1,79	1463,87	2,38	1483,43
	1,06	1462,90	1,73	1450,61	2,34	1451,08
	1,00	1419,09	1,65	1445,36	2,22	1463,11
	0,92	1439,81	1,58	1462,01	2,15	1472,77
	0,82	1423,50	1,49	1441,32	2,11	1448,40
	0,74	1423,02	1,39	1446,96	2,05	1465,64
	0,64	1314,89	1,31	1460,29	1,98	1464,65
	0,49	895,25	1,22	1463,17	1,92	1481,78
	0,34	504,62	1,12	1415,87	1,87	1478,35
	0,00	0,00	0,98	1145,57	1,79	1477,31
			0,88	963,29	1,70	1475,62
			0,74	727,33	1,64	1428,77
			0,60	507,49	1,57	1354,59
			0,43	277,07	1,48	1226,98
			0,00	0,00	1,39	1115,25
					1,31	991,06
					1,21	864,76
					1,08	710,61
					0,98	602,54
					0,84	462,07
					0,68	331,00
					0,48	190,61
					0,00	0,00

Tabela C.2: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,0x10 ⁻²		0,0x10 ⁻²		0,0x10 ⁻²	
f [Hz]	0,00		0,00		0,00	
Γ [-]	0,00		0,00		0,00	
d _p [m]	1,28x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³		3,67x10 ⁻³	
φ [-]	0,0000		0,0000		0,0000	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²	
partícula	vidro		vidro		vidro	
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)	U _s (m/s)	δp (N/m ²)	U _s (m/s)	δp (N/m ²)
	1,59	449,57	2,23	359,22	2,75	420,56
	1,53	440,23	2,19	345,48	2,67	304,44
	1,47	383,63	2,12	287,72	2,64	310,50
	1,41	315,72	2,04	307,69	2,60	399,47
	1,37	393,50	1,99	369,20	2,54	334,96
	1,29	387,52	1,94	399,73	2,49	312,28
	1,24	447,97	1,86	436,75	2,42	297,14
	1,16	424,30	1,79	243,77	2,38	311,14
	1,06	383,57	1,73	388,05	2,34	262,86
	1,00	325,09	1,65	352,88	2,22	243,04
	0,92	262,10	1,58	298,82	2,15	211,46
	0,82	186,93	1,49	243,94	2,11	188,87
	0,74	125,23	1,39	192,54	2,05	168,44
	0,64	71,76	1,31	126,96	1,98	136,58
	0,49	69,26	1,22	92,36	1,92	108,58
	0,34	74,15	1,12	72,46	1,87	95,98
	0,00	0,00	0,98	70,13	1,79	84,15
			0,88	75,56	1,70	68,97
			0,74	75,08	1,64	69,91
			0,60	79,09	1,57	69,37
			0,43	78,72	1,48	69,44
			0,00	0,00	1,39	69,06
					1,31	71,66
					1,21	73,06
					1,08	72,54
					0,98	74,20
					0,84	72,45
					0,68	75,85
					0,48	75,98
					0,00	0,00

Tabela C.3: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,3x10 ⁻²		0,3x10 ⁻²		0,3x10 ⁻²	
f [Hz]	12,87		12,87		12,87	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00	
d _p [m]	1,28x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³		3,67x10 ⁻³	
φ [-]	0,0000		0,0000		0,0000	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²	
partícula	vidro		vidro		vidro	
	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)
	1,58	1372,02	2,22	1373,30	2,73	1414,16
	1,53	1378,62	2,18	1388,98	2,67	1401,90
	1,47	1371,64	2,11	1413,19	2,64	1374,83
	1,42	1384,57	2,07	1394,82	2,58	1389,78
	1,35	1385,38	1,99	1393,29	2,53	1372,62
	1,28	1352,40	1,91	1414,57	2,48	1439,49
	1,20	1358,47	1,86	1348,40	2,41	1430,31
	1,16	1315,23	1,80	1355,98	2,39	1343,67
	1,09	1332,75	1,73	1393,48	2,32	1404,00
	1,00	1288,41	1,63	1379,25	2,25	1417,44
	0,93	1280,26	1,58	1321,03	2,20	1407,90
	0,82	1325,12	1,48	1302,74	2,16	1389,91
	0,71	1341,09	1,38	1346,94	2,09	1409,22
	0,59	1282,37	1,29	1330,95	2,03	1411,21
	0,44	774,69	1,22	1291,36	1,99	1374,80
	0,30	383,58	1,09	1317,29	1,90	1379,51
	0,00	0,00	0,99	1102,27	1,85	1405,01
			0,88	956,51	1,78	1398,28
			0,73	769,14	1,70	1318,46
			0,51	448,02	1,62	1141,38
			0,30	207,99	1,53	1049,53
			0,00	0,00	1,46	1021,21
					1,36	898,84
					1,28	823,14
					1,19	785,70
					1,07	684,49
					0,95	525,94
					0,80	388,27
					0,65	280,31
					0,43	147,23
					0,00	0,00

Tabela C.4: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,3x10 ⁻²		0,3x10 ⁻²		0,3x10 ⁻²	
f [Hz]	12,87		12,87		12,87	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00	
d _p [m]	1,28x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³		3,67x10 ⁻³	
φ [-]	0,0000		0,0000		0,0000	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²	
partícula	vidro		vidro		vidro	
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)	U _s (m/s)	δp (N/m ²)	U _s (m/s)	δp (N/m ²)
	1,58	596,54	2,22	444,00	2,73	395,14
	1,53	508,51	2,18	418,42	2,67	383,77
	1,47	525,96	2,11	410,45	2,64	420,82
	1,42	416,74	2,07	327,47	2,58	337,09
	1,35	428,02	1,99	410,16	2,53	359,18
	1,28	418,49	1,91	309,76	2,48	298,47
	1,20	439,95	1,86	381,01	2,41	265,76
	1,16	438,19	1,80	366,13	2,39	288,90
	1,09	359,48	1,73	333,61	2,32	265,42
	1,00	298,01	1,63	330,69	2,25	224,81
	0,93	277,65	1,58	331,42	2,20	180,19
	0,82	205,73	1,48	281,49	2,16	207,90
	0,71	148,47	1,38	207,84	2,09	163,20
	0,59	153,29	1,29	167,62	2,03	159,78
	0,44	214,84	1,22	146,41	1,99	137,24
	0,30	238,56	1,09	160,53	1,90	125,91
	0,00	246,01	0,99	148,40	1,85	118,54
			0,88	151,76	1,78	113,62
			0,73	174,49	1,70	116,82
			0,51	169,61	1,62	151,60
			0,30	159,68	1,53	140,22
			0,00	139,51	1,46	136,67
					1,36	128,93
					1,28	127,92
					1,19	137,51
					1,07	139,18
					0,95	116,90
					0,80	109,66
					0,65	107,48
					0,43	99,22
					0,00	85,92

Tabela C.5: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,9x10 ⁻²		0,9x10 ⁻²		0,9x10 ⁻²	
f [Hz]	7,43		7,43		7,43	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00	
d _p [m]	1,28x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³		3,67x10 ⁻³	
φ [-]	0,0000		0,0000		0,0000	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²	
partícula	vidro		vidro		vidro	
	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)
	1,59	1336,26	2,23	1342,78	2,74	1325,75
	1,56	1330,16	2,20	1296,70	2,71	1359,49
	1,51	1310,09	2,14	1298,74	2,64	1328,29
	1,45	1317,82	2,09	1309,77	2,61	1356,51
	1,41	1273,20	2,02	1335,13	2,56	1399,69
	1,32	1319,36	1,96	1284,74	2,51	1360,77
	1,26	1262,01	1,90	1294,01	2,47	1362,43
	1,18	1281,69	1,82	1271,05	2,42	1330,05
	1,11	1298,42	1,77	1246,40	2,36	1371,48
	1,03	1237,61	1,69	1336,97	2,30	1337,80
	0,96	1253,31	1,60	1336,64	2,26	1334,93
	0,86	1252,33	1,53	1330,74	2,20	1309,17
	0,77	1244,56	1,42	1274,90	2,12	1340,51
	0,68	1092,91	1,31	1296,76	2,08	1338,73
	0,54	910,48	1,23	1154,95	1,97	1327,18
	0,41	536,52	1,13	1050,82	1,95	1143,01
	0,00	0,00	1,03	961,16	1,88	1133,02
			0,92	883,49	1,84	1100,92
			0,77	618,43	1,75	1072,76
			0,61	440,64	1,69	994,59
			0,43	232,98	1,60	973,68
			0,00	0,00	1,53	949,89
					1,45	901,83
					1,37	865,63
					1,27	733,74
					1,15	617,67
					1,05	534,87
					0,91	415,93
					0,77	331,30
					0,61	224,48
					0,46	132,03
					0,00	0,00

