

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

**ANÁLISE DA PRESENÇA DO  
GLICEROL NO COMPORTAMENTO  
FLUIDODINÂMICO DE LEITOS  
FLUIDIZADO E VIBROFLUIDIZADO**

ROGER VALERI DALEFFE

Dissertação de Mestrado 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 Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

**Orientador: Prof. Dr. José Teixeira Freire**

SÃO CARLOS - SP  
2002

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

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| D139ap                             | <p>Daleffe, Roger Valeri.<br/>Análise da presença do glicerol no comportamento<br/>fluidodinâmico de leitos fluidizado e vibrofluidizado / Roger<br/>Valeri Daleffe. -- São Carlos : UFSCar, 2004.<br/>205 p.</p> <p>Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São<br/>Carlos, 2002.</p> <p>1. Fluidização. 2. Leito vibrofluidizado. 3. Fluidodinâmica.<br/>4. Glicerol. 5. Secagem de pastas. 6. Velocidade mínima de<br/>fluidização. I. Título</p> |
| CDD: 660.284292 (20 <sup>a</sup> ) |  |

**“A mente que se abre a uma nova idéia  
jamais voltará ao seu tamanho original”**

*Albert Einstein*

Dedico este trabalho ao  
meu pai Vilmar, ao meu  
irmão Sandrigo, ao meu  
filho Renan e a minha

querida avó Líbia (in  
memoriam).

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. José Teixeira Freire por sua orientação durante o desenvolvimento desse trabalho, pelo imenso carinho e amizade e pelas oportunidades de crescimento profissional e pessoal.

À minha família e em especial ao meu pai pelo amor incondicional, apoio e exemplo de vida e ao meu filho que espero que um dia compreenda estes momentos de ausência.

A Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Ana Maria da Silveira pelas contribuições, sugestões e correções que enriqueceram este trabalho.

Aos Profs. Dr<sup>ª</sup>. Maria do Carmo Ferreira, Dr. Ronaldo Guimarães Corrêa e Dr. Dermeval José Mazzini Sartori pelos conselhos e pela amizade.

A Célio Fernando dos Santos Camargo pelo auxílio e conhecimentos técnicos em leitos vibrofluidizados que contribuíram para esta pesquisa.

Ao técnico mecânico Oscar da Silva por ajudar na construção e reparo do equipamento e a técnica química Alzira de Andrade Gonzalez pelo apoio prestado.

Aos funcionários do DEQ/UFSCar.

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

Aos meus amigos da Igreja Presbiteriana de São Carlos pelos momentos inesquecíveis que passamos juntos, pelo apoio espiritual e pela amizade.

Aos meus grandes amigos Lissandra Xavier Ito, Salete Martins Alves, Maria Carolina Ribeiro Falaguasta, Sônia Maria de Lima e Euclides Ilmo José Braun, com os quais dividi as alegrias e as dificuldades passadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos companheiros de república, Dárley Carijo Mello, Eliezer Ladeia Gomes, Robson Pablo Sobradie! Peguin e Werley Ribeiro Martins, que me apoiaram e compartilharam todas as minhas experiências.

Ao CNPq e ao PRONEX/FINEP pelo suporte financeiro que viabilizaram a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

|   |      |
|---|------|
| <u>AGRADECIMENTOS</u> .....   | i    |
| <u>SUMÁRIO</u> .....  | iii  |
| <u>ÍNDICE DE FIGURAS</u> .....  | vi   |
| <u>ÍNDICE DE TABELAS</u> .....  | xvi  |
| <u>NOMENCLATURA</u> .....   | xxi  |
| <u>RESUMO</u> .....   | xxiv |
| <u>ABSTRACT</u> .....   | xxvi |
| <u>1 INTRODUÇÃO</u> .....   | 1    |
| <u>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u> .....  | 4    |
| <u>2.1 Leito Vibrofluidizado</u> .....  | 4    |
| <u>2.1.1 Parâmetro vibracional</u> .....  | 5    |
| <u>2.1.2 Regimes de operação</u> .....  | 6    |
| <u>2.2 Propriedades Fluidodinâmicas de Leitos Vibrofluidizados</u> .....            | 7    |
| <u>2.2.1 Velocidade mínima de fluidização e velocidade mínima de mistura</u> .      | 10   |
| <u>2.2.2 Perda de carga em torno da velocidade mínima de vibrofluidização</u> ..... | 16   |
| <u>2.2.3 Curvas de desvio padrão das medidas de queda de pressão</u> .....          | 18   |
| <u>2.2.4 Porosidade</u> .....   | 21   |
| <u>2.3 Classificação das Partículas</u> .....                                       | 23   |

|   |           |
|---|-----------|
| <a href="#">2.4 Secagem de Pastas</a>   | 26        |
| <a href="#">2.5 Secagem em Leito Vibrofluidizado</a>  | 29        |
| <a href="#">2.5.1 Secagem de pastas em leito vibrofluidizado</a>  | 30        |
| <a href="#">2.6 Influência do Glicerol no Comportamento do Leito de Jorro</a>                                   | 37        |
| <b><a href="#">3 MATERIAIS E MÉTODOS</a></b>  | <b>49</b> |
| <a href="#">3.1 Materiais</a>   | 49        |
| <a href="#">3.1.1 Partículas</a>  | 49        |
| <a href="#">3.1.2 Pasta</a>   | 50        |
| <a href="#">3.2 Equipamentos</a>  | 51        |
| <a href="#">3.3 Metodologia Experimental</a>  | 55        |
| <b><a href="#">4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</a></b>  | <b>60</b> |
| <a href="#">4.1 Reprodutividade das Curvas Características e de Desvio Padrão</a>                               | 60        |
| <a href="#">4.2 Análise da Fluidodinâmica dos Leitos Fluidizado e Vibrofluidizado</a>                           | 67        |
| <a href="#">4.2.1 Efeito da temperatura</a>   | 68        |
| <a href="#">4.2.2 Efeito do diâmetro das partículas inertes</a>   | 75        |
| <a href="#">4.2.3 Efeito do parâmetro vibracional</a>   | 80        |
| <a href="#">4.2.4 Efeito do grau de saturação de líquido</a>  | 85        |
| <a href="#">4.3 Análise da Fluidodinâmica Através do Desvio Padrão das Medidas de Queda de Pressão no Leito</a> | 91        |
| <a href="#">4.3.1 Efeito da temperatura</a>   | 91        |
| <a href="#">4.3.2 Efeito do diâmetro das partículas inertes</a>   | 95        |
| <a href="#">4.3.3 Efeito do parâmetro vibracional</a>   | 102       |
| <a href="#">4.3.4 Efeito do grau de saturação de líquido</a>  | 107       |

|   |            |
|---|------------|
| <u>4.4 Velocidade Mínima de Fluidização e Velocidade Mínima de Mistura</u> ....   | 112        |
| <u>4.4.1 Efeito da temperatura</u> .....  | 122        |
| <u>4.4.2 Efeito do parâmetro vibracional</u> .....  | 126        |
| <u>4.4.2 Efeito da saturação de glicerol</u> .....  | 129        |
| <b><u>5 CONCLUSÕES</u></b> .....  | <b>135</b> |
| <u>5.1 Fluidodinâmica</u> .....   | 135        |
| <u>5.2 Desvio Padrão da Queda de Pressão</u> .....  | 138        |
| <u>5.3 Velocidade Mínima de Fluidização e Velocidade Mínima de Mistura</u> ....   | 142        |
| <b><u>6 SUGESTÕES</u></b> .....   | <b>146</b> |
| <b><u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u></b> .....  | <b>148</b> |
| <b><u>APÊNDICE A - DADOS EXPERIMENTAIS PARA A ANÁLISE DA REPRODUTIVIDADE DA QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO E DO SEU DESVIO PADRÃO PARA CADA VELOCIDADE SUPERFICIAL DO AR</u></b> ..... | <b>157</b> |
| <b><u>APÊNDICE B - VALORES OBTIDOS PARA A VELOCIDADE MÍNIMA DE FLUIDIZAÇÃO E A VELOCIDADE MÍNIMA DE MISTURA</u></b> .....   | <b>160</b> |
| <b><u>APÊNDICE C - DADOS EXPERIMENTAIS DA QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO E DO SEU DESVIO PADRÃO EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE SUPERFICIAL DO AR</u></b> .....                                | <b>163</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b><u>Figura 2.1:</u></b> Tipos de curvas características: (a) leito fluidizado; (b,c,d) leito vibrofluidizado; (Strumillo e Pakowski, 1980).....   | 8  |
| <b><u>Figura 2.2:</u></b> Curvas características de vibrofluidização parametrizadas na altura do leito; esferas de vidro; $d_p = 0,7 \times 10^{-3}$ m; $f = 10$ Hz; $A = 1,98 \times 10^{-2}$ m; (Camargo, 1998).....  | 9  |
| <b><u>Figura 2.3:</u></b> Curva de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar para o leito fluidizado.....   | 11 |
| <b><u>Figura 2.4:</u></b> $U_{mvf}/U_{mf}$ em função do parâmetro vibracional parametrizado em altura de leito estático; inertes de polietileno; $d_p = 3,11 \times 10^{-3}$ m; $A = 4,25 \times 10^{-3}$ m; (Gupta e Mujumdar, 1980a).....   | 12 |
| <b><u>Figura 2.5:</u></b> $U_{mm}/U_{mf}$ obtida pela Equação 3, parametrizado no tipo de partícula; (Gupta e Mujumdar, 1980a).....   | 13 |
| <b><u>Figura 2.6:</u></b> Desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, parametrizado em $\Gamma$ ; esferas de vidro; $A = 1,95 \times 10^{-3}$ m; $d_p = 1,10 \times 10^{-3}$ m; $H_0 = 0,09$ m; (Garim, 1998).....                              | 20 |
| <b><u>Figura 2.7:</u></b> Desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado em $\Gamma$ ; $H_0 = 7,0 \times 10^{-2}$ m; Camargo e Freire (2002): $d_p = 2,6 \times 10^{-3}$ m; Garim e Freire (1998): $d_p = 1,10 \times 10^{-3}$ m..... | 20 |
| <b><u>Figura 2.8:</u></b> Porosidade do leito em função do $\Gamma$ parametrizado na frequência de vibração; areia de quartzo; (Chlenov e Mikhailov, 1965).....   | 22 |

|   |    |
|---|----|
| <b><u>Figura 2.9:</u></b> Diagrama de Geldart para classificação de partículas para o ar em condições ambientes; (Geldart, 1973).....   | 25 |
| <b><u>Figura 2.10:</u></b> $(U_{mvf})_u/(U_{mvf})_s$ em função da saturação de água no leito parametrizada em A; (Chevilenko <i>et al.</i> , 1979).....   | 30 |
| <b><u>Figura 2.11:</u></b> $\Delta p$ em função de $U_s$ parametrizado em $\Gamma$ ; esferas de vidro; $d_p = 3,53 \times 10^{-2}$ m; $H_0 = 0,095$ m; $\phi = 0,003$ ; (Malhotra <i>et al.</i> , 1984).....        | 36 |
| <b><u>Figura 2.12:</u></b> $\Delta p$ em função de $U_s$ parametrizado em $\Gamma$ ; esferas de vidro; $d_p = 6,67 \times 10^{-2}$ m; $H_0 = 0,095$ m; $\phi = 0,003$ ; (Malhotra <i>et al.</i> , 1984).....        | 36 |
| <b><u>Figura 2.13:</u></b> $\Delta p$ em função de $U_s$ parametrizado em $\Gamma$ ; esferas de vidro; $d_p = 3,53 \times 10^{-2}$ m; $H_0 = 0,095$ m; $\phi = 0,006$ ; (Malhotra <i>et al.</i> , 1984).....        | 37 |
| <b><u>Figura 2.14:</u></b> Queda de pressão em jorro estável em função do volume de glicerol alimentado no leito, parametrizado na temperatura; esferas de vidro; $H_0 = 0,15$ m; (Patel <i>et al.</i> , 1986)..... | 39 |
| <b><u>Figura 2.15:</u></b> Velocidade mínima de jorro em função da temperatura parametrizado no volume de glicerol alimentado no leito; PVC; $H_0 = 0,15$ m; (Patel <i>et al.</i> , 1986).....                      | 40 |
| <b><u>Figura 2.16:</u></b> Velocidade mínima de jorro em função do volume de glicerol alimentado no leito parametrizado na temperatura; PVC; $H_0 = 0,15$ m; (Patel <i>et al.</i> , 1986).....                      | 41 |
| <b><u>Figura 2.17:</u></b> Velocidade do ar na região de jorro em função do percentual de líquido parametrizado no tipo de fluido e na temperatura; (Patel <i>et al.</i> , 1986).....                               | 42 |

|   |    |
|---|----|
| <b><u>Figura 2.18</u></b> <u>Queda de pressão no leito para altura na fonte de 0,10 m em função da viscosidade do líquido alimentado parametrizado no conteúdo líquido (<math>V_I/V_T</math>) e tipo de partícula inerte; símbolo cheio: PVC; <math>H_0 = 0,25</math> m; símbolo vazado: esferas de vidro, <math>H_0 = 0,14</math> m; (Schneider e Bridgwater, 1993).</u> | 44 |
| <b><u>Figura 2.19:</u></b> <u>Queda de pressão em jorro estável em função do grau de saturação no leito para o glicerol; esferas de vidro; <math>d_p = 2,6 \times 10^{-3}</math> m; (Spitzner Neto, 2001).</u>  | 47 |
| <b><u>Figura 2.20:</u></b> <u>Velocidade mínima de jorro em função do grau de saturação no leito para o glicerol; esferas de vidro; <math>d_p = 2,6 \times 10^{-3}</math> m; (Spitzner Neto, 2001).</u>   | 47 |
| <b><u>Figura 3.1:</u></b> <u>Esquema geral do secador de leito vibrofluidizado.</u>   | 55 |
| <b><u>Figura 4.1:</u></b> <u>Réplica da curva de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar; <math>\Gamma = 0,00</math>; <math>\phi = 0,0000</math>.</u>   | 62 |
| <b><u>Figura 4.2:</u></b> <u>Réplica da curva de desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar; <math>\Gamma = 0,00</math>; <math>\phi = 0,0000</math>.</u>  | 62 |
| <b><u>Figura 4.3:</u></b> <u>Réplica da curva de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar; <math>\Gamma = 1,00</math>; <math>\phi = 0,0000</math>.</u>   | 63 |
| <b><u>Figura 4.4:</u></b> <u>Réplica da curva de desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar; <math>\Gamma = 1,00</math>; <math>\phi = 0,0000</math>.</u>  | 64 |
| <b><u>Figura 4.5:</u></b> <u>Réplica da curva de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar; <math>\Gamma = 0,00</math>; <math>\phi = 0,0010</math>.</u>   | 65 |
| <b><u>Figura 4.6:</u></b> <u>Réplica da curva de desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar; <math>\Gamma = 0,00</math>; <math>\phi = 0,0010</math>.</u>  | 65 |

|   |    |
|---|----|
| <b><u>Figura 4.7:</u></b> Réplica da curva de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar; $\Gamma = 1,00$ ; $\phi = 0,0010$ .  | 66 |
| <b><u>Figura 4.8:</u></b> Réplica da curva de desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar; $\Gamma = 1,00$ ; $\phi = 0,0010$ .   | 67 |
| <b><u>Figura 4.9:</u></b> Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado na temperatura no leito; $\Gamma = 0,00$ ; $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$ m; $\phi = 0,0000$ .  | 69 |
| <b><u>Figura 4.10:</u></b> Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado na temperatura no leito; $\Gamma = 0,00$ ; $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$ m; $\phi = 0,0010$ . | 70 |
| <b><u>Figura 4.11:</u></b> Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado na temperatura no leito; $\Gamma = 1,00$ ; $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$ m; $\phi = 0,0010$ . | 72 |
| <b><u>Figura 4.12:</u></b> Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado na temperatura no leito; $\Gamma = 0,00$ ; $d_p = 1,850 \times 10^{-3}$ m; $\phi = 0,0000$ . | 73 |
| <b><u>Figura 4.13:</u></b> Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado na temperatura no leito; $\Gamma = 0,00$ ; $d_p = 1,850 \times 10^{-3}$ m; $\phi = 0,0010$ . | 74 |
| <b><u>Figura 4.14:</u></b> Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado na temperatura no leito; $\Gamma = 1,00$ ; $d_p = 1,850 \times 10^{-3}$ m; $\phi = 0,0010$ . | 75 |

- Figura 4.15:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\Gamma = 0,00$ ;  $T = 40^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0000$ ...... 76
- Figura 4.16:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\Gamma = 0,00$ ;  $T = 40^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0005$ ...... 77
- Figura 4.17:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\Gamma = 0,00$ ;  $T = 40^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0010$ ...... 78
- Figura 4.18:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\Gamma = 1,00$ ;  $T = 40^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0010$ ...... 79
- Figura 4.19:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado em  $\Gamma$ ;  $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$  m;  $T = 40^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0000$ ...... 80
- Figura 4.20:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado em  $\Gamma$ ;  $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$  m;  $T = 40^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0040$ ...... 82
- Figura 4.21:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado em  $\Gamma$ ;  $d_p = 1,850 \times 10^{-3}$  m;  $T = 40^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0000$ ...... 84

- Figura 4.22:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado em  $\Gamma$ ;  $d_p = 1,850 \times 10^{-3}$  m;  $T = 40^\circ\text{C}$ ;  $\phi = 0,0005$ . ..... 84
- Figura 4.23:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado em  $\phi$ ;  $\Gamma = 0,00$ ;  $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$  m;  $T = 40^\circ\text{C}$ . ..... 86
- Figura 4.24:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado em  $\phi$ ;  $\Gamma = 0,50$ ;  $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$  m;  $T = 40^\circ\text{C}$ . ..... 87
- Figura 4.25:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado em  $\phi$ ;  $\Gamma = 1,00$ ;  $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$  m;  $T = 40^\circ\text{C}$ . ..... 88
- Figura 4.26:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado em  $\phi$ ;  $\Gamma = 0,00$ ;  $d_p = 1,850 \times 10^{-3}$  m;  $T = 40^\circ\text{C}$ . ..... 89
- Figura 4.27:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado em  $\phi$ ;  $\Gamma = 0,50$ ;  $d_p = 1,850 \times 10^{-3}$  m;  $T = 40^\circ\text{C}$ . ..... 90
- Figura 4.28:** Curvas de desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar parametrizado na temperatura;  $\Gamma = 0,00$ ;  $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$  m;  $\phi = 0,0000$ . ..... 93
- Figura 4.29:** Curvas de desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar parametrizado na temperatura;  $\Gamma = 1,00$ ;  $d_p = 1,850 \times 10^{-3}$  m;  $\phi = 0,0010$ . ..... 94

|   |     |
|---|-----|
| <b><u>Figura 4.30:</u></b> <u>Curvas de desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar parametrizado no diâmetro médio das partículas;</u><br><u><math>\Gamma = 0,00</math>; <math>T = 40^\circ \text{ C}</math>; <math>\phi = 0,0000</math>.</u> .....              | 96  |
| <b><u>Figura 4.31:</u></b> <u>Curvas de desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar parametrizado no diâmetro médio das partículas;</u><br><u><math>\Gamma = 0,00</math>; <math>T = 40^\circ \text{ C}</math>; <math>\phi = 0,0010</math>.</u> .....              | 98  |
| <b><u>Figura 4.32:</u></b> <u>Curvas de desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar parametrizado no diâmetro médio das partículas;</u><br><u><math>\Gamma = 1,00</math>; <math>T = 40^\circ \text{ C}</math>; <math>\phi = 0,0000</math>.</u> .....              | 99  |
| <b><u>Figura 4.33:</u></b> <u>Curvas de desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar parametrizado no diâmetro médio das partículas;</u><br><u><math>\Gamma = 1,00</math>; <math>T = 40^\circ \text{ C}</math>; <math>\phi = 0,0010</math>.</u> .....              | 101 |
| <b><u>Figura 4.34:</u></b> <u>Curvas de desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar parametrizado em <math>\Gamma</math>; <math>d_p = 1,095 \times 10^{-3} \text{ m}</math>;</u><br><u><math>T = 40^\circ \text{ C}</math>; <math>\phi = 0,0000</math>.</u> ..... | 103 |
| <b><u>Figura 4.35:</u></b> <u>Curvas de desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar parametrizado em <math>\Gamma</math>; <math>d_p = 1,095 \times 10^{-3} \text{ m}</math>;</u><br><u><math>T = 40^\circ \text{ C}</math>; <math>\phi = 0,0040</math>.</u> ..... | 105 |
| <b><u>Figura 4.36:</u></b> <u>Curvas de desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar parametrizado em <math>\phi</math>; <math>d_p = 1,095 \times 10^{-3} \text{ m}</math>;</u><br><u><math>T = 40^\circ \text{ C}</math>; <math>\Gamma = 0,00</math>.</u> .....   | 108 |
| <b><u>Figura 4.37:</u></b> <u>Curvas de desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar parametrizado em <math>\phi</math>; <math>d_p = 1,095 \times 10^{-3} \text{ m}</math>;</u><br><u><math>T = 40^\circ \text{ C}</math>; <math>\Gamma = 1,00</math>.</u> .....   | 109 |

|   |     |
|---|-----|
| <b><u>Figura 4.38:</u></b> <u>Curvas de desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar parametrizado em <math>\phi</math>; <math>d_p = 1,850 \times 10^{-3}</math> m;</u><br><u><math>T = 40^\circ \text{C}</math>; <math>\Gamma = 0,00</math>.</u> .....  | 110 |
| <b><u>Figura 4.39:</u></b> <u>Curvas de desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar parametrizado em <math>\phi</math>; <math>d_p = 1,850 \times 10^{-3}</math> m;</u><br><u><math>T = 40^\circ \text{C}</math>; <math>\Gamma = 0,50</math>.</u> .....  | 111 |
| <b><u>Figura 4.40:</u></b> <u>Adimensional de velocidade mínima de fluidização em função do parâmetro vibracional parametrizado no diâmetro médio das partículas;</u><br><u><math>\phi = 0,0000</math>; <math>T = 60^\circ \text{C}</math>.</u> .....   | 114 |
| <b><u>Figura 4.41:</u></b> <u>Adimensional de velocidade mínima de mistura em função do parâmetro vibracional parametrizado no diâmetro médio das partículas;</u><br><u><math>\phi = 0,0000</math>; <math>T = 60^\circ \text{C}</math>.</u> .....   | 116 |
| <b><u>Figura 4.42:</u></b> <u>Adimensional de velocidade mínima de fluidização em função do parâmetro vibracional parametrizado no diâmetro médio das partículas;</u><br><u><math>\phi = 0,0005</math>; <math>T = 60^\circ \text{C}</math>.</u> .....   | 117 |
| <b><u>Figura 4.43:</u></b> <u>Adimensional de velocidade mínima de mistura em função do parâmetro vibracional parametrizado no diâmetro médio das partículas;</u><br><u><math>\phi = 0,0005</math>; <math>T = 60^\circ \text{C}</math>.</u> .....   | 117 |
| <b><u>Figura 4.44:</u></b> <u>Adimensional de velocidade mínima de mistura em função do parâmetro vibracional; <math>\phi = 0,0000</math>; símbolo cheio: este trabalho;</u><br><u><math>H_0 = 8,0 \times 10^{-3}</math> m; esferas de vidro; símbolo vazio: Gupta e Mujumdar (1980a);</u><br><u><math>H_0 = 12,5 \times 10^{-3}</math> a <math>50,0 \times 10^{-3}</math> m.</u> ..... | 120 |

- Figura 4.45:** Adimensional de velocidade mínima de mistura em função do parâmetro vibracional; símbolo cheio: este trabalho;  $\phi = 0,0010$ ;  $H_0 = 8,0 \times 10^{-3}$  m; esferas de vidro; símbolo vazio: Gupta e Mujumdar (1980a);  $\phi = 0,0000$ ;  $H_0 = 12,5 \times 10^{-3}$  a  $50,0 \times 10^{-3}$  m..... 121
- Figura 4.46:** Velocidade mínima de mistura em função da temperatura parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\phi = 0,0000$ ;  $\Gamma = 0,00$ . ... 123
- Figura 4.47:** Velocidade mínima de mistura em função da temperatura parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\phi = 0,0010$ ;  $\Gamma = 0,00$ . ... 124
- Figura 4.48:** Velocidade mínima de mistura em função da temperatura parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\phi = 0,0000$ ;  $\Gamma = 1,00$ . ... 125
- Figura 4.49:** Velocidade mínima de mistura em função da temperatura parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\phi = 0,0010$ ;  $\Gamma = 1,00$ . ... 126
- Figura 4.50:** Velocidade mínima de mistura em função do parâmetro vibracional parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\phi = 0,0000$ ;  $T = 40^\circ\text{C}$ . .... 127
- Figura 4.51:** Velocidade mínima de mistura em função do parâmetro vibracional parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\phi = 0,0010$ ;  $T = 40^\circ\text{C}$ . .... 128
- Figura 4.52:** Velocidade mínima de mistura em função do grau de saturação de glicerol parametrizado na temperatura do leite;  $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$  m;  $\Gamma = 0,00$ . .... 130
- Figura 4.53:** Velocidade mínima de mistura em função do grau de saturação de glicerol parametrizado na temperatura do leite;  $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$  m;  $\Gamma = 1,00$ . .... 131

**Figura 4.54:** Velocidade mínima de mistura em função do grau de saturação de glicerol parametrizado no diâmetro médio das partículas; T = 40°C;  
 $\Gamma = 0,00$ . ..... 133

**Figura 4.55:** Velocidade mínima de mistura em função do grau de saturação de glicerol parametrizado no diâmetro médio das partículas; T = 40°C;  
 $\Gamma = 1,00$ . ..... 133

## ÍNDICE DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| <u><b>Tabela 2.1:</b> Propriedades das partículas inertes (Patel <i>et al.</i>, 1986).</u>  | 38  |
| <u><b>Tabela 2.2:</b> Propriedades das partículas inertes (Schneider e Bridgwater, 1993).</u>   | 43  |
| <u><b>Tabela 3.1:</b> Viscosidade do glicerol (Schneider e Bridgwater, 1993).</u>   | 51  |
| <u><b>Tabela 3.2:</b> Densidade do glicerol (Windholz, 1996).</u>   | 51  |
| <u><b>Tabela 3.3:</b> Pressão de vapor do glicerol (Lide, 1997 e Perry e Green, 1997).</u>  | 51  |
| <u><b>Tabela 3.4:</b> Parâmetros utilizados nos experimentos.</u>   | 55  |
| <u><b>Tabela 4.1:</b> Valores da velocidade mínima de fluidização e da velocidade<br/>mínima de mistura, na presença de vibração mas sem presença de líquido.</u>   | 112 |
| <u><b>Tabela 4.2:</b> Valores da velocidade mínima de fluidização e da velocidade<br/>mínima de mistura, na presença de líquido mas sem a presença de vibração.</u>   | 113 |
| <u><b>Tabela A.1:</b> Reprodutividade da queda de pressão no leito e do desvio padrão<br/>destes pontos para cada velocidade superficial do ar; <math>T = 50^{\circ}\text{C}</math>;<br/><math>d_p = 1,545 \times 10^{-3} \text{ m}</math>; <math>\phi = 0,0000</math>.</u> | 158 |
| <u><b>Tabela A.2:</b> Reprodutividade da queda de pressão no leito e do desvio padrão<br/>destes pontos para cada velocidade superficial do ar; <math>T = 50^{\circ}\text{C}</math>;<br/><math>d_p = 1,545 \times 10^{-3} \text{ m}</math>; <math>\phi = 0,0010</math>.</u> | 159 |
| <u><b>Tabela B.1:</b> Velocidade mínima de fluidização; <math>H_0 = 8,0 \times 10^{-3} \text{ m}</math>;<br/><math>A = 3,0 \times 10^{-3} \text{ m}</math>.</u>   | 161 |
| <u><b>Tabela B.2:</b> Velocidade mínima de mistura; <math>H_0 = 8,0 \times 10^{-3} \text{ m}</math>;<br/><math>A = 3,0 \times 10^{-3} \text{ m}</math>.</u>   | 162 |
| <u><b>Tabela C.1:</b> Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada<br/>velocidade superficial do ar; <math>T = 40^{\circ}\text{C}</math>; <math>\phi = 0,0000</math>; <math>d_p = 1,095 \times 10^{-3} \text{ m}</math>.</u>                           | 164 |

|  |     |
|--|-----|
| <b><u>Tabela C.2:</u></b> <u>Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada</u><br><u>velocidade superficial do ar; T = 40°C; <math>\phi = 0,0005</math>; <math>dp = 1,095 \times 10^{-3}</math> m. ....</u>  | 165 |
| <b><u>Tabela C.3:</u></b> <u>Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada</u><br><u>velocidade superficial do ar; T = 40°C; <math>\phi = 0,0010</math>; <math>dp = 1,095 \times 10^{-3}</math> m. ....</u>  | 166 |
| <b><u>Tabela C.4:</u></b> <u>Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada</u><br><u>velocidade superficial do ar; T = 40°C; <math>\phi = 0,0020</math>; <math>dp = 1,095 \times 10^{-3}</math> m. ....</u>  | 167 |
| <b><u>Tabela C.5:</u></b> <u>Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada</u><br><u>velocidade superficial do ar; T = 40°C; <math>\phi = 0,0030</math>; <math>dp = 1,095 \times 10^{-3}</math> m. ....</u>  | 168 |
| <b><u>Tabela C.6:</u></b> <u>Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada</u><br><u>velocidade superficial do ar; T = 40°C; <math>\phi = 0,0040</math>; <math>dp = 1,095 \times 10^{-3}</math> m. ....</u>  | 169 |
| <b><u>Tabela C.7:</u></b> <u>Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada</u><br><u>velocidade superficial do ar; T = 40°C; <math>\phi = 0,0000</math>; <math>dp = 1,545 \times 10^{-3}</math> m. ....</u>  | 170 |
| <b><u>Tabela C.8:</u></b> <u>Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada</u><br><u>velocidade superficial do ar; T = 40°C; <math>\phi = 0,0005</math>; <math>dp = 1,545 \times 10^{-3}</math> m. ....</u>  | 171 |
| <b><u>Tabela C.9:</u></b> <u>Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada</u><br><u>velocidade superficial do ar; T = 40°C; <math>\phi = 0,0010</math>; <math>dp = 1,545 \times 10^{-3}</math> m. ....</u>  | 172 |
| <b><u>Tabela C.10:</u></b> <u>Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada</u><br><u>velocidade superficial do ar; T = 40°C; <math>\phi = 0,0020</math>; <math>dp = 1,545 \times 10^{-3}</math> m. ....</u> | 173 |
| <b><u>Tabela C.11:</u></b> <u>Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada</u><br><u>velocidade superficial do ar; T = 40°C; <math>\phi = 0,0000</math>; <math>dp = 1,850 \times 10^{-3}</math> m. ....</u> | 174 |
| <b><u>Tabela C.12:</u></b> <u>Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada</u><br><u>velocidade superficial do ar; T = 40°C; <math>\phi = 0,0005</math>; <math>dp = 1,850 \times 10^{-3}</math> m. ....</u> | 175 |
| <b><u>Tabela C.13:</u></b> <u>Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada</u><br><u>velocidade superficial do ar; T = 40°C; <math>\phi = 0,0010</math>; <math>dp = 1,850 \times 10^{-3}</math> m. ....</u> | 176 |