Tabela C.6: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,9x10 ⁻²		0,9x10 ⁻²		0,9x10 ⁻²	
f [Hz]	7,43		7,43		7,43	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00	
d _p [m]	1,28x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³		3,67x10 ⁻³	
φ [-]	0,0000		0,0000		0,0000	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²	
partícula	vidro		vidro		vidro	
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)	U _s (m/s)	δp (N/m ²)	U _s (m/s)	δp (N/m ²)
	1,59	586,86	2,23	497,67	2,74	425,98
	1,56	576,00	2,20	516,33	2,71	443,55
	1,51	539,53	2,14	519,78	2,64	486,98
	1,45	539,30	2,09	536,86	2,61	403,05
	1,41	474,36	2,02	435,17	2,56	369,93
	1,32	527,88	1,96	481,07	2,51	367,54
	1,26	481,22	1,90	437,07	2,47	350,51
	1,18	461,99	1,82	534,07	2,42	316,40
	1,11	405,40	1,77	433,98	2,36	321,44
	1,03	408,71	1,69	407,50	2,30	286,73
	0,96	360,88	1,60	368,00	2,26	293,27
	0,86	299,36	1,53	328,64	2,20	294,07
	0,77	250,71	1,42	323,70	2,12	274,59
	0,68	248,19	1,31	272,51	2,08	262,17
	0,54	294,24	1,23	281,50	1,97	253,12
	0,41	272,27	1,13	259,08	1,95	290,85
	0,00	295,66	1,03	242,27	1,88	266,81
			0,92	253,19	1,84	267,35
			0,77	240,10	1,75	255,74
			0,61	231,20	1,69	220,37
			0,43	210,84	1,60	216,12
			0,00	146,86	1,53	213,24
					1,45	217,23
					1,37	225,48
					1,27	238,48
					1,15	214,84
					1,05	212,70
					0,91	187,70
					0,77	166,48
					0,61	145,25
					0,46	127,98
					0,00	100,11

Tabela C.7: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,0x10 ⁻²		0,0x10 ⁻²		0,0x10 ⁻²	
f [Hz]	0,00		0,00		0,00	
Γ [-]	0,00		0,00		0,00	
d _s [m]	2,18x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³	
φ [-]	0,0000		0,0000		0,0000	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²	
distribuição	binária		plana		gaussiana	
	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)
	2,23	1481,38	2,21	1501,87	2,22	1493,09
	2,18	1488,96	2,16	1509,14	2,18	1469,11
	2,10	1490,41	2,12	1516,29	2,12	1499,06
	2,04	1476,71	2,06	1506,60	2,06	1482,87
	1,99	1466,18	2,00	1500,96	1,99	1504,25
	1,93	1472,49	1,94	1491,67	1,93	1484,00
	1,87	1457,08	1,84	1530,38	1,86	1504,97
	1,80	1471,20	1,80	1495,15	1,79	1494,90
	1,72	1475,78	1,72	1488,80	1,71	1498,57
	1,66	1466,75	1,65	1475,72	1,64	1497,70
	1,57	1465,99	1,55	1522,03	1,58	1476,35
	1,50	1477,03	1,50	1484,19	1,50	1453,27
	1,43	1474,14	1,41	1462,87	1,39	1452,89
	1,35	1440,83	1,31	1492,43	1,29	1478,50
	1,24	1357,65	1,20	1455,87	1,19	1508,87
	1,14	1277,18	1,10	1331,17	1,10	1454,76
	0,99	1141,01	0,99	1222,77	1,00	1353,90
	0,89	1032,02	0,87	1026,38	0,88	1139,12
	0,72	846,38	0,73	774,64	0,74	871,03
	0,53	556,50	0,56	502,70	0,54	524,30
	0,30	241,74	0,38	264,18	0,37	282,03
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela C.8: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,0x10 ⁻²		0,0x10 ⁻²		0,0x10 ⁻²	
f [Hz]	0,00		0,00		0,00	
Γ [-]	0,00		0,00		0,00	
d _s [m]	2,18x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³	
φ [-]	0,0000		0,0000		0,0000	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²	
distribuição	binária		plana		gaussiana	
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)	U _s (m/s)	δp (N/m ²)	U _s (m/s)	δp (N/m ²)
	2,23	379,31	2,21	422,80	2,22	295,99
	2,18	365,76	2,16	383,82	2,18	472,61
	2,10	398,96	2,12	394,77	2,12	395,26
	2,04	339,02	2,06	414,21	2,06	311,44
	1,99	364,93	2,00	434,19	1,99	313,73
	1,93	234,68	1,94	328,97	1,93	405,57
	1,87	197,32	1,84	333,53	1,86	405,46
	1,80	138,93	1,80	343,58	1,79	374,36
	1,72	127,01	1,72	382,18	1,71	391,67
	1,66	118,01	1,65	338,13	1,64	325,16
	1,57	103,48	1,55	324,72	1,58	366,78
	1,50	96,07	1,50	321,36	1,50	330,59
	1,43	94,04	1,41	260,00	1,39	333,75
	1,35	90,52	1,31	176,18	1,29	223,10
	1,24	78,14	1,20	91,16	1,19	140,40
	1,14	76,67	1,10	72,92	1,10	86,16
	0,99	71,50	0,99	71,96	1,00	67,65
	0,89	64,32	0,87	74,10	0,88	71,17
	0,72	69,16	0,73	75,49	0,74	73,40
	0,53	72,16	0,56	77,74	0,54	78,18
	0,30	77,35	0,38	79,63	0,37	77,88
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela C.9: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,3x10 ⁻²		0,3x10 ⁻²		0,3x10 ⁻²	
f [Hz]	12,87		12,87		12,87	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00	
d _s [m]	2,18x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³	
φ [-]	0,0000		0,0000		0,0000	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²	
distribuição	binária		plana		gaussiana	
	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)
	2,23	1386,37	2,24	1352,23	2,23	1382,57
	2,18	1383,03	2,18	1392,66	2,17	1380,96
	2,11	1414,01	2,12	1363,03	2,13	1350,01
	2,06	1374,61	2,05	1383,66	2,05	1359,57
	1,99	1370,07	1,99	1368,79	1,99	1392,87
	1,94	1381,18	1,94	1372,34	1,93	1404,73
	1,87	1409,41	1,86	1411,59	1,88	1359,28
	1,81	1389,18	1,81	1348,84	1,80	1371,04
	1,70	1399,05	1,73	1359,41	1,73	1377,65
	1,65	1385,81	1,64	1384,64	1,64	1392,47
	1,58	1371,99	1,57	1331,98	1,58	1393,52
	1,49	1357,87	1,47	1389,34	1,48	1344,54
	1,38	1382,13	1,42	1306,58	1,39	1325,17
	1,28	1391,75	1,28	1368,88	1,28	1322,32
	1,21	1354,26	1,17	1351,05	1,18	1342,89
	1,10	1313,57	1,08	1347,60	1,07	1345,03
	1,00	964,41	0,98	1343,99	0,98	1334,76
	0,83	856,50	0,85	1021,01	0,87	1328,11
	0,69	699,44	0,68	770,68	0,70	843,90
	0,55	501,89	0,47	517,83	0,47	534,37
	0,38	271,40	0,32	246,54	0,33	257,04
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela C.10: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,3x10 ⁻²		0,3x10 ⁻²		0,3x10 ⁻²	
f [Hz]	12,87		12,87		12,87	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00	
d _s [m]	2,18x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³	
φ [-]	0,0000		0,0000		0,0000	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²	
distribuição	binária		plana		gaussiana	
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)	U _s (m/s)	δp (N/m ²)	U _s (m/s)	δp (N/m ²)
	2,23	590,53	2,24	595,99	2,23	536,19
	2,18	520,94	2,18	499,31	2,17	626,40
	2,11	525,08	2,12	506,76	2,13	555,07
	2,06	530,71	2,05	526,74	2,05	474,44
	1,99	485,54	1,99	572,95	1,99	509,66
	1,94	517,20	1,94	478,25	1,93	486,71
	1,87	502,59	1,86	497,19	1,88	512,29
	1,81	476,85	1,81	480,83	1,80	448,34
	1,70	512,53	1,73	474,85	1,73	415,87
	1,65	452,99	1,64	456,75	1,64	425,86
	1,58	470,94	1,57	462,38	1,58	325,46
	1,49	300,72	1,47	358,19	1,48	384,27
	1,38	254,24	1,42	365,58	1,39	391,20
	1,28	206,51	1,28	264,36	1,28	302,58
	1,21	195,79	1,17	194,51	1,18	182,13
	1,10	160,55	1,08	182,02	1,07	167,96
	1,00	170,15	0,98	149,83	0,98	147,33
	0,83	143,80	0,85	148,21	0,87	130,85
	0,69	151,72	0,68	162,47	0,70	167,83
	0,55	167,75	0,47	178,61	0,47	181,65
	0,38	179,34	0,32	185,41	0,33	182,22
	0,00	168,07	0,00	176,00	0,00	164,40