|   |     |
|---|-----|
| <b><u>Tabela C.14:</u></b> Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada<br>velocidade superficial do ar; $T = 40^{\circ}\text{C}$ ; $\phi = 0,0020$ ; $dp = 1,850 \times 10^{-3} \text{ m}$ . .... | 177 |
| <b><u>Tabela C.15:</u></b> Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada<br>velocidade superficial do ar; $T = 50^{\circ}\text{C}$ ; $\phi = 0,0000$ ; $dp = 1,095 \times 10^{-3} \text{ m}$ . .... | 178 |
| <b><u>Tabela C.16:</u></b> Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada<br>velocidade superficial do ar; $T = 50^{\circ}\text{C}$ ; $\phi = 0,0005$ ; $dp = 1,095 \times 10^{-3} \text{ m}$ . .... | 179 |
| <b><u>Tabela C.17:</u></b> Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada<br>velocidade superficial do ar; $T = 50^{\circ}\text{C}$ ; $\phi = 0,0010$ ; $dp = 1,095 \times 10^{-3} \text{ m}$ . .... | 180 |
| <b><u>Tabela C.18:</u></b> Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada<br>velocidade superficial do ar; $T = 50^{\circ}\text{C}$ ; $\phi = 0,0020$ ; $dp = 1,095 \times 10^{-3} \text{ m}$ . .... | 181 |
| <b><u>Tabela C.19:</u></b> Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada<br>velocidade superficial do ar; $T = 50^{\circ}\text{C}$ ; $\phi = 0,0030$ ; $dp = 1,095 \times 10^{-3} \text{ m}$ . .... | 182 |
| <b><u>Tabela C.20:</u></b> Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada<br>velocidade superficial do ar; $T = 50^{\circ}\text{C}$ ; $\phi = 0,0040$ ; $dp = 1,095 \times 10^{-3} \text{ m}$ . .... | 183 |
| <b><u>Tabela C.21:</u></b> Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada<br>velocidade superficial do ar; $T = 50^{\circ}\text{C}$ ; $\phi = 0,0000$ ; $dp = 1,545 \times 10^{-3} \text{ m}$ . .... | 184 |
| <b><u>Tabela C.22:</u></b> Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada<br>velocidade superficial do ar; $T = 50^{\circ}\text{C}$ ; $\phi = 0,0005$ ; $dp = 1,545 \times 10^{-3} \text{ m}$ . .... | 185 |
| <b><u>Tabela C.23:</u></b> Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada<br>velocidade superficial do ar; $T = 50^{\circ}\text{C}$ ; $\phi = 0,0010$ ; $dp = 1,545 \times 10^{-3} \text{ m}$ . .... | 186 |
| <b><u>Tabela C.24:</u></b> Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada<br>velocidade superficial do ar; $T = 50^{\circ}\text{C}$ ; $\phi = 0,0020$ ; $dp = 1,545 \times 10^{-3} \text{ m}$ . .... | 187 |
| <b><u>Tabela C.25:</u></b> Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada<br>velocidade superficial do ar; $T = 50^{\circ}\text{C}$ ; $\phi = 0,0000$ ; $dp = 1,850 \times 10^{-3} \text{ m}$ . .... | 188 |

|  |     |
|--|-----|
| <b><u>Tabela C.26:</u></b> Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada<br>velocidade superficial do ar; $T = 50^{\circ}\text{C}$ ; $\phi = 0,0005$ ; $dp = 1,850 \times 10^{-3}$ m. .... | 189 |
| <b><u>Tabela C.27:</u></b> Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada<br>velocidade superficial do ar; $T = 50^{\circ}\text{C}$ ; $\phi = 0,0010$ ; $dp = 1,850 \times 10^{-3}$ m. .... | 190 |
| <b><u>Tabela C.28:</u></b> Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada<br>velocidade superficial do ar; $T = 50^{\circ}\text{C}$ ; $\phi = 0,0020$ ; $dp = 1,850 \times 10^{-3}$ m. .... | 191 |
| <b><u>Tabela C.29:</u></b> Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada<br>velocidade superficial do ar; $T = 60^{\circ}\text{C}$ ; $\phi = 0,0000$ ; $dp = 1,095 \times 10^{-3}$ m. .... | 192 |
| <b><u>Tabela C.30:</u></b> Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada<br>velocidade superficial do ar; $T = 60^{\circ}\text{C}$ ; $\phi = 0,0005$ ; $dp = 1,095 \times 10^{-3}$ m. .... | 193 |
| <b><u>Tabela C.31:</u></b> Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada<br>velocidade superficial do ar; $T = 60^{\circ}\text{C}$ ; $\phi = 0,0010$ ; $dp = 1,095 \times 10^{-3}$ m. .... | 194 |
| <b><u>Tabela C.32:</u></b> Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada<br>velocidade superficial do ar; $T = 60^{\circ}\text{C}$ ; $\phi = 0,0020$ ; $dp = 1,095 \times 10^{-3}$ m. .... | 195 |
| <b><u>Tabela C.33:</u></b> Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada<br>velocidade superficial do ar; $T = 60^{\circ}\text{C}$ ; $\phi = 0,0030$ ; $dp = 1,095 \times 10^{-3}$ m. .... | 196 |
| <b><u>Tabela C.34:</u></b> Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada<br>velocidade superficial do ar; $T = 60^{\circ}\text{C}$ ; $\phi = 0,0040$ ; $dp = 1,095 \times 10^{-3}$ m. .... | 197 |
| <b><u>Tabela C.35:</u></b> Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada<br>velocidade superficial do ar; $T = 60^{\circ}\text{C}$ ; $\phi = 0,0000$ ; $dp = 1,545 \times 10^{-3}$ m. .... | 198 |
| <b><u>Tabela C.36:</u></b> Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada<br>velocidade superficial do ar; $T = 60^{\circ}\text{C}$ ; $\phi = 0,0005$ ; $dp = 1,545 \times 10^{-3}$ m. .... | 199 |
| <b><u>Tabela C.37:</u></b> Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada<br>velocidade superficial do ar; $T = 60^{\circ}\text{C}$ ; $\phi = 0,0010$ ; $dp = 1,545 \times 10^{-3}$ m. .... | 200 |

- Tabela C.38:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada  
velocidade superficial do ar;  $T = 60^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0020$ ;  $dp = 1,545 \times 10^{-3} \text{ m}$ . ..... 201
- Tabela C.39:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada  
velocidade superficial do ar;  $T = 60^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0000$ ;  $dp = 1,850 \times 10^{-3} \text{ m}$ . ..... 202
- Tabela C.40:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada  
velocidade superficial do ar;  $T = 60^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0005$ ;  $dp = 1,850 \times 10^{-3} \text{ m}$ . ..... 203
- Tabela C.41:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada  
velocidade superficial do ar;  $T = 60^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0010$ ;  $dp = 1,850 \times 10^{-3} \text{ m}$ . ..... 204
- Tabela C.42:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada  
velocidade superficial do ar;  $T = 60^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0020$ ;  $dp = 1,850 \times 10^{-3} \text{ m}$ . ..... 205

## NOMENCLATURA

|               |  |
|---------------|--|
| A             | Amplitude vibracional [m].   |
| $d_p$         | Diâmetro da partícula [m].   |
| D             | Diâmetro do leito [m].   |
| f             | Frequência vibracional [ $s^{-1}$ ].                                 |
| g             | Aceleração da gravidade [ $m/s^2$ ].                                 |
| $H_0$         | Altura de leito estático [m].  |
| L             | Comprimento do leito [m].  |
| $m_g$         | Massa de glicerol [kg].  |
| $m_p$         | Massa de partículas [kg].  |
| M             | Massa do leito [kg].   |
| n             | Parâmetro definido nas equações (9) e (10) [ $m^{-1}$ ].             |
| Q             | Vazão de ar [ $m^3/min$ ].   |
| T             | Temperatura [ $^{\circ}C$ ].   |
| U             | Velocidade do ar [m/s].  |
| $U_{mf0}$     | Velocidade mínima de fluidização sem a presença da pasta [m/s].      |
| $U_{mf}$      | Velocidade mínima de fluidização [m/s].                              |
| $U_{mj}$      | Velocidade mínima de jorro [m/s].                                    |
| $U_{mm0}$     | Velocidade mínima de mistura sem a presença da pasta [m/s].          |
| $U_{mm}$      | Velocidade mínima de mistura [m/s].                                  |
| $U_{mvf}$     | Velocidade mínima de vibrofluidização [m/s].                         |
| $(U_{mvf})_s$ | Velocidade mínima de vibrofluidização sem a presença de pasta.[m/s]. |
| $(U_{mvf})_u$ | Velocidade mínima de vibrofluidização em presença de pasta [m/s].    |

|       |   |
|-------|---|
| $U_s$ | Velocidade superficial do ar no leito [m/s].                      |
| $V_g$ | Volume de glicerol no leito de partículas [m <sup>3</sup> ].      |
| $V_l$ | Volume de líquido no leito de partículas [m <sup>3</sup> ].       |
| $V_p$ | Volume das partículas no leito [m <sup>3</sup> ].                 |
| $V_T$ | Volume total ocupado pelas partículas no leito [m <sup>3</sup> ]. |

### SÍMBOLOS GREGOS

|                  |  |
|------------------|--|
| $\delta p$       | Desvio padrão das medidas de queda de pressão no leito [N/m <sup>2</sup> ].    |
| $\Delta h$       | Altura manométrica [cm H <sub>2</sub> O].                                      |
| $\Delta p$       | Queda de pressão [N/m <sup>2</sup> ].  |
| $\Delta p_j^0$   | Queda de pressão em jorro estável sem a presença da pasta [N/m <sup>2</sup> ]. |
| $\Delta p_j$     | Queda de pressão em jorro estável [N/m <sup>2</sup> ].                         |
| $\Delta p_{mf}$  | Queda de pressão na mínima fluidização [N/m <sup>2</sup> ].                    |
| $\Delta p_{mvf}$ | Queda de pressão na mínima vibrofluidização [N/m <sup>2</sup> ].               |
| $\varepsilon$    | Porosidade [-].  |
| $\phi$           | Grau de saturação de glicerol [-].   |
| $\Gamma$         | Parâmetro vibracional [-].   |
| $\varphi$        | Esfericidade [-].  |
| $\mu$            | Viscosidade do ar [mPa.s].   |
| $\mu_l$          | Viscosidade aparente da pasta ou do líquido [mPa.s].                           |
| $\nu_g$          | Viscosidade cinemática do gás [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ].               |
| $\rho$           | Densidade do ar [kg/m <sup>3</sup> ].  |

- $\rho_g$  Densidade do gás [ $\text{kg/m}^3$ ].
- $\rho_p$  Densidade da partícula [ $\text{kg/m}^3$ ].
- $\rho_s$  Densidade do sólido [ $\text{kg/m}^3$ ].
- $\omega$  Freqüência angular vibracional [ $\text{rad s}^{-1}$ ].

### ADIMENSIONAIS

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

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

Número de Reynolds vibratório: 
$$\text{Re}_v = \frac{\rho_p d_p A \omega}{\mu_p}$$

## RESUMO

Os leitos vibrofluidizados vêm sendo utilizados em escala de laboratório para a secagem de pastas utilizando partículas inertes como meio para fluidização. A fim de contribuir para essa aplicação, o objetivo principal deste trabalho é analisar o comportamento fluidodinâmico dos leitos vibrofluidizado e fluidizado em função do diâmetro das partículas inertes, da temperatura no leito, do parâmetro vibracional e do grau de saturação de líquido (volume de líquido/volume de partículas). De forma complementar, objetiva-se também o estudo das curvas de desvio padrão da queda de pressão para o sistema trifásico e a análise da influência dos parâmetros sobre a velocidade mínima de mistura na forma proposta por Gupta e Mujumdar (1980a). Como líquido utilizou-se o glicerol por este praticamente não evaporar nas condições de trabalho, o qual foi alimentado em batelada, e como inertes foram utilizadas partículas de vidro classificadas no grupo D de Geldart. O equipamento utilizado foi um leito vibrofluidizado de seção retangular com 0,20 m de comprimento, 0,10 m de largura e 0,30 m de altura, construído em aço carbono galvanizado. Os dados de queda de pressão e de velocidade superficial de ar foram obtidos através de transdutores de pressão ligados em um sistema computadorizado de aquisição de dados. As análises foram feitas para intervalo de parâmetro vibracional entre 0,00 e 1,50; diâmetros médios de partículas de  $1,095 \times 10^{-3}$ ,  $1,545 \times 10^{-3}$  e  $1,850 \times 10^{-3}$  m, temperaturas de 40, 50 e 60 °C e intervalo de saturação de glicerol entre 0,0000 e 0,0040.

Na análise da fluidodinâmica, verificou-se que a temperatura praticamente não influenciou o comportamento da queda de pressão e com exceção da transição entre o leito fluidizado e o vibrofluidizado, a intensidade de vibração também não tornou significativa as variações da queda de pressão. Já o aumento do grau de saturação de líquido, tanto quanto a variação do diâmetro das partículas, tiveram grande influência sobre o comportamento das curvas características principalmente em relação à queda de pressão no leito.

Na análise do desvio padrão da queda de pressão verificou-se que, quando o leito está na região de leito fixo ou totalmente aglomerado, o desvio padrão apresentado foi muito pequeno e praticamente independe dos parâmetros de ensaio. Quando o leito está na região de leito fluidizado o desvio padrão foi significativo, principalmente a altas velocidades de ar e foi bastante intensificado em presença de vibração, inclusive na região de leito fixo. As curvas obtidas de desvio padrão, além de fornecer informações adicionais sobre o comportamento fluidodinâmico do leito, também pode auxiliar na determinação do momento em que se inicia a movimentação das partículas no leito.

Verificou-se que a metodologia utilizada para a obtenção da velocidade mínima de fluidização não apresentou resultados coerentes fisicamente, situação que foi satisfeita pela velocidade mínima de mistura da forma como foi definida por Gupta e Mujumdar (1980a). Pôde-se verificar que a temperatura praticamente não influenciou a velocidade mínima de mistura e a intensidade de vibração teve pouca influência sobre este parâmetro nas condições deste trabalho. Já o efeito da quantidade de líquido adicionado no leito e o tamanho das partículas tiveram influência considerável sobre este parâmetro.

## ABSTRACT

Vibrofluidized beds with inert particles are often used for drying pastes in a laboratory scale. Aiming to contribute to the study of paste drying in such beds, the main purpose of this work is to analyze fluid dynamic behavior of fluidized and vibrofluidized beds as a function of parameters such as the inert particle diameter, the bed temperature, the vibrational parameter and the liquid saturation rate in the bed (defined as the quotient volume of liquid/volume of particles). Curves of pressure drop fluctuations as a function of time were obtained for the tri-phase system and the effect of those parameters on the mixture minimum velocity (as proposed by Gupta and Mujumdar, 1980a) were also analyzed. As liquid phase was employed glycerol, which have been fed into the bed in a batch mode. Glycerol was chosen because it suffers practically no evaporation at the experimental conditions. As inert particles were employed glass spheres in group D of Geldart's classification. The vibrofluidized bed was of galvanized steel, with square-cross section of 0.20x1.10 m and height of 0.20 m. Pressure drop data and superficial air velocity data were collected by pressure transducers connected to an acquisition data system. The data were collected for vibrational ranges from 0.00 to 1.50; mean particle diameters of  $1.095 \times 10^{-3}$ ,  $1.545 \times 10^{-3}$  e  $1,850 \times 10^{-3}$  m; bed temperatures of 40, 50 and 60 °C and saturation rates from 0.0000 to 0.0040.

The results indicate that the bed temperature does not affect significantly the pressure drop curves behavior. The vibrational parameter also shows little influence on pressure drop versus air velocity curves, excepting in the

transition between fluidized and vibrofluidized beds. On the other hand, the pressure drop curves behavior is strongly affected by the increasing of the liquid saturation rate and by variation of particle diameter.

Analysis of standard deviation of pressure drop fluctuations shows that for conditions which are typical of a fixed bed, the standard deviations are very small and almost independent on every parameter investigated. At fluidized bed conditions, these standard deviations are significant, particularly at the greatest air velocities. It was observed that they increase a lot in the presence of vibration, even at fixed bed conditions. Besides providing additional information on the bed fluid dynamic behavior, the curves of standard deviation of pressure drop fluctuations are also useful to identify the beginning of particle displacement into the bed due to vibration.

It was observed that the methodology applied to identify the minimum fluidization velocity did not provide good results, but it worked well to identify the mixture minimum velocity as defined by Gupta and Mujundar (1980a). For the conditions investigated, the mixture minimum velocity is strongly affected by the liquid saturation rate and by the particle diameter, while both the bed temperature and the vibrational parameter show little influence on it.

# 1 INTRODUÇÃO

A utilização de leitos “móveis” (jorro, fluidizado e vibrofluidizado), com partículas inertes na secagem de material pastoso, tem se apresentado como uma técnica muito promissora. Estes equipamentos possuem baixo custo de instalação e operação e tem como característica principal altas taxas de transferência de calor e massa, não necessitando portanto de grande espaço físico para sua instalação. Já foram feitos diversos estudos sobre esta técnica, com destaque para os trabalhos pioneiros de Minchev, *et al.* (1968) e Pham (1983) ambos para a configuração leito de jorro. As pesquisas vêm demonstrando a viabilidade desta técnica na secagem de várias pastas, tanto orgânicas quanto inorgânicas (Freire, 1992).

Embora para o leito de jorro já exista na literatura um considerável número de trabalhos sobre a secagem de pastas, o mesmo não ocorre para os leitos fluidizado e vibrofluidizado. Para estes leitos o estudo está em uma fase ainda embrionária. Certamente, uma das grandes vantagens de se utilizar leitos vibrofluidizados no lugar dos de jorro, está no fato de que nesses a maior parte da vazão de ar é utilizada na manutenção do próprio jorro enquanto nos leitos vibrofluidizados o ar é utilizado apenas na quantidade necessária a uma boa secagem.

No momento já se encontram na literatura alguns trabalhos sobre a influência da presença de um fluido, normalmente o glicerol, em leitos de jorro, como o estudado por Patel *et al.* (1986), Schneider e Bridgwater (1993), Santana *et al.* (1997), Passos e Mujumdar (2000) e Spitzner Neto (2001), em leitos

fluidizados estudados por Passos e Mujumdar (2000) e Passos e Massarani (2001) e em leitos vibrofluidizados, por Pakowski e Mujumdar (1980) e Malhotra *et al.* (1984). Estes autores utilizaram o glicerol, justamente pelo seu baixo poder de evaporação nas condições experimentais utilizadas, simulando a presença de uma pasta alimentada em batelada. Estas análises da influência sobre a fluidodinâmica objetivam entender melhor o processo de secagem envolvendo pastas e suspensões. Foi encontrado na literatura apenas o trabalho de Malhotra *et al.* (1984) utilizando o glicerol como “pasta” no estudo da fluidodinâmica de leitos vibrofluidizados. Os autores estudaram a fluidodinâmica de um leito retangular, utilizando como inertes esferas de vidro tipo “ballotini” de diâmetros  $3,53 \times 10^{-4}$  e  $6,67 \times 10^{-4}$  m (partículas do grupo B de Geldart), parâmetro vibracional ( $\Gamma$ ) variando de 0 a 4 e razão entre massa de glicerol e massa de inertes de 0,000 a 0,006.

No presente trabalho, tem-se como objetivo principal analisar o comportamento fluidodinâmico dos leitos vibrofluidizado e fluidizado em função do diâmetro das partículas inertes, da temperatura no leito, do parâmetro vibracional e do grau de saturação da “pasta” ( $V_g/V_p$ ), utilizando partículas inertes de vidro que sejam classificadas como sendo do grupo D de Geldart.

De forma complementar objetiva-se também o estudo das curvas de desvio padrão da queda de pressão para o sistema trifásico e a análise da influência dos parâmetros de ensaio sobre a velocidade mínima de mistura na forma proposta por Gupta e Mujumdar (1980a).

Este trabalho foi realizado no Centro de Secagem de Pastas, Suspensões e Sementes no DEQ/UFSCar, onde as pesquisas sobre secagem

tiveram início em 1980 e, desde então já se pesquisou a viabilidade da secagem de diversas pastas (Ré, 1996; Morris, 1990; Spitzner Neto, 2001), suas propriedades térmicas (Oliveira, 1996) e fluidodinâmicas (Spitzner Neto, 1997). Sobre o leito vibrofluidizado no Centro de Secagem já foram feitos estudos fluidodinâmicos (Della Tonia Jr., 1990), térmicos (Montedo, 1992; Camargo, 1998), e de transferência de massa (Garim, 1994; Garim, 1998; Canelas Neto, 2000).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão aborda principalmente aspectos fluidodinâmicos relacionados ao leito vibrofluidizado (e fluidizado) e a estudos envolvendo a fluidodinâmica e a secagem de líquidos em leitos “móveis” utilizando partículas inertes como suporte.

### 2.1 Leito Vibrofluidizado

Um leito vibrofluidizado consiste de um leito fluidizado convencional, ao qual se aplica uma vibração mecânica (vertical ou horizontal) para melhorar as características de transporte. Essa estrutura compreende um subsistema que fornece a energia vibracional e outro que absorve esta energia.

Alguns autores como Gupta e Mujumdar (1980b), Erdész e Ormós (1984), Erdész *et al.*(1986), Della Tonia Junior *et. al.* (1989), Erdész (1990) e Cardoso e Kieckbusch (1998), estudaram o leito vibrofluidizado e puderam relatar as seguintes vantagens, em relação aos leitos fluidizado e de jorro:

- facilidade de controle da distribuição do tempo de residência e intensidade de agitação pela manipulação dos parâmetros vibracionais;
- maiores coeficientes de transferência de calor e de massa;
- a agitação mecânica reduz a velocidade mínima de fluidização e pode reduzir a queda de pressão, de forma que minimiza o consumo de energia térmica e mecânica e minimiza a elutrição (arraste) de partículas finas;
- a vibração atenua zonas mortas, canais preferenciais e formação de bolhas, resultando em operações mais higiênicas e uniformes para produtos alimentícios;

- possibilidade de fluidizar materiais coesivos, adesivos e pastosos;
- vários processos como secagem, granulação, resfriamento e recobrimento podem ser realizados no mesmo equipamento;
- é possível a manipulação de materiais inflamáveis, explosivos e tóxicos em um leito vibrofluidizado operando em um ciclo fechado e,
- o movimento do material através do secador é mais suave, reduzindo o atrito entre as partículas possibilitando o tratamento de materiais frágeis.

### 2.1.1 Parâmetro vibracional

No estudo de leitos vibrofluidizados, é importante quantificar a energia vibracional imposta ao sistema, a qual tem influência sobre a dinâmica das partículas no leito. A forma mais utilizada de quantificar a energia vibracional é através do adimensional de vibração, sugerido por Chlenov e Mikhailov (1972), chamado de parâmetro vibracional ( $\Gamma$ ), definido como:

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

onde  $A$  e  $f$  são a amplitude e frequência de vibração respectivamente e  $g$  a aceleração gravitacional. Este adimensional de vibração, segundo Erdész e Mujumdar (1986) pode ser interpretado fisicamente como sendo a relação entre a aceleração média vibracional exercida sobre o sistema e a aceleração gravitacional, e se forem multiplicados ambos os termos pela massa, representará a razão entre a força de inércia e o peso da massa acelerada.

### 2.1.2 Regimes de operação

Os leitos de partículas, submetidos à influência de vibração na direção vertical apresentam uma variedade de regimes de comportamento. A nomenclatura proposta por Strumillo e Pakowski (1980) é a mais abrangente e está baseada no adimensional de vibração ( $\Gamma$ ) e na velocidade mínima de vibrofluidização ( $U_{mvf}$ ). Assim eles classificam este tipo de leito como:

- leito vibrado, para  $\Gamma > 1$ ; sem escoamento de ar;
- leito compacto, para  $\Gamma < 1$ ; sem escoamento de ar;
- leito vibrofluidizado, para  $\Gamma > 1$ ;  $U < U_{mvf}$ , e
- leito fluidizado vibrado, para qualquer  $\Gamma$ ;  $U > U_{mvf}$ .

O movimento das partículas no interior do leito é de fundamental importância, pois influencia no processo de transferência de calor e massa, na aglomeração, no escoamento dos sólidos, etc.

Bratu e Jinescu (1971), definiram três regimes de operação para sistemas vibrados dependentes da grandeza da componente vertical de aceleração vibracional, que são:

**estado vibrado:** quando  $\Gamma < 1$ , o leito comporta-se apenas como um leito fluidizado e a vibração somente ajuda a melhorar a estabilidade e a homogeneidade do leito;

**leito vibrofluidizado:** quando  $\Gamma \cong 1$ , 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 vibrado fluidizado:** quando  $\Gamma > 1$ , o leito é essencialmente afetado pelas forças vibracionais, as quais tendem a arremessar as partículas para cima com a vibração, sendo que 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.

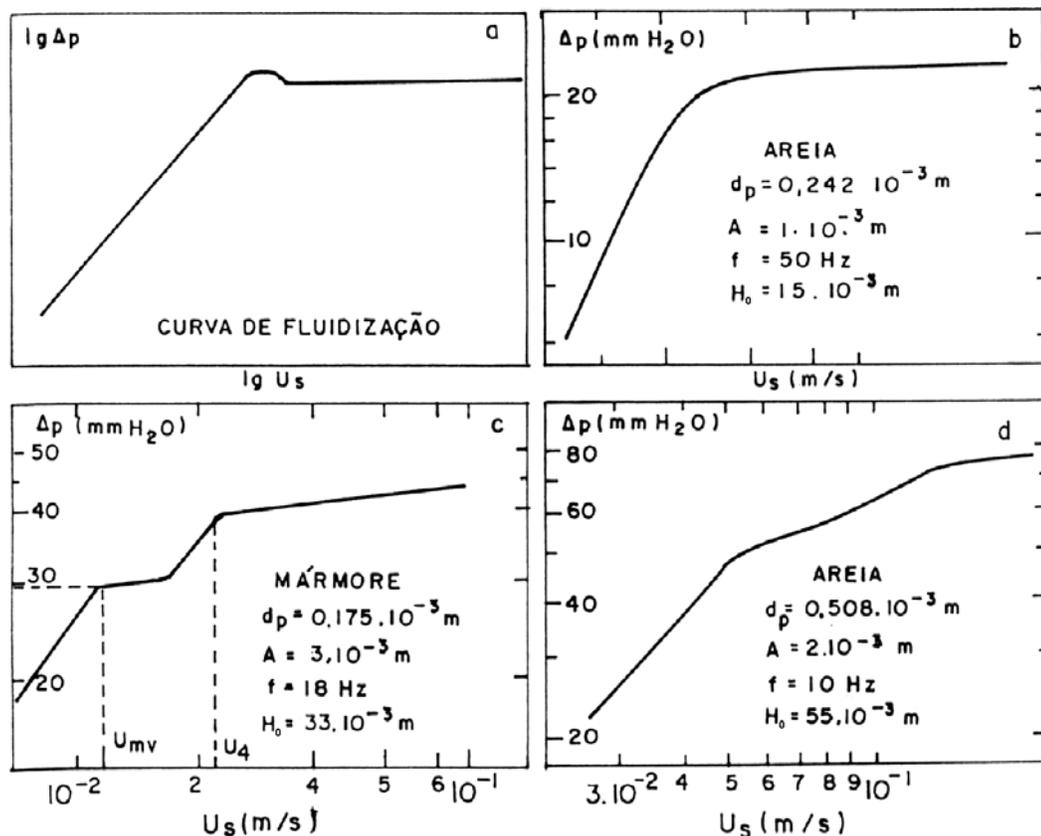
Para os estudos relacionados à operação de secagem é usual seguir as definições dos regimes apresentados por Bratu e Jinescu (1971), já que neste caso o ar sempre estará presente, como agente fluidizante e de transporte de calor e massa para secagem do material.

## 2.2 Propriedades Fluidodinâmicas de Leitos Vibrofluidizados

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 2.1). A forma destas curvas é dependente da relação das forças vibracionais e da dinâmica, impostas pela percolação do fluido através do leito. A curva **a** é típica dos leitos fluidizados convencionais. Ao submeter um leito fluidizado a 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 freqüência 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 os estados estático e fluidizado estende-se em uma ampla faixa de velocidade do fluido e a curva pode ser subdividida em três distintos segmentos de reta.

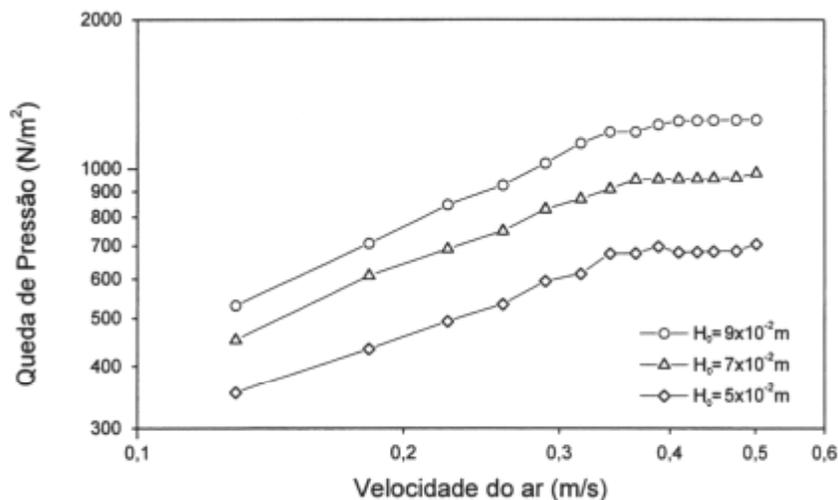


**Figura 2.1:** Tipos de curvas características: (a) leito fluidizado; (b,c,d) leito vibrofluidizado; (Strumillo e Pakowski, 1980)

Alguns autores, baseados nas observações de Strumillo e Pakowski (1980), fazem ainda as seguintes afirmações:

- Cardoso e Kieckbusch (1998) observaram que no regime vibrofluidizado, quando o ar escoia a velocidades muito baixas, por si só, este não tem condições de movimentar as partículas do leito, e estas são fluidizadas devido ao efeito da vibração;
- segundo Bratu e Jinescu (1971), a vibrofluidização 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;
- Ringer e Mujumdar (1984) relatam que a vibração atua no sentido de reduzir a velocidade mínima de fluidização, sendo que na prática a extensão dessa redução é amortecida pela influência da altura do leito.

Camargo (1998) estudou a influência da variação da altura do leito estático na queda de pressão. A Figura 2.2 ilustra o resultado obtido para o leito formado por partículas inertes de vidro.

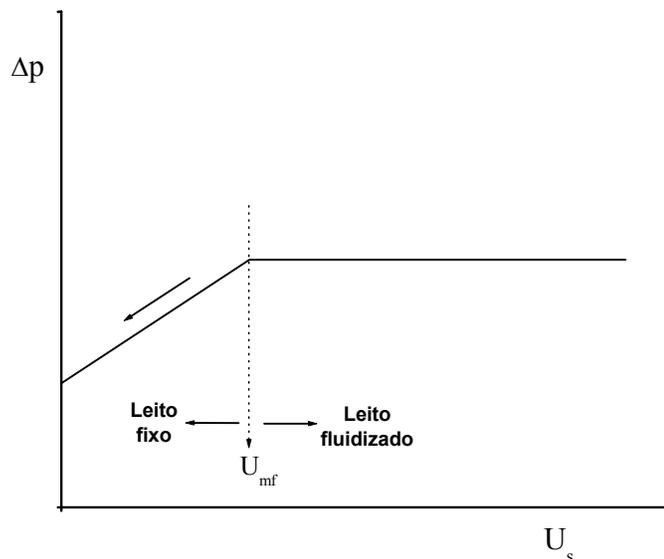


**Figura 2.2:** Curvas características de vibrofluidização parametrizadas na altura do leito; esferas de vidro;  $d_p = 0,7 \times 10^{-3} \text{ m}$ ;  $f = 10 \text{ Hz}$ ;  $A = 1,98 \times 10^{-2} \text{ m}$ ; (Camargo, 1998).

Ainda para leitos vibrofluidizados, é importante analisar 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 vibrofluidização ( $U_{mvf}$ ), e a queda de pressão correspondente, é geralmente chamada de queda de pressão na velocidade de mínima vibrofluidização ( $\Delta p_{mvf}$ ). Observa-se que em alguns trabalhos, existe um conflito entre a nomenclatura e a definição da velocidade mínima de vibrofluidização. Muitas vezes a velocidade mínima de vibrofluidização é chamada de velocidade mínima de fluidização sob condições vibratórias, ou é declarado se a vibração está presente no experimento ou apenas sob quais condições de vibração encontra-se o equipamento.