Tabela C.11: Valores da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,9x10 ⁻²		0,9x10 ⁻²		0,9x10 ⁻²	
f [Hz]	7,43		7,43		7,43	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00	
d _s [m]	2,18x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³	
φ [-]	0,0000		0,0000		0,0000	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²	
distribuição	binária		plana		gaussiana	
	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)
	2,25	1364,11	2,23	1334,49	2,25	1305,58
	2,20	1356,86	2,19	1331,49	2,16	1359,73
	2,16	1331,35	2,14	1313,01	2,12	1356,29
	2,08	1337,37	2,05	1351,27	2,06	1320,71
	2,03	1286,09	2,00	1341,47	2,00	1335,07
	1,96	1314,78	1,95	1280,21	1,94	1304,52
	1,89	1337,91	1,87	1353,10	1,88	1309,25
	1,83	1317,57	1,82	1310,25	1,81	1267,04
	1,76	1269,96	1,74	1296,19	1,73	1275,92
	1,69	1334,93	1,66	1323,07	1,65	1279,01
	1,60	1282,42	1,60	1262,78	1,60	1250,19
	1,53	1284,88	1,52	1228,11	1,52	1277,87
	1,44	1221,94	1,43	1286,43	1,43	1304,49
	1,36	1190,65	1,31	1203,63	1,32	1280,68
	1,23	1198,39	1,24	1143,17	1,25	1101,21
	1,16	1017,84	1,11	1088,87	1,15	1055,51
	1,06	917,30	1,00	993,32	0,98	945,05
	0,94	823,85	0,89	935,60	0,89	889,90
	0,80	669,86	0,75	887,83	0,75	772,76
	0,63	565,50	0,67	706,76	0,60	569,03
	0,48	374,75	0,57	483,50	0,48	381,96
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela C.12: Valores do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,9x10 ⁻²		0,9x10 ⁻²		0,9x10 ⁻²	
f [Hz]	7,43		7,43		7,43	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00	
d _s [m]	2,18x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³	
φ [-]	0,0000		0,0000		0,0000	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²	
distribuição	binária		plana		gaussiana	
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)	U _s (m/s)	δp (N/m ²)	U _s (m/s)	δp (N/m ²)
	2,25	680,21	2,23	583,26	2,25	656,62
	2,20	570,92	2,19	558,48	2,16	536,39
	2,16	600,44	2,14	553,76	2,12	488,72
	2,08	591,25	2,05	543,75	2,06	529,20
	2,03	638,19	2,00	572,26	2,00	459,09
	1,96	627,17	1,95	607,04	1,94	496,02
	1,89	559,07	1,87	513,24	1,88	482,56
	1,83	523,55	1,82	605,84	1,81	599,65
	1,76	615,53	1,74	560,89	1,73	518,33
	1,69	542,19	1,66	530,84	1,65	514,31
	1,60	509,83	1,60	466,14	1,60	556,00
	1,53	489,25	1,52	447,86	1,52	436,33
	1,44	481,24	1,43	405,26	1,43	379,69
	1,36	504,26	1,31	416,99	1,32	322,54
	1,23	266,13	1,24	405,52	1,25	360,74
	1,16	239,94	1,11	247,14	1,15	332,59
	1,06	235,60	1,00	233,95	0,98	243,87
	0,94	235,22	0,89	238,66	0,89	238,25
	0,80	215,78	0,75	252,12	0,75	244,58
	0,63	207,21	0,67	222,00	0,60	257,63
	0,48	206,39	0,57	250,21	0,48	254,36
	0,00	209,46	0,00	197,06	0,00	176,65

Tabela C.13: Valores das réplicas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,0x10 ⁻²		0,0x10 ⁻²		0,0x10 ⁻²	
f [Hz]	0,00		0,00		0,00	
Γ [-]	0,00		0,00		0,00	
d _p [m]	1,28x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³		3,67x10 ⁻³	
φ [-]	0,0000		0,0000		0,0000	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²	
partícula	vidro		vidro		vidro	
	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)
	1,59	1485,44	2,22	1499,90	2,73	1496,67
	1,54	1488,21	2,16	1508,63	2,67	1525,50
	1,47	1487,67	2,12	1499,58	2,65	1473,15
	1,40	1480,39	2,05	1488,04	2,58	1498,50
	1,35	1476,39	1,99	1488,70	2,53	1489,95
	1,29	1459,56	1,93	1497,87	2,47	1480,90
	1,21	1458,10	1,88	1468,94	2,44	1471,81
	1,16	1457,97	1,81	1473,26	2,38	1482,85
	1,09	1409,24	1,73	1457,69	2,34	1460,37
	1,00	1438,85	1,65	1477,38	2,28	1463,51
	0,91	1426,17	1,57	1425,16	2,23	1445,70
	0,81	1412,16	1,50	1429,33	2,15	1473,47
	0,74	1430,51	1,40	1442,78	2,10	1468,92
	0,65	1302,36	1,30	1437,57	2,05	1480,79
	0,45	787,89	1,21	1468,76	1,98	1473,46
	0,29	369,06	1,12	1409,73	1,92	1468,56
	0,00	0,00	1,01	1209,23	1,85	1484,18
			0,89	1015,19	1,77	1478,18
			0,74	728,55	1,69	1445,90
			0,60	489,29	1,64	1400,08
			0,43	285,85	1,56	1311,85
			0,00	0,00	1,49	1217,53
					1,38	1063,56
					1,28	935,90
					1,17	808,46
					1,09	693,80
					0,95	565,87
					0,83	439,42
					0,71	343,40
					0,49	192,41
					0,00	0,00