### *2.2.1 Velocidade mínima de fluidização e velocidade mínima de mistura*

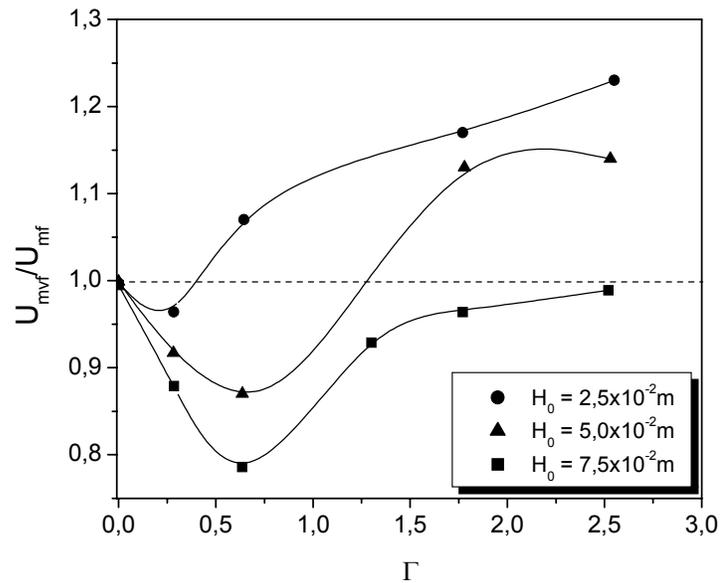
Em um leito fluidizado convencional, a transição de leito fixo para fluidizado é facilmente perceptível em quase todos os casos, ocorrendo em uma pequena faixa de velocidade ou vazão de ar. Uma boa estimativa para determinação da  $U_{mf}$  é feita através da intersecção de duas retas na curva de queda 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). Entretanto, para o leito vibrofluidizado, dependendo da faixa de parâmetro vibracional, esta transição ocorre em uma considerável faixa de velocidade de gás e, conseqüentemente, o uso da definição convencional torna-se questionável. Apesar disso, alguns autores até hoje, ainda utilizam a definição clássica para leitos fluidizados convencionais na determinação da  $U_{mvf}$ .



**Figura 2.3:** Curva de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar para o leito fluidizado.

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 parâmetro vibracional ( $\Gamma$ ), mantida a amplitude constante. Os resultados por eles obtidos estão na Figura 2.4, onde a  $U_{mvf}$  está adimensionalizada em  $U_{mf}$ . Estes resultados são fisicamente incoerentes, pois a  $U_{mvf}$  deveria diminuir com o aumento do  $\Gamma$ . Isto sugere que esta metodologia não é adequada, fazendo com que o conceito de velocidade mínima de fluidização para leitos vibrofluidizados, necessite de uma nova definição. Desta forma, foi introduzido 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. Essa determinação é feita visualmente, e eles chegaram à conclusão de que a  $U_{mm}$  decresce com o aumento da aceleração vibracional, como pode ser visto na

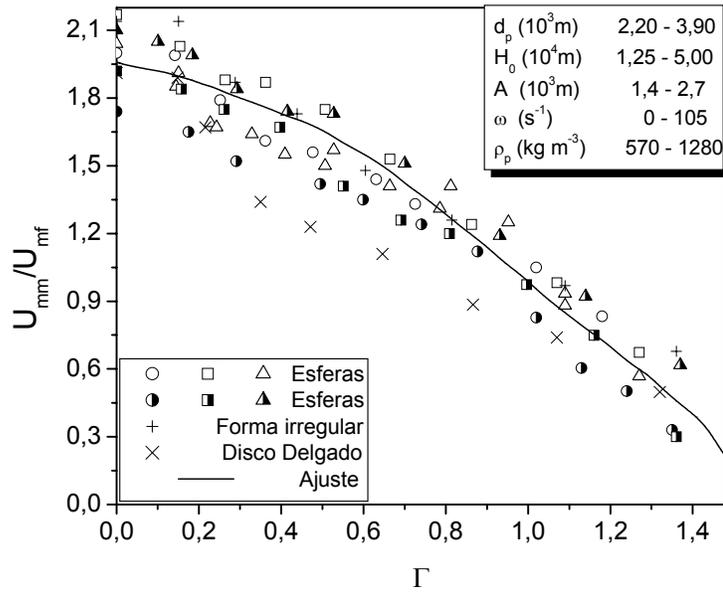
Figura 2.5. Os autores observaram ainda, que para  $\Gamma \geq 1$ , não é necessária nenhuma vazão de ar para manter os sólidos em movimento, portanto a vibração mantém o movimento das partículas e este estado é definido como “pseudo-fluidização”.



**Figura 2.4:**  $U_{mvf}/U_{mf}$  em função do parâmetro vibracional parametrizado em altura de leito estático; inertes de polietileno;  $d_p = 3,11 \times 10^{-3} \text{ m}$ ;  $A = 4,25 \times 10^{-3} \text{ m}$ ; (Gupta e Mujumdar, 1980a).

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

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



**Figura 2.5:**  $U_{mm}/U_{mf}$  obtida pela Equação 3, parametrizado no tipo de partícula; (Gupta e Mujumdar, 1980a).

Na Equação 2, a velocidade mínima de fluidização para o leito fluidizado ( $U_{mf}$ ) é estimada pelo uso da correlação de Wen e Yu (1966), como segue:

$$U_{mf} = \frac{Re_{pmf} \mu}{\rho d_p} \tag{3}$$

essa equação clássica é muito empregada e aplica-se a partículas finas ou para  $Re_{pmf} < 20$ , onde:

$$Re_{pmf} = \sqrt{(33,7)^2 + 0,0408Ar} - 33,7 \tag{4}$$

$$Ar = \frac{\rho(\rho_p - \rho)gd_p^3}{\mu^2} \quad (5)$$

Portanto, a Equação 2 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) também observaram aumento na  $U_{mf}$  para um leito fluidizado agitado e redução na  $U_{mm}$ , ambos com o aumento da vibração, utilizando como partículas inertes zeólitas.

Mujumdar (1984) verificou que a  $U_{mm}$ , diminui com o aumento da vibração mais expressivamente até  $\Gamma = 0,4$ , e após este valor a redução é mais suave. Ele utilizou partículas de polietileno e zeólitas, com  $d_p = 3,5 \times 10^{-3}$  e  $2,5 \times 10^{-3}$  m respectivamente.

Erdész e Ormós (1984) também verificaram a redução na  $U_{mm}$  (definida pelos autores como velocidade mínima de fluidização), obtida visualmente, com o aumento da intensidade de vibração. Eles variaram  $\Gamma$  de 0 a 13,4, a baixas amplitudes, utilizando como inertes material particulado não especificado.

Garim e Freire (1994) observaram aumento na  $U_{mf}$  com o aumento da vibração, variando-se  $\Gamma$  de 0 até 1. Foram utilizadas esferas inertes de vidro tipo “ballotini” com  $d_p = 1,1 \times 10^{-3}$  m. Os autores não mediram a  $U_{mm}$  devido à dificuldade na visualização do momento em que realmente as partículas começam a se movimentar umas com relação às outras, mas sugeriram que a medida da  $U_{mm}$  seria provavelmente o método mais apropriado para este tipo de leito.

Além das correlações apresentadas (Equações 2 e 3), outros trabalhos sugerem correlações para determinar a velocidade mínima de fluidização e vibrofluidização. Para os leitos fluidizados, Couderc (1985) reúne várias correlações de diversos autores, dispostos em tabelas, detalhando as condições limites para utilização.

Mushtayev *et al.* (1972), utilizando como partículas inertes PVC ( $d_p = 2,0 \times 10^{-3}$  m), obtiveram a seguinte correlação para a velocidade de mínima vibrofluidização:

$$U_{mvf} = 0,12 \left( \frac{\rho_s}{\rho_g} \right)^{0,63} \left( \frac{1}{v_g} \right)^{0,33} (d_p)^{0,88} (1 - 0,095(\Gamma)^2) \quad (6)$$

utilizada para intervalo de  $\Gamma$  entre 0 e 30, não levando em consideração as forças interpartículas. Provavelmente o primeiro termo desta equação corresponda a  $U_{mf}$ , reduzindo-a na forma da equação de Bratu e Jinescu (1972),

$$U_{mvf} = U_{mf} (1 - 0,095(\Gamma)^2) \quad (7)$$

Outras correlações, obtidas por diversos pesquisadores para  $U_{mvf}$  podem ser encontradas nos trabalhos de Erdész *et al.* (1986), Della Tonia Jr. (1990) e Erdész (1990).

### 2.2.2 Perda de carga em torno da velocidade mínima de vibrofluidização

Muitos estudos são feitos com o objetivo de avaliar a perda de carga que o leito sofre quando submetido simultaneamente à vibração e percolação do ar nas partículas. Vários modelos têm sido propostos para prever a variação da pressão no leito. Extensivos estudos foram feitos de forma pioneira na Romênia por Bratu e Jinescu (1969), que mediram e predisseram valores de  $\Delta p_{mvf}$  no leito vibrofluidizado. Eles propuseram a seguinte correlação empírica válida para  $\Gamma > 1$ :

$$\Delta p_{mvf} = \Delta p_{mf} (\Gamma)^{-n} \quad (8)$$

onde

$$n = 0,15 + 24,17d_p \rho_p \quad (9)$$

Trabalhos posteriores conduzidos por Mushtayev *et al.* (1972), proporcionaram o seguinte valor para n

$$n = 0,41 + 19,6d_p \rho_p \quad (10)$$

A discrepância nos resultados obtidos por estes autores (comparando n nas Equações 9 e 10) é atribuída ao fato de que a altura do leito e a forma da partícula, duas variáveis importantes, não foram levadas em conta nestas

correlações. Experimentos feitos por estes autores mostram que o efeito da vibração sobre a dinâmica do leito inicia a baixos valores de  $\Gamma$  (o que é, do ponto de vista energético, desejável) possibilitando operar, em alguns casos, o leito para  $\Gamma < 1$  (Gupta e Mujumdar, 1980a).

Mais tarde Chevilenko *et al.* (1979) publicaram outra correlação para  $\Delta p_{mvf}$ :

$$\Delta p_{mvf} = (\rho_p (1 - \varepsilon) H_0) 1,967 (d_p)^{0,11} \left( \frac{H_0}{D} \right)^{0,18} (\Gamma)^{0,51} \quad (11)$$

onde não informam precisamente como foi definido  $\Delta p_{mvf}$ . Contudo, esta equação é referenciada extensivamente em outros trabalhos.

Gupta e Mujumdar (1980a), observaram experimentalmente em toda faixa de condições de operação por eles estudada, que a queda de pressão para o leito vibrofluidizado é sempre menor que para o leito fluidizado. Eles observaram que a densidade das partículas utilizadas no estudo não afetou significativamente os valores de  $\Delta p_{mvf}$  obtidos, os quais foram mais dependentes da altura estática do leito e do  $\Gamma$ . Eles correlacionaram os resultados de seu trabalho pela seguinte expressão:

$$\frac{\Delta p_{mvf}}{\Delta p_{mf}} = 1 - 0,0935 \left( \frac{d_p}{L} \right)^{0,946} (\Gamma)^{0,606} (\varphi)^{1,637} \quad (12)$$

onde  $\Delta p_{mvf}$  corresponde ao patamar superior da curva de vibrofluidização. Esta equação foi obtida para frequências mais altas, superior a um certo limite, abaixo do qual a vibração não tem muita influência sobre a queda de pressão. Eles observaram que as partículas esféricas são mais afetadas pela vibração, do que as de forma irregular. Um melhoramento da Equação 12, pode ser conseguido com a inclusão da relação de densidades,  $(\rho_p/\rho_g)$ .

Em todas as correlações descritas anteriormente, a máxima redução na queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização ficou em torno de 20 a 30%, comparando com o leito fluidizado.

Outras correlações, obtidas por diversos pesquisadores para  $\Delta p_{mvf}$  podem ser encontradas também nos trabalhos de Erdész *et al.* (1986), Della Tonia Jr. (1990) e Erdész (1990).

### 2.2.3 Curvas de desvio padrão das medidas de queda de pressão

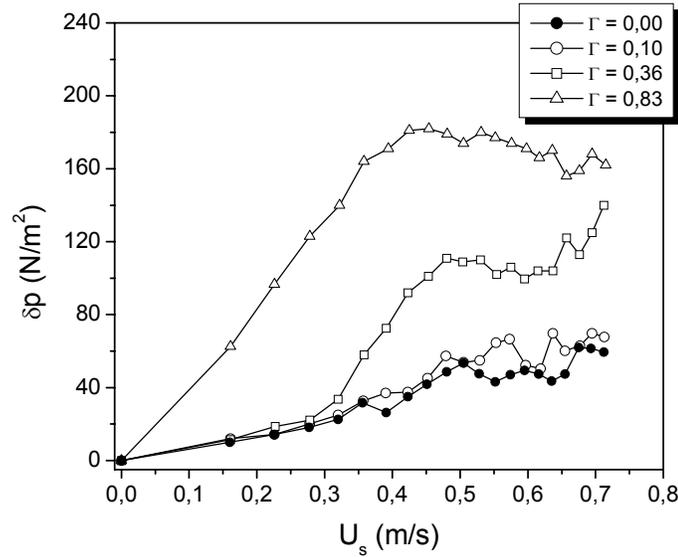
Alguns autores utilizam transdutores de pressão para medir a queda de pressão no leito, e cada ponto coletado em um sistema de aquisição de dados é, por exemplo, a média de um conjunto de pontos obtidos em um pequeno intervalo de tempo. Deste conjunto obtém-se estatisticamente o desvio padrão. Através do uso de transdutores e da medida do desvio padrão é possível observar as flutuações na queda de pressão, as quais geralmente não são detectadas visualmente nos manômetros de coluna d'água (Garim, 1998).

Garim (1998), introduziu a metodologia de análise das curvas características através das curvas de desvio padrão da medida da queda de pressão no leito. Ele utilizou esferas inertes de vidro tipo “ballotini” com  $d_p = 1,1 \times 10^{-3}$  m

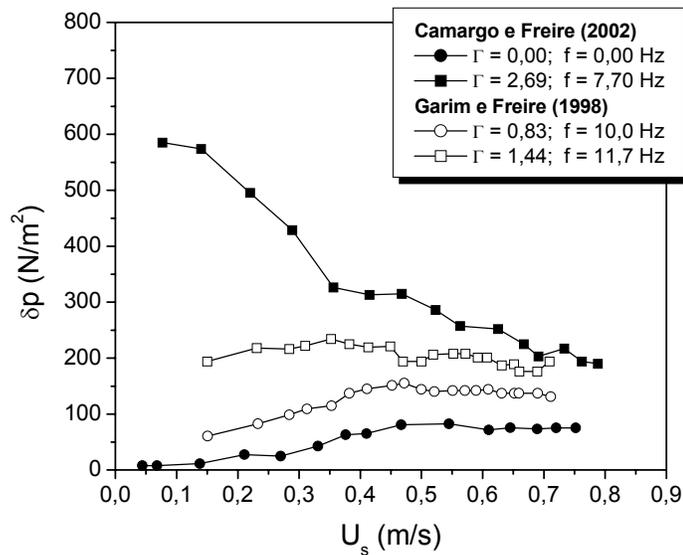
e intervalo de  $\Gamma$  de 0 a 1 em um leito retangular. Observou que através das curvas de desvio padrão pode-se obter uma boa representação das mudanças que ocorrem na resistência do leito devido à permeabilidade, ao movimento das partículas e à formação de bolhas originárias do escoamento do ar através do leito, e também da vibração do sistema. Constatou que as curvas de desvio padrão são independentes da altura do leito de partículas para o leito fluidizado e o desvio padrão aumenta com o aumento de  $\Gamma$ . Na Figura 2.6, é possível determinar as condições nas quais a vibração imposta é predominante em relação à força exercida pelo escoamento do ar através do leito. Para baixos valores de  $\Gamma$ , comparando com o leito fluidizado, ele observou que o efeito do escoamento de ar é predominante. Para maiores valores de  $\Gamma$ , há uma grande diferença do desvio padrão da queda de pressão, mostrando que a força vibracional exerce maior influência nas características fluidodinâmicas do leito.

Camargo e Freire (2002), realizaram medidas semelhantes às feitas por Garim (1998), utilizando um leito vibrofluidizado cilíndrico, com inertes esféricos de vidro ( $d_p = 0,7 \times 10^{-3}$  m) e  $\Gamma$  variando entre 0 a 6,6. Além do que Garim (1998) observou, eles ainda concluem que a utilização de maiores alturas de leito resulta em maiores valores de desvio padrão para o leito vibrofluidizado. Para altos valores de velocidade de ar, o comportamento da flutuação de pressão independe do valor de  $\Gamma$ , e quando a aceleração vibracional é igual a aceleração gravitacional ( $\Gamma=1$ ), a flutuação de pressão independe da velocidade do ar. Na Figura 2.7, Camargo e Freire (2002), compararam seu trabalho com o de Garim e Freire (1998), e observaram que para  $\Gamma$  maior que 1, o aumento da velocidade do ar resulta na diminuição do desvio padrão. Para  $\Gamma$  menor que 1 há inicialmente um

leve aumento no desvio padrão, e posteriormente alcançando um valor praticamente constante.



**Figura 2.6:** Desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, parametrizado em  $\Gamma$ ; esferas de vidro;  $A = 1,95 \times 10^{-3}$  m;  $d_p = 1,10 \times 10^{-3}$  m;  $H_0 = 0,09$  m; (Garim, 1998).



**Figura 2.7:** Desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado em  $\Gamma$ ;  $H_0 = 7,0 \times 10^{-2}$  m; Camargo e Freire (2002):  $d_p = 2,6 \times 10^{-3}$  m; Garim e Freire (1998):  $d_p = 1,10 \times 10^{-3}$  m.

#### 2.2.4 Porosidade

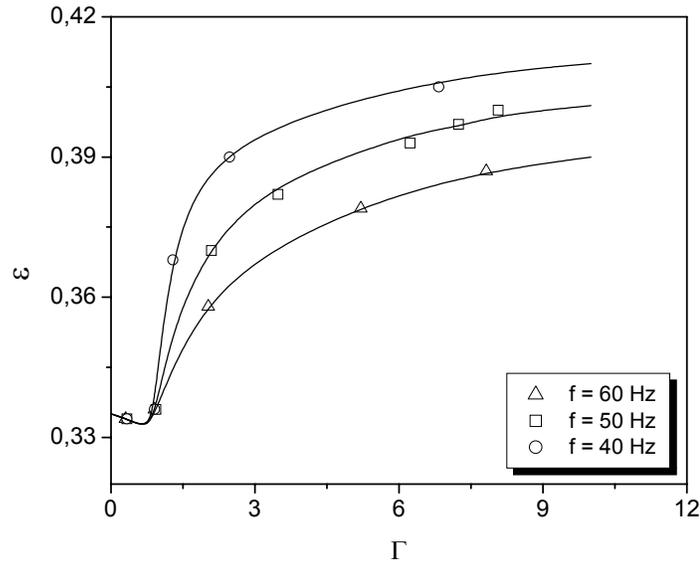
Em um leito vibrado (sem escoamento de ar), Kröll (1955) encontrou que a porosidade média do leito de partículas era dependente das condições vibracionais e das propriedades das partículas. Ele obteve, para um leito composto por areia do mar ( $d_p = 1,3 \times 10^{-4}$  m), a redução na porosidade com o aumento da aceleração vibracional, até o ponto em que ocorreu uma inversão no comportamento, tendo como consequência a expansão contínua do leito.

Chlenov e Mikhailov (1965), também utilizando leitos vibrados, comprovaram que a fração de vazios depende da aceleração vibracional imposta ao leito. Na Figura 2.8 é possível observar o comportamento da porosidade do leito com a aceleração vibracional, parametrizado na frequência de vibração. Eles verificaram que, quando a aceleração vibracional é menor que a aceleração gravitacional, ocorre compactação do leito. Por outro lado, quando a aceleração vibracional supera a gravitacional, a porosidade aumenta e ocorre a expansão do leito. Também verificaram que, para um valor constante de aceleração vibracional, a maior expansão do leito ocorre para maiores amplitudes e menores frequências do que para o caso contrário. As curvas relatadas foram medidas para areia de quartzo ( $d_p = 2,10 \times 10^{-4}$  a  $3,55 \times 10^{-4}$  m e  $H_0 = 0,040$  m).

Thomas *et al.* (1987), trabalharam com partículas finas, particularmente coesivas e encontraram comportamento diferente ao esperado, pois ocorreu a compactação do leito para  $\Gamma$  ainda muito maior que 1.

Kröll (1955) observou que para partículas de licopódio em pó ( $d_p = 0,3 \times 10^{-4}$  m), vibrados a 30 Hz, a compactação ocorreu sobre uma grande faixa de amplitudes. A observação destes comportamentos 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.



**Figura 2.8:** Porosidade do leito em função do  $\Gamma$  parametrizado na frequência de vibração; areia de quartzo; (Chlenov e Mikhailov, 1965).

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

$$\varepsilon = 0,395 \text{Re}_v^{-0,073} \left( \frac{A}{d_p} \right)^{0,006} (\Gamma)^{0,094} \left( \frac{M}{D^3 \rho_p} \right)^{0,138} \quad (13)$$

onde:

$$\text{Re}_v = \frac{\rho_p d_p A \omega}{\mu_p} \quad (\text{número de Reynolds vibratório}) \quad (14)$$

A Equação 13 é válida para leito com vasos cilíndricos e foi obtida utilizando carboneto de silicone em pó na seguinte faixa de parâmetros:  $\rho_p = 3300 \text{ kg/m}^3$ ;  $d_p = 0,8 \times 10^{-4}$  a  $1,6 \times 10^{-4} \text{ m}$ ;  $f = 30$  a  $60 \text{ Hz}$ ;  $A = 0,1 \times 10^{-3}$  a  $0,3 \times 10^{-3} \text{ m}$ ;  $M/D^3 \rho_p = 0,2$  a  $0,1$ .

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

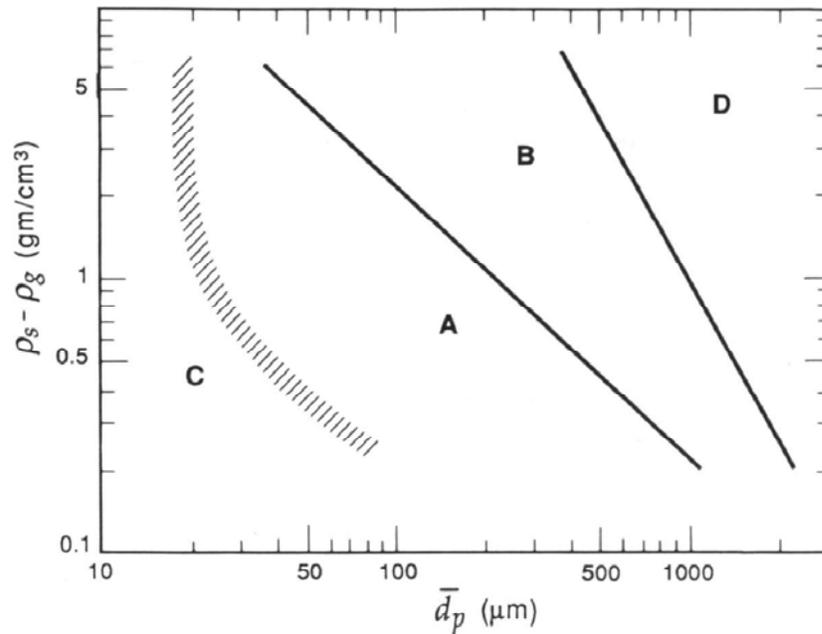
### 2.3 Classificação das Partículas

O método mais freqüentemente encontrado na literatura para classificação de partículas foi proposto por Geldart (1973), cuja classificação é clara e fácil de ser utilizada, para qualquer sólido de densidade ( $\rho_s$ ) e diâmetro médio de partícula ( $d_p$ ) ambos conhecidos, e utilizando o diagrama da Figura 2.9, é possível determinar a que grupo pertence o sólido. 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 ( $\rho_s - \rho_g$ ). 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, através 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 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  $1400 \text{ kg/m}^3$ ). 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* é característico. Partículas deste tipo são geralmente utilizadas em processos de craqueamento catalítico (FCC).

As partículas do **grupo B** são de tamanho grande, e o sólido com esta classificação mais comumente utilizado é a areia com tamanho entre  $0,4 \times 10^{-4}$  e  $5 \times 10^{-4}$  m e densidade entre 1400 e  $4000 \text{ kg/m}^3$ . 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.



**Figura 2.9:** Diagrama de Geldart para classificação de partículas para o ar em condições ambientes; (Geldart, 1973).

O **grupo D** é composto por partículas relativamente grandes e/ou muito densas. A fluidização destes sólidos é dificultada por causa da forma 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 destes 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, entre outros.

## 2.4 Secagem de Pastas

Freire (1992), faz 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, afirmando que apesar dos inúmeros trabalhos publicados, a secagem ainda não deixa de ser uma “arte”, já que esta é uma operação bastante complexa, devido principalmente à diversidade de pastas com características distintas.

Das definições utilizadas para pasta, Weltman (1960) 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) classifica 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.

Quando um material do tipo pasta é desidratado sobre a superfície de partículas inertes (por exemplo, esferas de vidro), ocorrem, continuamente, alterações qualitativas nas propriedades mecânicas da camada do produto, à medida que seu conteúdo de umidade vai diminuindo (Reger *et al.*, 1967).

O princípio da secagem sobre as partículas inertes baseia-se na renovação da película de pasta, devido à colisão e abrasão causadas pelo movimento e choque das partículas do inerte. No início do processo de secagem, o filme encontra-se ainda no estado líquido e as forças de coesão entre as partículas do filme, devido à presença de água, são muito grandes e o filme deforma pela movimentação das partículas inertes, em vez de ser destruído pela abrasão. Quando o material vai secando, ou seja, o filme aquoso não mais se faz presente, as forças que aglomeram as partículas sólidas são forças de coesão, mais frágeis, e a colisão causada pela movimentação das partículas inertes é responsável pela abrasão que destrói a película sobre as partículas, gerando o pó, que é “arrastado” por transporte pneumático.

Desta forma, o processo de secagem pode ser dividido em duas fases: a primeira, que é determinada pela cinética da secagem e a segunda, pela abrasão do filme seco pela movimentação das partículas inertes. De acordo com as propriedades do material a ser seco, qualquer uma das duas fases pode ser a limitante do processo de obtenção do pó. Se a fase de secagem é a limitante e o seu curso é determinado pela velocidade de evaporação de água, este processo é viável tecnicamente. Se a etapa limitante for devido à abrasão, o processo é inviável, visto que o filme do material irá crescer criando um colapso no leito (Reger *et al.*, 1967).

Se a taxa de secagem for suficientemente alta para não limitar o processo, o número de colisões efetivas deve ser alto o bastante para que a taxa de remoção do filme não seja excedida pela taxa de recobrimento de pasta (Barret e Fane, 1990); caso contrário, a quantidade de material úmido no leito aumentaria

tanto que a circulação das partículas seria interrompida devido à aglomeração das partículas. O regime permanente é alcançado quando a taxa de recobrimento dos inertes for igual à taxa de remoção do filme.

A taxa de remoção do filme depende de sua força de adesão ao inerte, que por sua vez depende de sua friabilidade, que é afetada pela umidade e composição da pasta e do número de colisões efetivas das partículas. Essas colisões são dependente dos seguintes fatores:

- circulação de sólidos, que fornece o tempo em que os inertes serão novamente recobertos e a energia de colisão que por sua vez são controladas por fatores como vazão de ar, altura de inertes e aceleração vibracional caso seja um leito vibrofluidizado;
- massa da pasta por massa de inerte, que é controlada pela vazão de alimentação de material e pela altura do leito de inerte e
- taxa de secagem, já que com uma secagem mais rápida, a friabilidade do filme aumenta mais rapidamente.

Collares (2001) estudou o comportamento de pastas alimentícias, durante a secagem em equipamentos que usam corpos inertes como coadjuvante, feito indiretamente, com a distribuição do filme uniformemente sobre placas sólidas. Utilizou pastas feitas de goma arábica, maltodextrina e melaço de cana de açúcar, como aditivo sacarose e como superfície de aderência, lâmina de vidro, aço inoxidável, Teflon e Nylon. Seus resultados indicam que o fenômeno de desprendimento da película de pasta seca da superfície de um sólido é governado pela temperatura de transição vítrea do material do filme, e quanto menor for esta,

mais seca deverá estar a película para que um auto desprendimento ocorra. Verificou também que a espessura da película úmida e a concentração inicial da pasta não influenciaram significativamente as condições de desprendimento. O aumento da rugosidade do suporte à pasta, torna mais difícil o desprendimento da mesma. O uso de Nylon como suporte, resultou em maior facilidade de desprendimento (influência do tipo de material, com a rugosidade implícita) e a ação da compressão e atrito, simulando um caso real no secador, tende a facilitar a sua remoção.

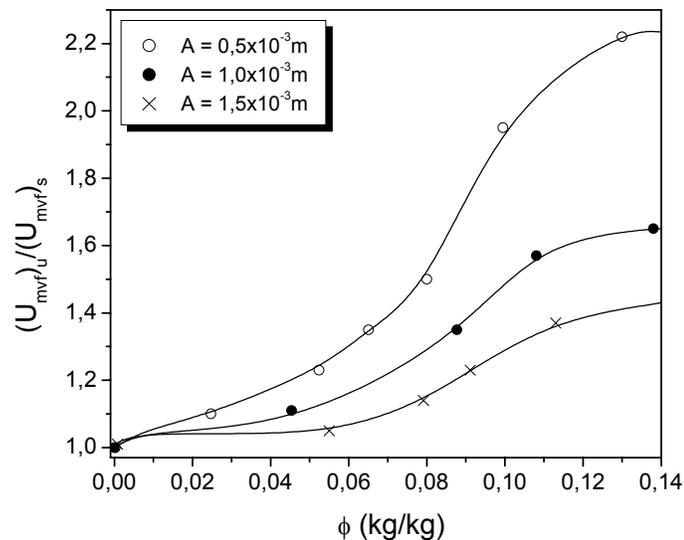
## **2.5 Secagem em Leito Vibrofluidizado**

A maioria dos estudos realizados e publicados sobre secagem em leito vibrofluidizado trata da secagem do material propriamente dito nas mais diversas formas (pedaços, fatias e particulados), sem a utilização de inertes como suporte e avaliando principalmente a cinética da secagem e a qualidade do produto final. Alguns exemplos destes materiais são: açúcar (Ereshchenko, 1965), lactose granulada (Valchář *et al.*, 1967), farelo de arroz (Fito *et al.*, 1975; Fito *et al.*, 1977), carbonato de cálcio (Pakowski e Strumillo, 1980), peneiras moleculares e sílica gel (Gupta *et al.* 1980; Khalid e Mujumdar, 1982; Borde *et al.*, 1996), alumina (Shuhong, *et al.*, 1994), cebola em fatias (Finzer, 1984), chá (Shah e Goyel, 1995), arroz cozido (Ramesh e Srinivasa Rao, 1996; Ramesh *et al.*, 1996), sal de cozinha (Li e Pan, 1996; Borde *et al.*, 1996), sementes de vegetais (Pang *et al.*, 1996), semente de papoula (Stakić *et al.*, 1996), farinha de soja (Alvarez e Reyes, 1997), raiz de Moyu fatiada (planta herbácea chinesa) (Pan *et al.*, 1997a), cenoura (Pan *et al.*, 1997b; Brod, *et al.*, 1998; Pan *et al.*, 1999), persulfato de

potássio (Jinescu *et al.*, 1998), banana em fatias (Cardoso, 1998; Cardoso e Kieckbusch, 1998), albumina (Liu *et al.*, 1998) e casca de ovo (Brod, 1999). Um número menor de trabalhos reserva-se a estudos fluidodinâmicos utilizando partículas inertes recobertas com a pasta em leito vibrofluidizado e alguns destes trabalhos estão discutidos nos tópicos seguintes.