Tabela C.14: Valores das réplicas do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,0x10 ⁻²		0,0x10 ⁻²		0,0x10 ⁻²	
f [Hz]	0,00		0,00		0,00	
Γ [-]	0,00		0,00		0,00	
d _p [m]	1,28x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³		3,67x10 ⁻³	
φ [-]	0,0000		0,0000		0,0000	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²	
partícula	vidro		vidro		vidro	
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)	U _s (m/s)	δp (N/m ²)	U _s (m/s)	δp (N/m ²)
	1,59	333,82	2,22	372,22	2,73	411,65
	1,54	437,18	2,16	294,25	2,67	356,61
	1,47	417,69	2,12	298,11	2,65	360,20
	1,40	419,19	2,05	325,65	2,58	300,76
	1,35	455,48	1,99	324,23	2,53	353,59
	1,29	397,56	1,93	310,99	2,47	321,54
	1,21	440,17	1,88	356,61	2,44	307,67
	1,16	394,82	1,81	338,85	2,38	273,10
	1,09	379,13	1,73	374,62	2,34	291,40
	1,00	352,84	1,65	299,42	2,28	268,47
	0,91	256,86	1,57	308,67	2,23	250,57
	0,81	186,43	1,50	261,22	2,15	214,13
	0,74	135,73	1,40	201,73	2,10	173,44
	0,65	68,73	1,30	142,81	2,05	146,18
	0,45	74,65	1,21	84,29	1,98	119,69
	0,29	74,51	1,12	70,21	1,92	118,13
	0,00	0,00	1,01	68,97	1,85	91,81
			0,89	73,45	1,77	82,95
			0,74	76,32	1,69	71,97
			0,60	78,17	1,64	69,20
			0,43	77,76	1,56	69,50
			0,00	0,00	1,49	70,93
					1,38	70,75
					1,28	72,06
					1,17	74,14
					1,09	76,27
					0,95	74,99
					0,83	77,37
					0,71	74,56
					0,49	74,50
					0,00	0,00

Tabela C.15: Valores das réplicas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,3x10 ⁻²		0,3x10 ⁻²		0,3x10 ⁻²	
f [Hz]	12,87		12,87		12,87	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00	
d _p [m]	1,28x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³		3,67x10 ⁻³	
φ [-]	0,0000		0,0000		0,0000	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²	
partícula	vidro		vidro		vidro	
	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)
	1,58	1386,57	2,22	1424,20	2,73	1389,67
	1,52	1366,36	2,17	1404,37	2,68	1432,68
	1,48	1379,73	2,12	1368,48	2,63	1441,15
	1,42	1385,61	2,05	1385,65	2,58	1388,10
	1,35	1366,00	2,00	1355,45	2,55	1357,94
	1,29	1367,31	1,92	1403,01	2,47	1363,37
	1,23	1367,48	1,88	1409,67	2,44	1385,90
	1,16	1342,95	1,80	1369,31	2,38	1418,10
	1,07	1365,08	1,75	1359,84	2,33	1367,22
	1,02	1326,20	1,65	1348,38	2,27	1425,75
	0,93	1310,20	1,58	1358,29	2,22	1410,29
	0,83	1327,62	1,47	1337,65	2,16	1396,81
	0,71	1351,07	1,40	1356,44	2,10	1343,04
	0,60	1302,29	1,29	1279,85	2,05	1373,16
	0,44	779,96	1,20	1285,28	1,97	1378,23
	0,29	385,00	1,09	1335,82	1,91	1316,01
	0,00	0,00	1,00	1091,24	1,76	1405,25
			0,85	916,23	1,70	1315,05
			0,72	769,56	1,62	1157,45
			0,57	520,15	1,56	1052,55
			0,39	264,64	1,46	1019,35
			0,00	0,00	1,37	908,99
					1,26	806,79
					1,20	783,03
					1,10	715,15
					0,94	522,81
					0,84	415,65
					0,68	301,18
					0,49	177,18
					0,00	0,00

Tabela C.16: Valores das réplicas do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,3x10 ⁻²		0,3x10 ⁻²		0,3x10 ⁻²	
f [Hz]	12,87		12,87		12,87	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00	
d _p [m]	1,28x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³		3,67x10 ⁻³	
φ [-]	0,0000		0,0000		0,0000	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²	
partícula	vidro		vidro		vidro	
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)	U _s (m/s)	δp (N/m ²)	U _s (m/s)	δp (N/m ²)
	1,58	453,55	2,22	338,27	2,73	333,90
	1,52	430,92	2,17	370,38	2,68	366,02
	1,48	444,41	2,12	426,94	2,63	323,05
	1,42	410,27	2,05	424,62	2,58	343,27
	1,35	438,29	2,00	467,24	2,55	340,35
	1,29	436,25	1,92	371,09	2,47	312,77
	1,23	389,97	1,88	312,74	2,44	296,26
	1,16	409,79	1,80	378,26	2,38	293,95
	1,07	354,79	1,75	358,14	2,33	290,19
	1,02	331,40	1,65	374,09	2,27	189,76
	0,93	268,99	1,58	330,19	2,22	217,19
	0,83	198,87	1,47	282,72	2,16	197,66
	0,71	152,11	1,40	201,81	2,10	192,84
	0,60	151,80	1,29	195,10	2,05	187,71
	0,44	212,68	1,20	156,34	1,97	146,61
	0,29	239,42	1,09	154,22	1,91	151,84
	0,00	236,63	1,00	144,78	1,76	107,88
			0,85	158,08	1,70	116,00
			0,72	175,24	1,62	146,30
			0,57	169,80	1,56	144,92
			0,39	156,91	1,46	129,79
			0,00	139,56	1,37	131,30
					1,26	133,45
					1,20	138,36
					1,10	141,18
					0,94	125,22
					0,84	112,18
					0,68	101,05
					0,49	99,01
					0,00	86,48

Tabela C.17: Valores das réplicas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,9x10 ⁻²		0,9x10 ⁻²		0,9x10 ⁻²	
f [Hz]	7,43		7,43		7,43	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00	
d _p [m]	1,28x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³		3,67x10 ⁻³	
φ [-]	0,0000		0,0000		0,0000	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²	
partícula	vidro		vidro		vidro	
	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)
	1,60	1302,06	2,22	1344,57	2,75	1353,83
	1,56	1329,11	2,17	1324,98	2,70	1352,15
	1,51	1270,60	2,13	1318,53	2,65	1392,09
	1,46	1273,03	2,08	1294,79	2,61	1343,63
	1,40	1291,67	2,00	1357,80	2,58	1281,10
	1,36	1263,30	1,95	1330,76	2,50	1335,14
	1,27	1267,17	1,87	1299,34	2,46	1371,61
	1,21	1268,48	1,80	1340,98	2,43	1362,90
	1,12	1236,32	1,77	1288,59	2,36	1339,73
	1,08	1160,34	1,70	1306,54	2,31	1357,97
	0,99	1186,70	1,66	1290,59	2,26	1320,97
	0,89	1206,42	1,60	1293,91	2,20	1334,00
	0,78	1225,22	1,52	1323,46	2,10	1358,14
	0,71	1200,51	1,46	1275,15	2,07	1359,43
	0,54	935,01	1,34	1291,24	2,03	1301,28
	0,41	554,89	1,25	1241,00	1,95	1098,04
	0,00	0,00	1,15	1065,75	1,89	1188,88
			1,02	940,26	1,81	1067,95
			0,91	861,37	1,75	1018,95
			0,78	674,34	1,68	984,74
			0,62	439,09	1,61	978,66
			0,43	250,24	1,52	927,79
			0,00	0,00	1,45	896,39
					1,34	828,74
					1,25	712,21
					1,18	642,43
					1,02	494,86
					0,90	409,14
					0,79	344,79
					0,58	209,10
					0,45	127,57
					0,00	0,00

Tabela C.18: Valores das réplicas do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,9x10 ⁻²		0,9x10 ⁻²		0,9x10 ⁻²	
f [Hz]	7,43		7,43		7,43	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00	
d _p [m]	1,28x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³		3,67x10 ⁻³	
φ [-]	0,0000		0,0000		0,0000	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²	
partícula	vidro		vidro		vidro	
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)	U _s (m/s)	δp (N/m ²)	U _s (m/s)	δp (N/m ²)
	1,60	483,89	2,22	569,46	2,75	507,27
	1,56	558,18	2,17	468,67	2,70	475,13
	1,51	530,95	2,13	548,80	2,65	364,87
	1,46	537,52	2,08	487,29	2,61	381,82
	1,40	497,09	2,00	482,84	2,58	472,17
	1,36	500,36	1,95	462,29	2,50	376,30
	1,27	533,26	1,87	432,49	2,46	333,74
	1,21	506,61	1,80	382,90	2,43	320,78
	1,12	465,09	1,77	451,72	2,36	322,07
	1,08	450,31	1,70	374,87	2,31	334,42
	0,99	395,48	1,66	412,33	2,26	317,22
	0,89	323,08	1,60	367,17	2,20	298,75
	0,78	270,00	1,52	336,15	2,10	271,89
	0,71	231,82	1,46	341,67	2,07	261,75
	0,54	285,92	1,34	276,98	2,03	277,41
	0,41	275,27	1,25	269,23	1,95	286,70
	0,00	288,95	1,15	255,97	1,89	266,25
			1,02	243,01	1,81	243,51
			0,91	253,97	1,75	231,19
			0,78	239,54	1,68	218,45
			0,62	231,72	1,61	221,48
			0,43	209,69	1,52	223,68
			0,00	151,35	1,45	225,34
					1,34	231,73
					1,25	222,00
					1,18	219,74
					1,02	199,76
					0,90	186,92
					0,79	164,86
					0,58	138,05
					0,45	129,35
					0,00	105,00

Tabela C.19: Valores das réplicas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,0x10 ⁻²		0,0x10 ⁻²		0,0x10 ⁻²	
f [Hz]	0,00		0,00		0,00	
Γ [-]	0,00		0,00		0,00	
d _s [m]	2,18x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³	
φ [-]	0,0000		0,0000		0,0000	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²	
distribuição	binária		plana		gaussiana	
	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)
	2,22	1492,15	2,22	1506,55	2,22	1517,33
	2,16	1496,17	2,16	1499,93	2,17	1506,04
	2,11	1484,37	2,11	1483,33	2,12	1479,77
	2,06	1458,97	2,05	1509,19	2,05	1480,21
	1,99	1476,23	1,99	1512,46	1,98	1534,17
	1,93	1477,06	1,93	1465,71	1,93	1520,61
	1,86	1466,81	1,87	1496,09	1,87	1506,04
	1,78	1474,10	1,80	1518,85	1,78	1515,47
	1,72	1466,13	1,73	1508,09	1,73	1477,74
	1,63	1465,75	1,65	1482,92	1,66	1470,63
	1,58	1459,39	1,57	1474,47	1,55	1487,59
	1,50	1466,25	1,48	1500,53	1,49	1469,26
	1,43	1458,86	1,40	1501,82	1,40	1448,08
	1,35	1439,97	1,32	1490,43	1,29	1474,93
	1,25	1351,56	1,20	1466,91	1,20	1486,37
	1,14	1257,35	1,10	1377,47	1,13	1467,67
	1,00	1133,75	0,99	1212,28	1,01	1386,87
	0,86	1023,74	0,85	972,26	0,89	1172,28
	0,69	809,73	0,69	720,76	0,71	825,19
	0,51	542,13	0,55	505,64	0,51	493,67
	0,33	273,34	0,36	259,48	0,30	239,08
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela C.20: Valores das réplicas do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,0x10 ⁻²		0,0x10 ⁻²		0,0x10 ⁻²	
f [Hz]	0,00		0,00		0,00	
Γ [-]	0,00		0,00		0,00	
d _s [m]	2,18x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³	
φ [-]	0,0000		0,0000		0,0000	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²	
distribuição	binária		plana		gaussiana	
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)	U _s (m/s)	δp (N/m ²)	U _s (m/s)	δp (N/m ²)
	2,22	313,20	2,22	438,43	2,22	412,85
	2,16	398,91	2,16	342,29	2,17	399,59
	2,11	310,22	2,11	389,52	2,12	292,23
	2,06	327,72	2,05	336,07	2,05	453,87
	1,99	310,13	1,99	450,04	1,98	372,94
	1,93	237,97	1,93	328,64	1,93	385,19
	1,86	189,97	1,87	400,21	1,87	375,47
	1,78	168,35	1,80	398,76	1,78	370,18
	1,72	120,22	1,73	419,40	1,73	348,61
	1,63	129,76	1,65	405,04	1,66	343,90
	1,58	112,18	1,57	351,36	1,55	357,21
	1,50	99,45	1,48	266,28	1,49	300,83
	1,43	91,57	1,40	269,16	1,40	366,44
	1,35	88,49	1,32	140,31	1,29	218,72
	1,25	82,91	1,20	92,86	1,20	126,51
	1,14	75,38	1,10	74,01	1,13	100,29
	1,00	69,18	0,99	70,24	1,01	71,37
	0,86	64,84	0,85	75,02	0,89	72,80
	0,69	68,34	0,69	75,89	0,71	75,29
	0,51	73,01	0,55	77,30	0,51	79,03
	0,33	76,72	0,36	78,06	0,30	78,92
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela C.21: Valores das réplicas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,3x10 ⁻²		0,3x10 ⁻²		0,3x10 ⁻²	
f [Hz]	12,87		12,87		12,87	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00	
d _s [m]	2,18x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³	
φ [-]	0,0000		0,0000		0,0000	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²	
distribuição	binária		plana		gaussiana	
	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)
	2,23	1383,66	2,21	1385,40	2,23	1390,06
	2,18	1373,61	2,18	1385,81	2,16	1379,38
	2,10	1396,17	2,13	1360,78	2,11	1370,63
	2,07	1382,94	2,08	1356,12	2,07	1358,19
	1,98	1405,10	2,00	1380,42	2,00	1395,94
	1,93	1376,55	1,93	1380,90	1,92	1411,56
	1,86	1386,42	1,86	1389,95	1,88	1368,70
	1,79	1363,86	1,80	1377,41	1,79	1352,61
	1,72	1356,65	1,73	1371,41	1,72	1333,63
	1,64	1360,89	1,63	1391,34	1,64	1382,11
	1,58	1357,94	1,56	1382,44	1,55	1390,97
	1,48	1372,66	1,47	1363,43	1,48	1330,18
	1,41	1313,80	1,37	1372,00	1,39	1323,63
	1,30	1380,38	1,29	1337,97	1,29	1340,73
	1,19	1376,18	1,19	1371,19	1,19	1320,14
	1,09	1239,12	1,11	1341,46	1,09	1272,49
	1,01	1050,45	0,99	1347,39	1,00	1240,30
	0,83	926,51	0,86	976,76	0,87	1225,61
	0,68	654,17	0,67	761,92	0,72	873,49
	0,45	398,92	0,53	545,11	0,51	597,70
	0,33	250,72	0,38	295,36	0,37	299,45
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela C.22: Valores das réplicas do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,3x10 ⁻²		0,3x10 ⁻²		0,3x10 ⁻²	
f [Hz]	12,87		12,87		12,87	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00	
d _s [m]	2,18x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³	
φ [-]	0,0000		0,0000		0,0000	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²	
distribuição	binária		plana		gaussiana	
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)	U _s (m/s)	δp (N/m ²)	U _s (m/s)	δp (N/m ²)
	2,23	594,17	2,21	513,65	2,23	493,77
	2,18	509,08	2,18	566,47	2,16	480,18
	2,10	510,90	2,13	573,02	2,11	515,99
	2,07	524,99	2,08	447,79	2,07	553,01
	1,98	510,94	2,00	547,51	2,00	464,37
	1,93	520,86	1,93	451,77	1,92	464,08
	1,86	481,19	1,86	413,90	1,88	460,14
	1,79	428,51	1,80	530,47	1,79	416,58
	1,72	469,66	1,73	501,62	1,72	495,95
	1,64	447,56	1,63	388,65	1,64	435,55
	1,58	423,86	1,56	379,74	1,55	319,89
	1,48	349,69	1,47	418,95	1,48	378,93
	1,41	356,18	1,37	423,81	1,39	389,68
	1,30	221,35	1,29	345,42	1,29	318,19
	1,19	153,26	1,19	204,13	1,19	265,51
	1,09	153,61	1,11	198,45	1,09	177,13
	1,01	146,92	0,99	137,50	1,00	165,31
	0,83	136,10	0,86	157,32	0,87	130,57
	0,68	156,10	0,67	162,35	0,72	161,93
	0,45	170,26	0,53	164,77	0,51	191,08
	0,33	179,44	0,38	180,55	0,37	186,30
	0,00	153,29	0,00	169,81	0,00	170,81