### 2.5.1 Secagem de pastas em leito vibrofluidizado

Chevilenko *et al.* (1979) mostram a dependência da  $U_{mvf}$  com a saturação de água ( $\phi$ ), definida como razão da massa de água por massa de inertes secos, como mostra a Figura 2.10. É possível deduzir desta figura, que o aumento da saturação de água no leito provoca o aumento na  $U_{mvf}$ , e esse aumento é atenuado pelo aumento de  $\Gamma$ , mantendo-se a frequência constante.



**Figura 2.10:**  $(U_{mvf})_u / (U_{mvf})_s$  em função da saturação de água no leito parametrizada em  $A$ ; (Chevilenko *et al.*, 1979).

Na Figura 2.10,  $(U_{mvf})_u$  e  $(U_{mvf})_s$  referem-se respectivamente a velocidade mínima de vibrofluidização para o inerte recoberto com “pasta” e velocidade mínima de vibrofluidização para o inerte seco.

Erdész e Ormós (1985) utilizaram um leito vibrofluidizado com geometria cilíndrica, altura de 0,5 m e diâmetro da coluna de 0,11 m construído em vidro e usaram dois tipos de partículas inertes, areia de quartzo e coríndon. O coríndon, comumente chamado de alumina ( $Al_2O_3$ ), é abrasivo e a sua densidade é cerca de 1,5 vezes maior que a da areia de quartzo. Como pastas para recobrimento dos inertes, foram utilizados Rigeccocin, que é uma base para material veterinário centrifugado (umidade inicial de 35%) e um gel de hidróxido de alumínio (umidade inicial de 75%). Para estes materiais, a massa de inertes utilizada foi de 1 kg para  $\Gamma$  variando entre 0 a 9,10. Os autores avaliaram a influência do tamanho e da densidade dos inertes, temperatura e vazão do ar na entrada e do  $\Gamma$  sobre o comportamento do processo de secagem de pastas, e concluíram que o aumento do tamanho e da densidade das partículas inertes (de areia para alumina) pode melhorar consideravelmente a eficácia da operação de secagem, atribuindo 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. A eficiência da secagem pode ser melhorada também 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, a vazão de ar também pode ser reduzida consideravelmente, sendo esta necessária somente para transportar a umidade, e conseqüentemente, a eficiência da secagem pode ser aumentada com a manutenção da vazão.

Novy e Kieckbusch (1987) utilizaram um leito vibrofluidizado de geometria cilíndrica, construído em PVC com altura de 0,23 m e diâmetro de coluna de 0,145 m, e usaram como inertes esferas de vidro com diâmetro de  $4 \times 10^{-3}$  e  $20 \times 10^{-3}$  m. Os autores analisaram o efeito da temperatura do ar de entrada, concentração da alimentação e tamanho dos inertes sobre o comportamento da secagem de leite em pó reconstituído. Analisando os parâmetros citados, observaram que o diâmetro dos inertes provocou maior influência sobre a taxa de secagem e que a influência da temperatura do ar e da concentração do leite na alimentação do leito foi 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 destas. Quanto à concentração de leite em pó na água, observaram que quanto maior é esta concentração, maior é a tendência à formação de canais preferenciais e blocos rígidos (para partículas de menor diâmetro), dificultando o processo de secagem. Quando é adicionada sobre as partículas pasta com menor concentração de leite (cerca de 10%), primeiro observaram o completo recobrimento das partículas, mas quando secas, o leite não se desprende das partículas.

Pan *et al.* (1995) utilizaram um leito vibrofluidizado de geometria cilíndrica, construído em acrílico com diâmetro de 0,24 m, altura de 0,55 m e  $\Gamma$  máximo igual a 5. As partículas inertes usadas foram farelo de trigo (material

poroso) e areia do mar (material não poroso), e como pasta, uma suspensão de bactérias fotossintéticas altamente sensíveis à temperatura. Inicialmente observaram que para os sólidos porosos era possível saturar o leito com pasta até umidade de cerca de 50% (base úmida) sem que ocorressem aglomerações durante a operação, enquanto que para o recobrimento da areia com pasta era possível cerca de 20% (base úmida). Também observaram que a secagem em leito vibrofluidizado (batelada e contínuo) permite o processamento de pastas com menor exigência de vazão de ar, quando comparado com o leito fluidizado convencional e que a vibração mecânica facilita a fluidização, previne segregação e reduz o atrito.

Foram encontrados na literatura alguns trabalhos em leito vibrofluidizado com inertes que utilizam como “pasta” o glicerol, que, como é o objeto de estudo deste trabalho serão discutidos no próximo item.

#### *2.5.1.1 Operação do leito vibrofluidizado com o glicerol*

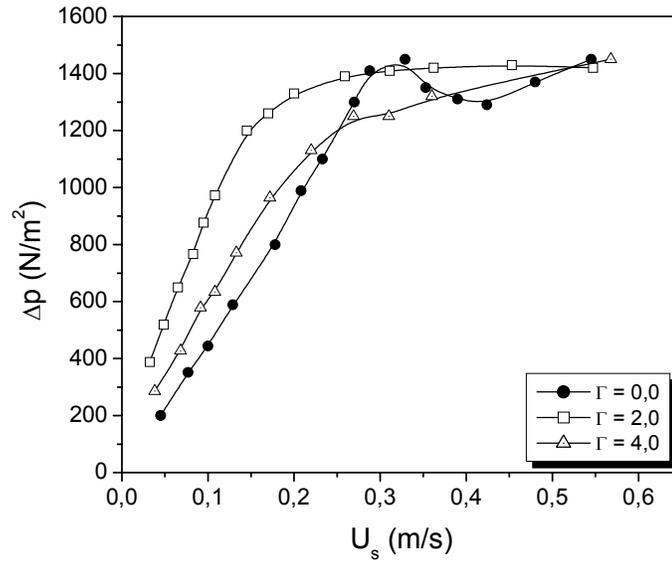
Para a realização de estudos em leitos “moveis” do tipo fluidizado, vibrofluidizado e de jorro em presença de uma pasta, alguns pesquisadores utilizam para simular a presença do filme sobre os inertes o glicerol, por tratar-se de uma substância de baixa pressão de vapor (praticamente não evapora nas condições de trabalho), ser relativamente comum, não tóxico e bem estudado. Outro fator considerado é que a sua viscosidade altera-se consideravelmente sob o efeito da temperatura, possibilitando o estudo das forças viscosas em uma ampla faixa.

Pakowski e Mujumdar (1980) utilizaram um leito vibrofluidizado de geometria retangular (0,2 x 0,2 m), construído em acrílico, operando com partículas inertes de vidro ( $0,454 \times 10^{-3}$  e  $0,667 \times 10^{-3}$  m e  $H_0 = 0,08$  m) recobertas com glicerol. Trabalharam com a temperatura constante no intervalo de 60 a 100°C, amplitude de vibração e saturação de glicerol (massa de glicerol por massa de inertes) de 0,0000, 0,00015, 0,0003 e 0,0006. Estudaram a transferência de calor de um cilindro vertical imerso no leito e conseqüentemente a dinâmica das partículas sob influência deste líquido no leito.

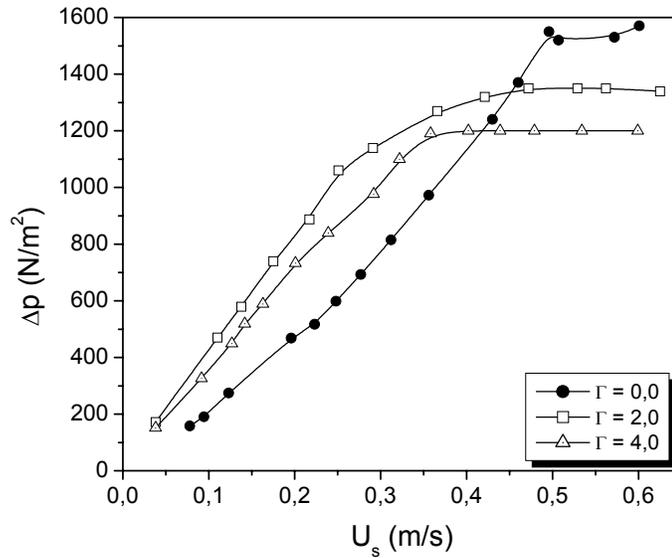
Malhotra *et al.* (1984) estudaram a fluidodinâmica de um leito vibrofluidizado retangular (0,20 x 0,05 m), com partículas inertes de vidro ( $0,353 \times 10^{-3}$  e  $0,667 \times 10^{-3}$  m e  $H_0$  entre 0,095 e 0,12 m) recobertas com glicerol. A temperatura utilizada foi a ambiente, amplitude de 0,0425 m,  $\Gamma$  variando de 0 a 4 e  $\phi$  de 0,000, 0,003 e 0,006.

Inicialmente, Malhotra *et al.* (1984) observaram fluidização para valores de  $\phi$  até 0,0006 mesmo sem a ajuda da vibração, só que esta fluidização foi bastante pobre e caracterizada por movimentos ascendentes localizados (*channelling*). Acima desta saturação de glicerol, não foi possível fluidizar o material sem a ajuda de intensa vibração ( $\Gamma > 4$ ). Para a utilização do leito sem a adição de líquido, obtiveram curvas características semelhantes às normalmente encontradas na literatura, e observaram que o leito compacta com o aumento da intensidade de vibração até  $\Gamma$  próximo de 2, e acima deste valor, o leito começa a se expandir. Nas Figuras 2.11, 2.12 e 2.13 é possível observar que para o leito fluidizado ( $\Gamma = 0$ ), o comportamento das curvas é semelhante ao obtido para o caso fluidizado convencional (sem a adição de líquido). Ainda para estas curvas,

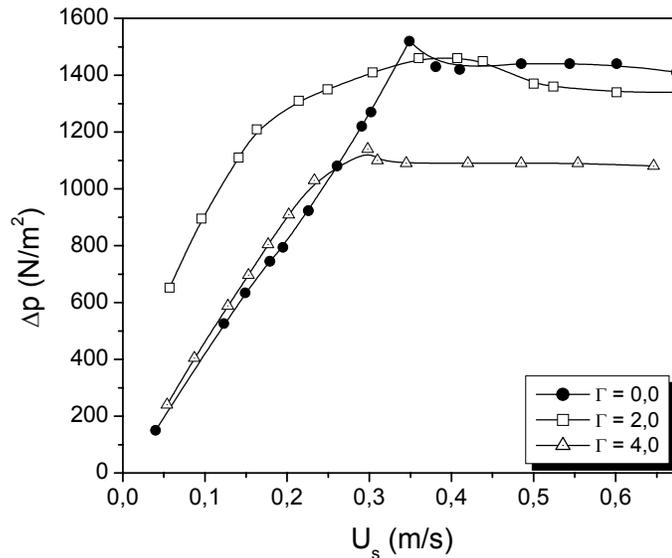
observaram que a adição de líquido praticamente dobrou o valor da velocidade mínima de fluidização e as curvas tornaram-se levemente mais “suaves”. Quando foi adicionada a vibração sobre o leito fluidizado em presença de glicerol, as curvas características tornaram-se “suaves” (sem “rampa”), e a queda de pressão observada foi sempre maior, resultado válido até  $U/U_{mf} \leq 1,0$ . Na análise da influência da saturação de líquido, (comparando as Figuras 2.11 e 2.13), observaram uma grande diferença no patamar de queda de pressão, e esta diferença foi mais pronunciada com o aumento do grau de aderência (*stickiness*), isto é, aumento de  $\phi$ . Para valor de saturação 0,006 no leito fluidizado (Figura 2.13), a fluidização tornou-se irregular, com a movimentação monotônica das partículas e bloqueando a passagem do ar. Com a aplicação da vibração (para  $\Gamma > 1$ ) os efeitos de *channelling* foram quase imperceptíveis. A influência do aumento do diâmetro dos inertes (comparando as Figuras 2.11 e 2.12), mostra um alongamento das curvas (suavização) para as partículas de maiores diâmetros e conseqüente aumento no valor da  $U_{mf}$ .



**Figura 2.11:**  $\Delta p$  em função de  $U_s$  parametrizado em  $\Gamma$ ; esferas de vidro;  $d_p = 3,53 \times 10^{-2}$  m;  $H_0 = 0,095$  m;  $\phi = 0,003$ ; (Malhotra *et al.*, 1984).



**Figura 2.12:**  $\Delta p$  em função de  $U_s$  parametrizado em  $\Gamma$ ; esferas de vidro;  $d_p = 6,67 \times 10^{-2}$  m;  $H_0 = 0,095$  m;  $\phi = 0,003$ ; (Malhotra *et al.*, 1984).



**Figura 2.13:**  $\Delta p$  em função de  $U_s$  parametrizado em  $\Gamma$ ; esferas de vidro;  $d_p = 3,53 \times 10^{-2}$  m;  $H_0 = 0,095$  m;  $\phi = 0,006$ ; (Malhotra *et al.*, 1984).

## 2.6 Influência do Glicerol no Comportamento do Leito de Jorro

Devido ao fato de ainda existirem poucos trabalhos sobre a análise da presença do glicerol na fluidodinâmica de um leito vibrofluidizado, será feita aqui um resumo do que acontece com a presença desse líquido em um leito de jorro.

Patel *et al.* (1986) utilizaram um leito de jorro com geometria cônico-cilíndrico construído em vidro, com diâmetro da entrada de ar de 0,02 m, diâmetro da coluna cilíndrica de 0,15 m, altura de 1,00 m e ângulo da base cônica de  $60^\circ$ , e as partículas inertes usadas estão apresentadas na Tabela 2.1. Os autores fizeram medidas da queda de pressão em jorro estável, da velocidade mínima de jorro, da velocidade do ar na região de jorro e da altura da fonte, alimentando em batelada glicerol e água destilada no leito.

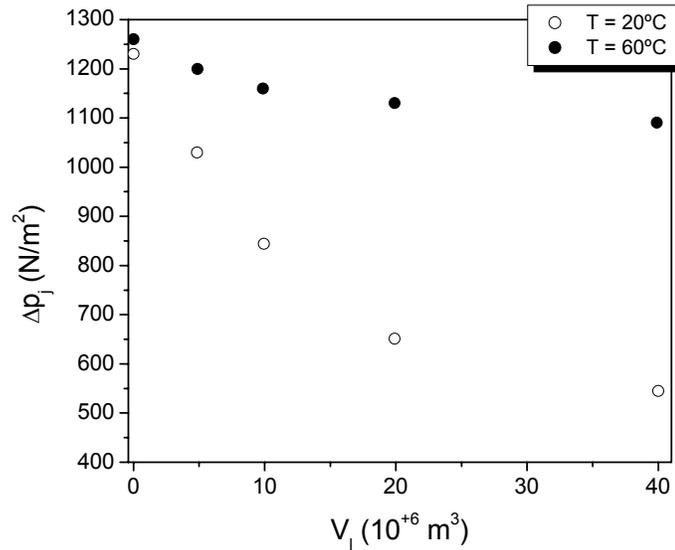
**Tabela 2.1:** Propriedades das partículas inertes (Patel *et al.*, 1986).

| Partículas        | Diâmetro ( $10^{+3}$ m) | Densidade ( $\text{kg/m}^3$ ) | Forma      |
|-------------------|-------------------------|-------------------------------|------------|
| vidro “ballotini” | 5,0                     | 2836                          | esférica   |
| resina acrílica   | 5,0                     | 1137                          | esférica   |
| PVC               | 4,1                     | 1303                          | cilíndrica |
| ABS               | 4,6                     | 935                           | irregular  |

Patel *et al.* (1986) analisaram algumas curvas características, usando esferas de vidro e cilindros de PVC como partículas inertes, sem a presença de líquido, e observaram que a velocidade incipiente e a velocidade mínima de jorro de um leito de esferas de vidro são praticamente as mesmas, o que não acontece em um leito de cilindros de PVC. Concluíram que a transição entre os estados jorro e não-jorro é muito mais gradual em partículas esféricas que em partículas não esféricas, e a fonte aparece e desaparece na mesma velocidade.