Tabela C.23: Valores das réplicas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,9x10 ⁻²		0,9x10 ⁻²		0,9x10 ⁻²	
f [Hz]	7,43		7,43		7,43	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00	
d _s [m]	2,18x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³	
φ [-]	0,0000		0,0000		0,0000	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²	
distribuição	binária		plana		gaussiana	
	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)	U _s (m/s)	Δp (N/m ²)
	2,25	1330,01	2,24	1322,47	2,23	1279,18
	2,21	1326,10	2,20	1321,14	2,21	1312,20
	2,15	1324,48	2,13	1332,49	2,11	1319,92
	2,09	1319,37	2,07	1301,11	2,06	1327,13
	2,02	1323,09	2,00	1280,98	1,99	1305,54
	1,97	1299,31	1,93	1282,14	1,92	1312,82
	1,92	1318,90	1,89	1310,58	1,87	1296,86
	1,89	1272,82	1,81	1302,85	1,83	1266,76
	1,81	1330,03	1,75	1300,79	1,71	1357,02
	1,76	1304,93	1,66	1336,50	1,67	1307,18
	1,69	1265,32	1,59	1312,05	1,60	1302,75
	1,62	1295,08	1,50	1278,90	1,50	1273,02
	1,55	1236,14	1,43	1242,09	1,45	1206,41
	1,44	1245,36	1,33	1253,20	1,35	1258,78
	1,35	1238,05	1,25	1100,52	1,24	1130,85
	1,27	1241,68	1,17	1109,28	1,10	1152,54
	1,18	1105,06	1,03	1089,23	1,03	985,31
	1,04	928,76	0,90	1008,66	0,88	863,56
	0,96	834,90	0,75	910,31	0,75	769,87
	0,79	695,32	0,60	613,11	0,62	603,35
	0,63	560,32	0,48	419,95	0,50	432,91
	0,46	343,23	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00				

Tabela C.24 Valores das réplicas do desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar.

A [m]	0,9x10 ⁻²		0,9x10 ⁻²		0,9x10 ⁻²	
f [Hz]	7,43		7,43		7,43	
Γ [-]	2,00		2,00		2,00	
d _s [m]	2,18x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³		2,18x10 ⁻³	
φ [-]	0,0000		0,0000		0,0000	
H ₀ [m]	10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²		10,0x10 ⁻²	
distribuição	binária		plana		gaussiana	
	U _s (m/s)	δp (N/m ²)	U _s (m/s)	δp (N/m ²)	U _s (m/s)	δp (N/m ²)
	2,25	619,87	2,24	632,26	2,23	627,32
	2,21	619,66	2,20	554,62	2,21	644,39
	2,15	589,79	2,13	579,46	2,11	545,14
	2,09	624,76	2,07	631,96	2,06	602,55
	2,02	598,89	2,00	579,78	1,99	521,31
	1,97	658,14	1,93	563,21	1,92	504,93
	1,92	587,50	1,89	584,43	1,87	507,61
	1,89	672,00	1,81	552,89	1,83	486,61
	1,81	658,91	1,75	423,82	1,71	536,31
	1,76	586,66	1,66	518,58	1,67	500,65
	1,69	547,54	1,59	507,33	1,60	499,80
	1,62	542,19	1,50	468,92	1,50	443,46
	1,55	490,51	1,43	450,21	1,45	424,45
	1,44	470,16	1,33	377,23	1,35	365,31
	1,35	386,26	1,25	421,10	1,24	358,67
	1,27	320,41	1,17	322,54	1,10	256,20
	1,18	243,14	1,03	270,59	1,03	252,98
	1,04	237,00	0,90	260,58	0,88	246,69
	0,96	236,86	0,75	251,90	0,75	242,60
	0,79	214,02	0,60	234,97	0,62	266,08
	0,63	213,23	0,48	239,58	0,50	261,54
	0,46	211,96	0,00	194,45	0,00	171,82
	0,00	199,77				

REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA FRAÇÃO MÁSSICA EM FUNÇÃO DO TAMANHO DA PARTÍCULA, PARA AS DISTRIBUIÇÕES.

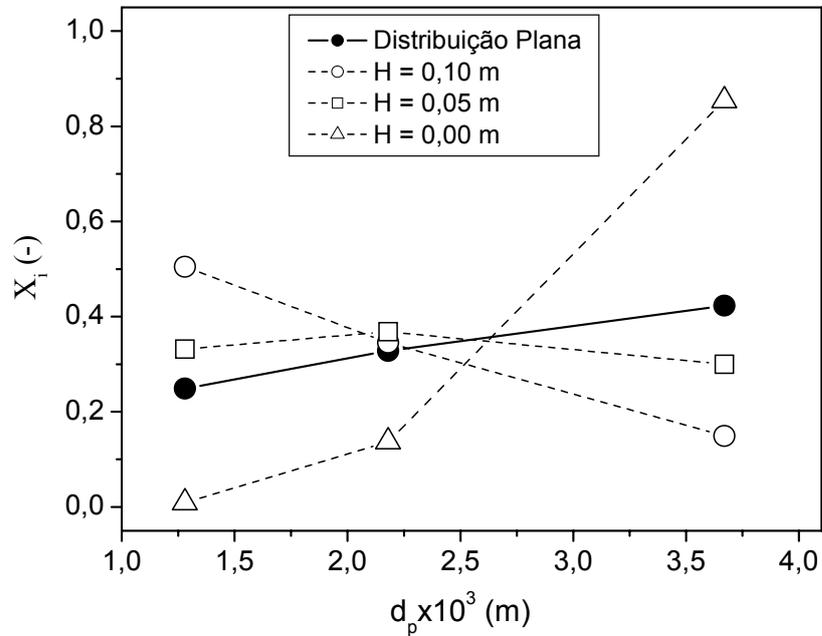


Figura C.1: X_i em função de d_p ; leito fluidizado; $\Gamma = 0,00$; $\varepsilon = 0,52$.

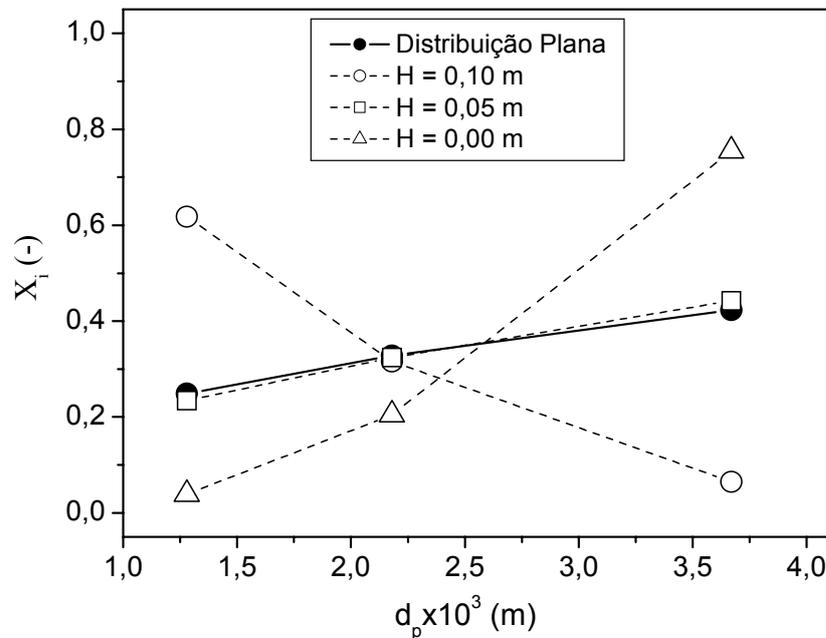


Figura C.2: X_i em função de d_p ; leito vibrofluidizado; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,003 \text{ m}$; $f = 12,87 \text{ Hz}$; $\varepsilon = 0,45$.

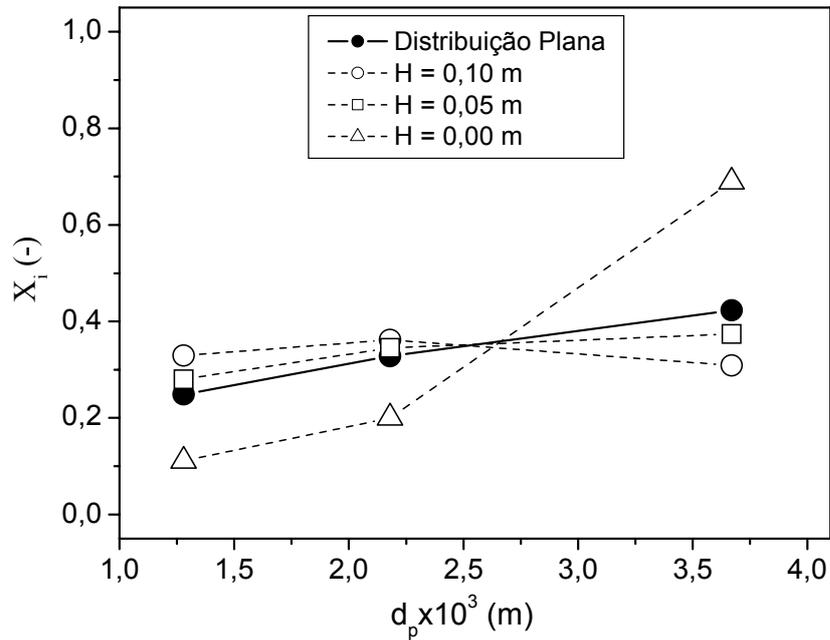


Figura C.3: X_i em função de d_p ; leito vibrofluidizado; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,009$ m; $f = 7,43$ Hz; $\varepsilon = 0,57$.

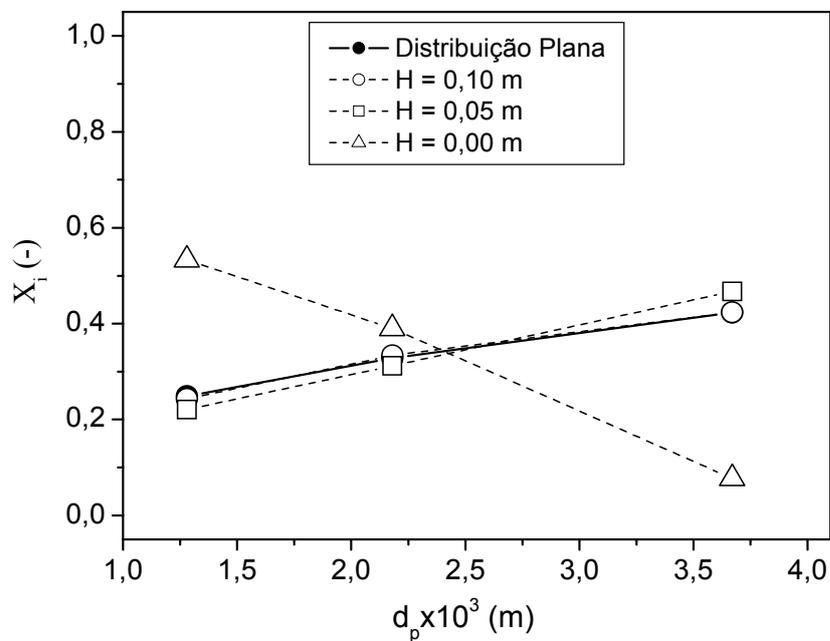


Figura C.4: X_i em função de d_p ; leito vibrado; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,003$ m; $f = 12,87$ Hz; $\varepsilon = 0,43$.

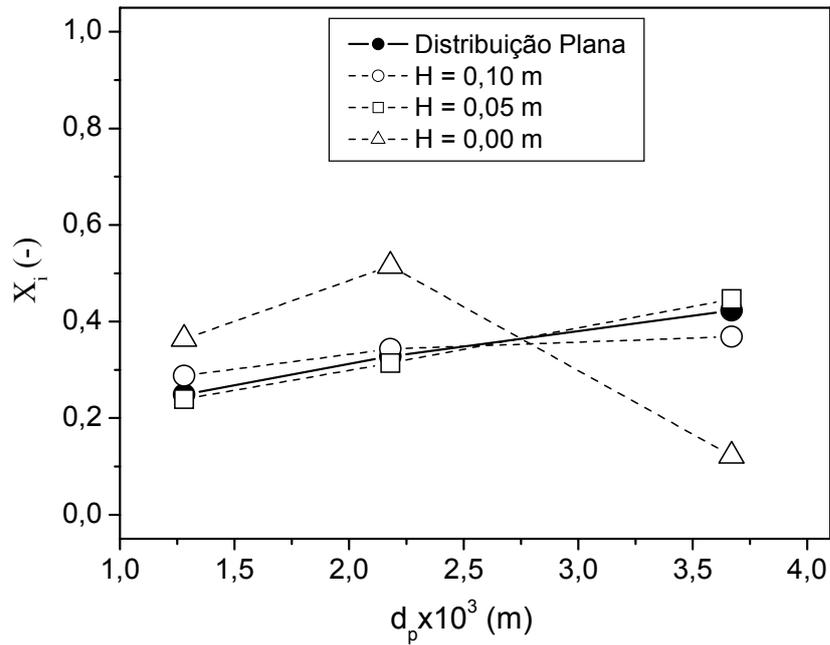


Figura C.5: X_i em função de d_p ; leito vibrado; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,009 \text{ m}$; $f = 7,43 \text{ Hz}$; $\varepsilon = 0,48$.

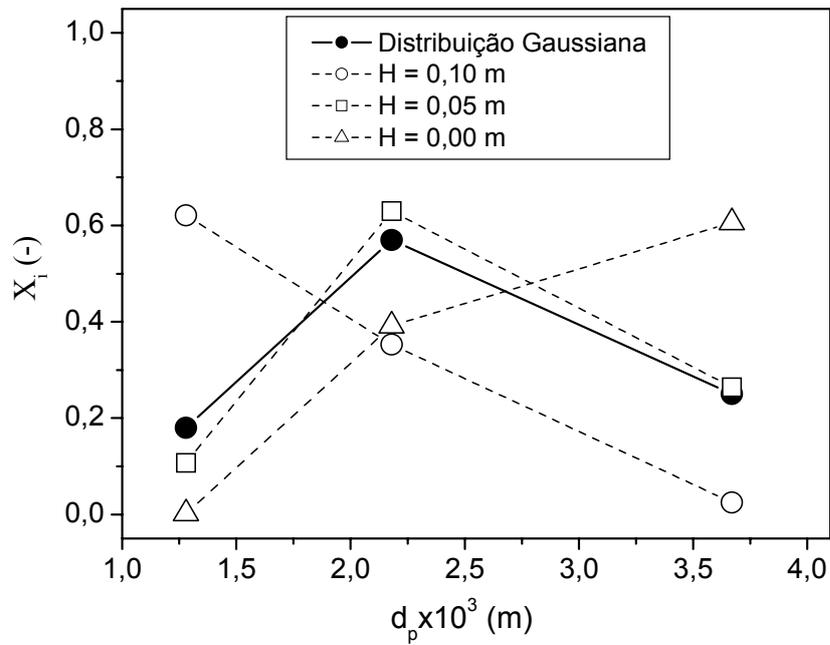


Figura C.6: X_i em função de d_p ; leito fluidizado; $\Gamma = 0,00$; $\varepsilon = 0,48$.

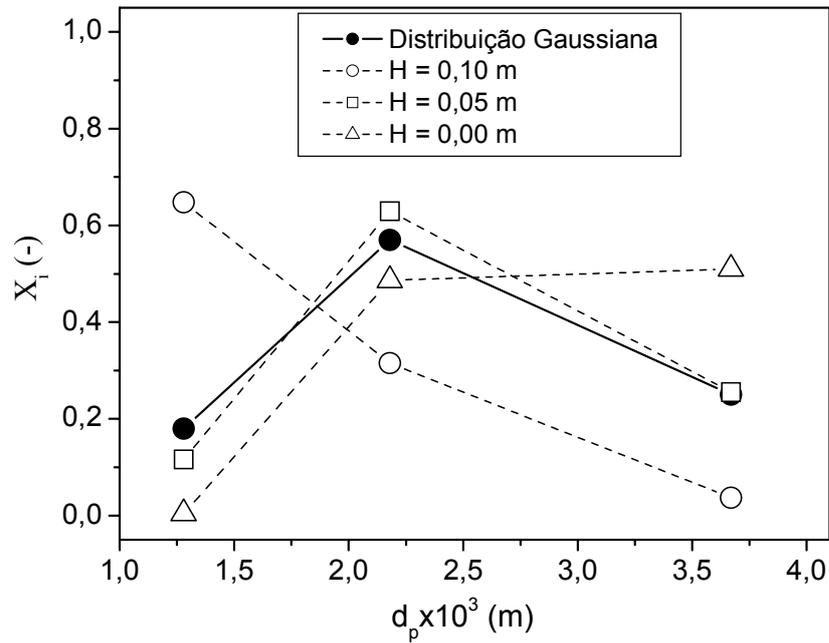


Figura C.7: X_i em função de d_p ; leito vibrofluidizado; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,003$ m; $f = 12,87$ Hz; $\varepsilon = 0,40$.

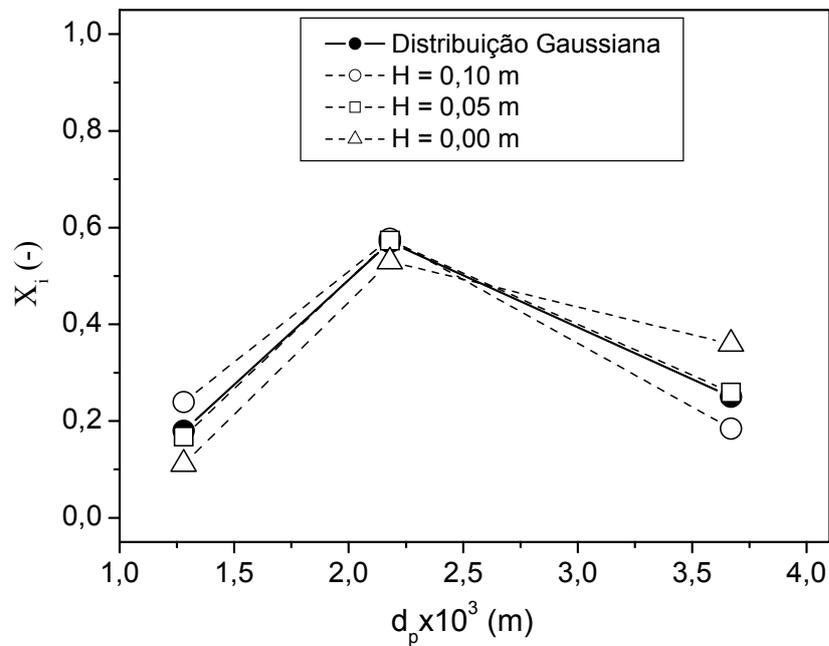


Figura C.8: X_i em função de d_p ; leito vibrofluidizado; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,009$ m; $f = 7,43$ Hz; $\varepsilon = 0,60$.

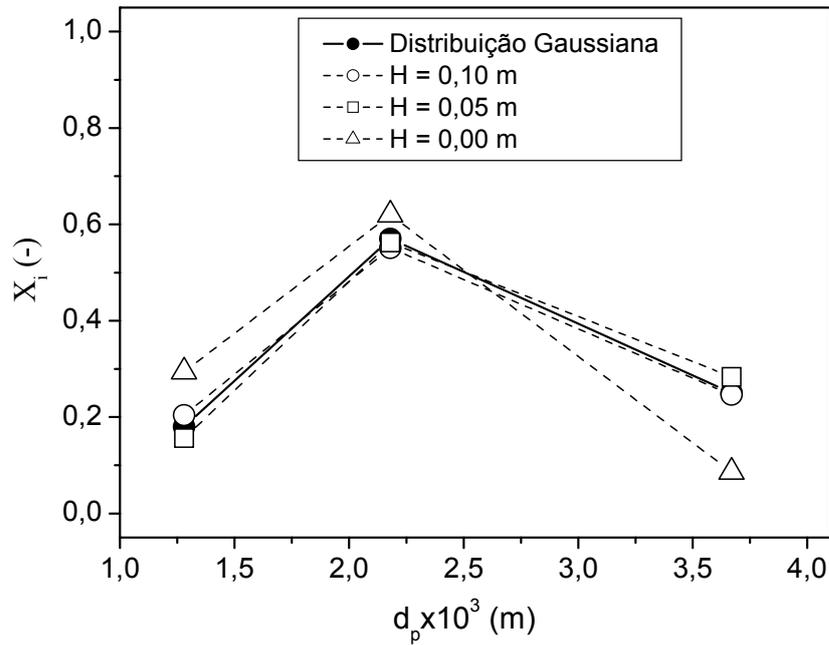


Figura C.9: X_i em função de d_p ; leito vibrado; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,003$ m; $f = 12,87$ Hz; $\varepsilon = 0,43$.

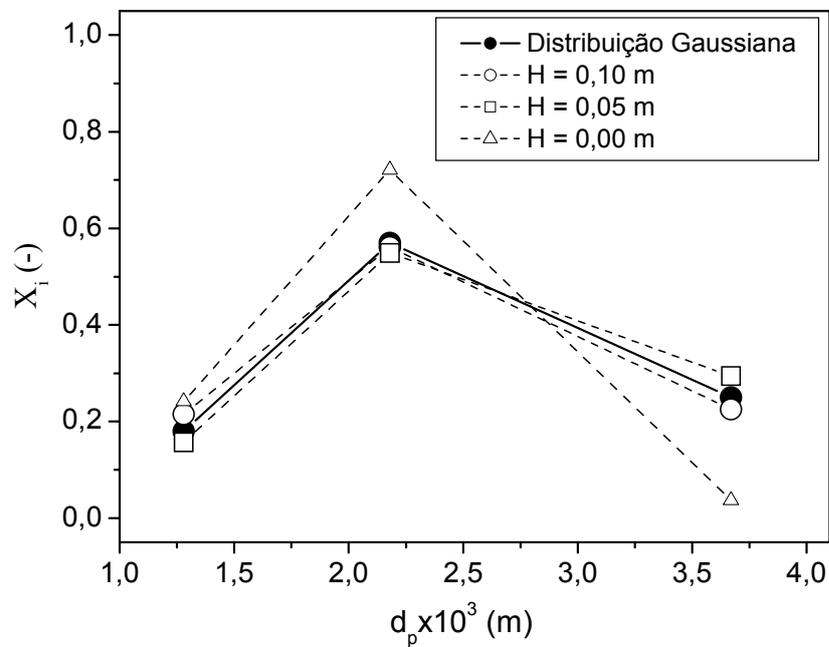


Figura C.10: X_i em função de d_p ; leito vibrado; $\Gamma = 2,00$; $A = 0,009$ m; $f = 7,43$ Hz; $\varepsilon = 0,48$.