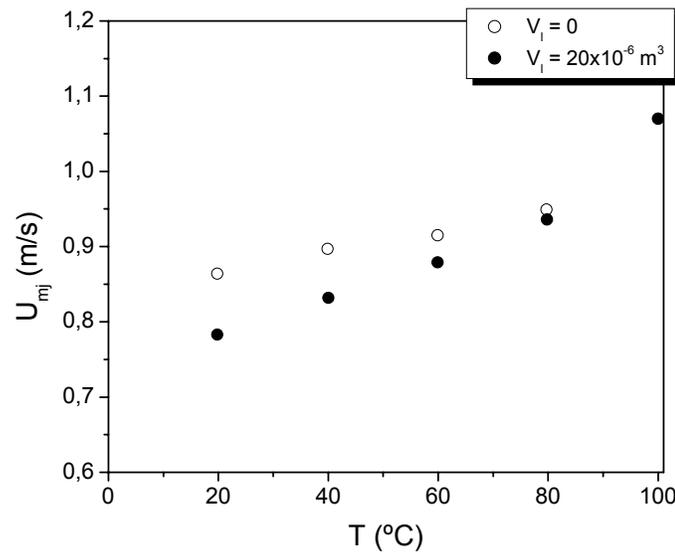
A Figura 2.14, mostra a queda de pressão em jorro para um leito de inertes de vidro em função do conteúdo de líquido a 20 e 60°C. Esta figura mostra que a queda de pressão em jorro estável diminui quanto maior o volume alimentado de glicerol e este efeito é mais pronunciado na menor temperatura. Patel *et al.* (1986) relatam que este comportamento da queda de pressão é provocado pelas forças coesivas entre as partículas, fazendo com que menos partículas sigam da região anular para a região de jorro, e conseqüentemente, menor é a resistência à passagem de ar. Essas forças interpartículas são mais efetivas a 20°C, onde a viscosidade do glicerol é mais alta do que a 60°C e observa-se, para a primeira temperatura, uma grande redução da queda de pressão

com o conteúdo de líquido. Um comportamento similar foi obtido para todas as outras partículas.



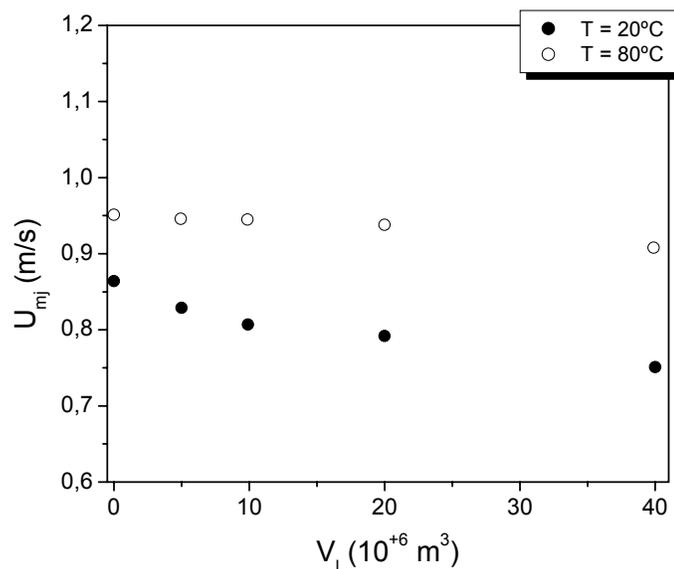
**Figura 2.14:** Queda de pressão em jorro estável em função do volume de glicerol alimentado no leito, parametrizado na temperatura; esferas de vidro;  $H_0 = 0,15 \text{ m}$ ; (Patel *et al.*, 1986).

A Figura 2.15 apresenta a velocidade mínima de jorro para partículas de PVC a diferentes temperaturas. Nesta figura é possível verificar que a velocidade mínima de jorro aumenta à medida que a temperatura aumenta, independente da presença de glicerol.



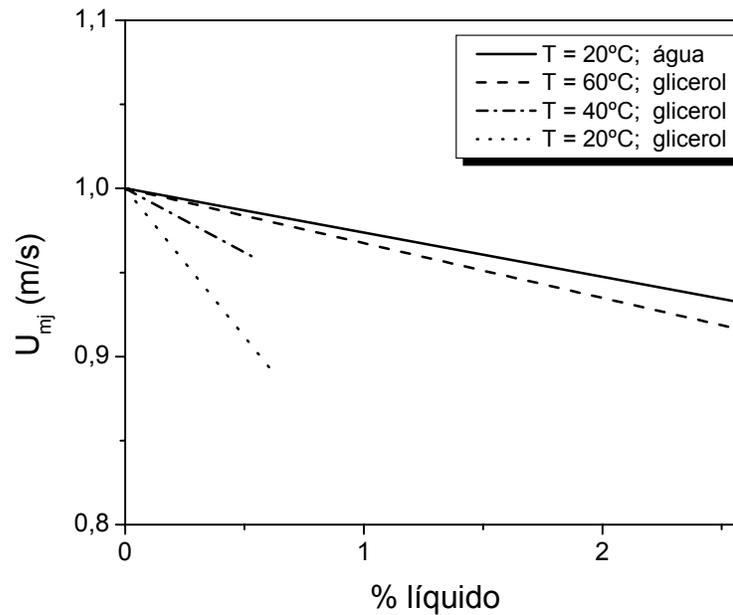
**Figura 2.15:** Velocidade mínima de jorro em função da temperatura parametrizado no volume de glicerol alimentado no leito; PVC;  $H_0 = 0,15$  m; (Patel *et al.*, 1986).

Na Figura 2.16 pode-se observar o comportamento da velocidade mínima de jorro com o aumento do volume de glicerol alimentado no leito para 20 e 80°C. A velocidade mínima de jorro diminui com o aumento do grau de aderência, provocado pelo aumento do volume de glicerol alimentado; este efeito é menos pronunciado a 80°C, indicando que quanto maior é a temperatura menor é a influência do glicerol. Segundo Patel *et al.* (1986), o aumento da viscosidade do glicerol (provocado pela redução da temperatura) e/ou o aumento do grau de aderência (provocado pelo aumento do volume de glicerol alimentado) tornam maiores as forças interpartículas, impedindo as partículas de migrarem para região de jorro e, com menos partículas, menor é a exigência de ar para sustentar o jorro, diminuindo a velocidade mínima de jorro.



**Figura 2.16:** Velocidade mínima de jorro em função do volume de glicerol alimentado no leito parametrizado na temperatura; PVC;  $H_0 = 0,15 \text{ m}$ ; (Patel *et al.*, 1986).

Para reforçar as afirmações feitas por Patel *et al.* (1986) sobre a influência do conteúdo de líquido e da viscosidade sobre os parâmetros no leito de jorro, é apresentada a Figura 2.17, onde observa-se que quanto maior o conteúdo líquido e maior a viscosidade, menor a velocidade do ar na região de jorro necessária para manter a altura da fonte em 0,05 m. Nesta figura estão sendo comparados dados obtidos com água e com glicerol (líquido muito mais viscoso). Os autores ainda comentam que a água evapora em uma quantidade muito maior que o glicerol, e talvez por isso, só realizaram experimentos com água a  $20^\circ\text{C}$ , para minimizar sua evaporação.



**Figura 2.17:** Velocidade do ar na região de jorro em função do percentual de líquido parametrizado no tipo de fluido e na temperatura; (Patel *et al.*, 1986).

Analisando os resultados obtidos por Patel *et al.* (1986), pode-se dizer que para um maior conteúdo líquido, diminuiram a velocidade mínima de jorro e a velocidade do ar necessária para obter uma certa altura da fonte; isto não significa que possa ser usada uma menor vazão de ar, como parecem sugerir, a princípio, os resultados, o que diminuiria os custos do processo de secagem. Aumentando-se o conteúdo líquido, a estabilidade do jorro diminui, provocada principalmente pela aglomeração das partículas, especialmente quando são utilizados líquidos com alta viscosidade.

Schneider e Bridgwater (1993) utilizaram um leito de jorro com geometria cônico-cilíndrico construído em vidro, com diâmetro de entrada de ar de 0,02 m, diâmetro da coluna cilíndrica de 0,15 m e ângulo da base cônica de 65°. As partículas inertes usadas estão apresentadas na Tabela 2.2. Estudaram o

efeito da injeção de líquido sobre a velocidade de jorro, altura da fonte, queda de pressão no leito e estabilidade no regime de jorro, alimentando no leito em batelada glicerol e água destilada.

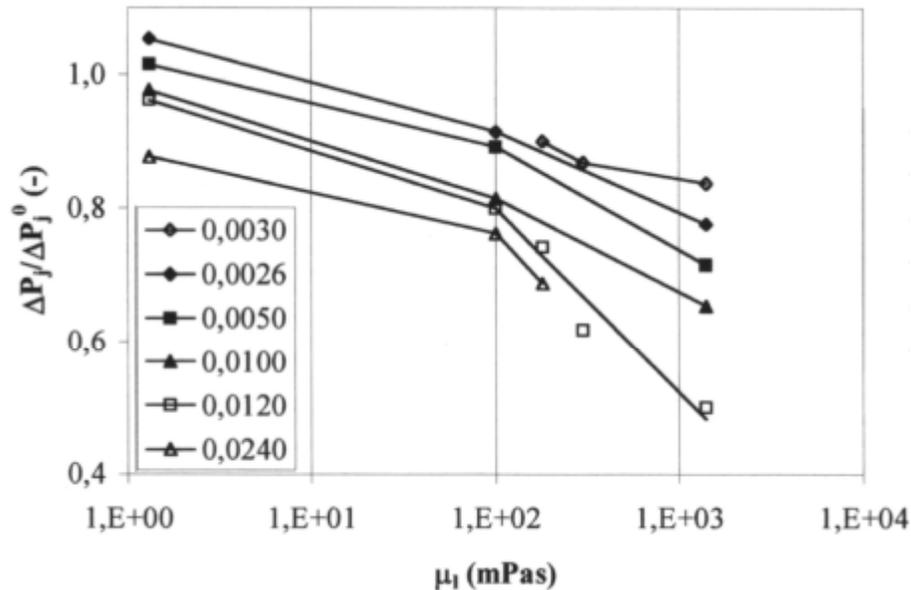
**Tabela 2.2:** Propriedades das partículas inertes (Schneider e Bridgwater, 1993).

| Partículas        | Diâmetro ( $10^{+3}$ m) | Densidade ( $\text{kg/m}^3$ ) | Forma      |
|-------------------|-------------------------|-------------------------------|------------|
| vidro “ballotini” | 5,0                     | 2840                          | esférica   |
| vidro “ballotini” | 2,0                     | 2880                          | esférica   |
| resina acrílica   | 5,0                     | 1140                          | esférica   |
| PVC               | 4,3                     | 1320                          | cilíndrica |

Schneider e Bridgwater (1993) definiram o conteúdo de líquido alimentado no leito como sendo a razão entre o volume de líquido ( $V_l$ ) e o volume total ocupado pelo leito ( $V_T$ ). Inicialmente, analisaram alguns resultados obtidos para o valor máximo de ( $V_l/V_T$ ), ou seja, do conteúdo líquido suportado pelo leito para diferentes partículas inertes e temperaturas do leito, e observaram que com o aumento da altura do leito e com a redução da viscosidade do líquido aumenta o conteúdo líquido ( $V_l/V_T$ ) máximo em que o leito permanece estável. Verifica-se também que leitos de esferas de vidro de maior diâmetro aceitam uma quantidade maior de líquido.

Através da obtenção de curvas características Schneider e Bridgwater (1993) obtiveram comportamentos semelhantes aos obtidos por Patel *et al.* (1986), em que a queda de pressão diminui à medida que o conteúdo líquido e a viscosidade do líquido aumentam. Na Figura 2.18 observa-se o decréscimo da

queda de pressão não só com o aumento do conteúdo de líquido, mas também com a elevação da viscosidade do líquido.



**Figura 2.18** Queda de pressão no leito para altura na fonte de 0,10 m em função da viscosidade do líquido alimentado parametrizado no conteúdo líquido ( $V_l/V_T$ ) e tipo de partícula inerte; símbolo cheio: PVC;  $H_0 = 0,25$  m; símbolo vazado: esferas de vidro,  $H_0 = 0,14$  m; (Schneider e Bridgwater, 1993).

Schneider e Bridgwater (1993) também analisaram a altura da fonte sob a influência do glicerol e verificaram que quanto maior o conteúdo líquido maior é a altura da fonte obtida para uma mesma velocidade do ar e quanto maior a viscosidade do líquido maior é a razão deste crescimento.

Passos e Mujumdar (2000) utilizaram um leito de jorro bidimensional de 0,20 m de comprimento e 0,015 m de largura e com um orifício de entrada do ar de 0,015 m de diâmetro. No leito foi alimentado glicerol em batelada, onde o volume de líquido alimentado foi definido como a razão entre o volume de líquido ( $V_l$ ) e o volume de partículas ( $V_p$ ). Os autores compararam seus dados com os obtidos por Santana *et al.* (1997) e Passos *et al.* (1987), que também

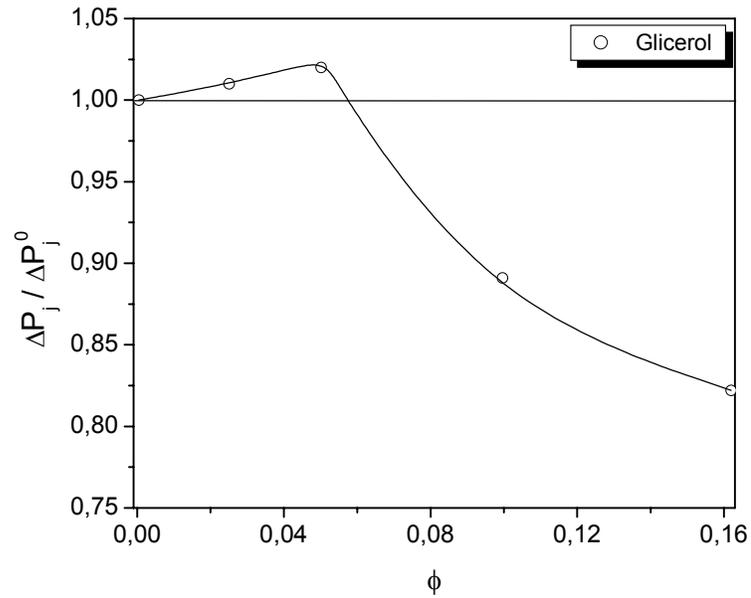
utilizaram glicerol. Passos e Mujumdar (2000) ao utilizarem partículas inertes de vidro observaram que a velocidade superficial na condição de mínimo jorro cresce quase linearmente com o aumento da concentração de glicerol e a queda de pressão na condição de mínimo jorro decresce com o aumento da concentração de glicerol. Utilizando “pellets” de plástico e polipropileno observaram que a queda de pressão em jorro estável primeiro aumenta, para em seguida diminuir com o aumento do conteúdo de líquido. Santana *et al.* (1997) sugeriram que há dois tipos de força de interação interpartícula que causam estas variações. A baixos conteúdos líquidos, como a camada de líquido é muito fina, as pontes líquidas são muito fracas, e a camada de líquido deve atuar como lubrificante, facilitando o deslocamento das partículas na região anular o que aumentaria a taxa de circulação de partículas. Como consequência, aumenta a quantidade de partículas na região de jorro e de ar que segue para a região anular, o que aumenta a queda de pressão em jorro estável. Aumentando o conteúdo líquido acima de um valor limite, a camada de líquido na superfície da partícula torna-se espessa o suficiente para promover pontes líquidas mais fortes ligando as partículas, o que diminui a taxa de circulação das mesmas. Além desse limite, a queda de pressão diminui com o aumento do conteúdo líquido.

Spitzner Neto (2001) utilizou um leito de jorro com geometria cilíndrica construído em aço inox, com diâmetro de coluna cilíndrica de 0,30 m e altura de 0,60 m, com diâmetro da entrada de ar de 0,05 m e ângulo da base cônica de 60°. As partículas inertes usadas foram esferas de vidro ( $d_p = 2,6 \times 10^{-3}$  m e  $\rho_p = 2490$  kg/m<sup>3</sup>). O autor faz a análise da fluidodinâmica do leito de jorro em função do grau de saturação de glicerol ( $\phi$ ) alimentado em batelada.

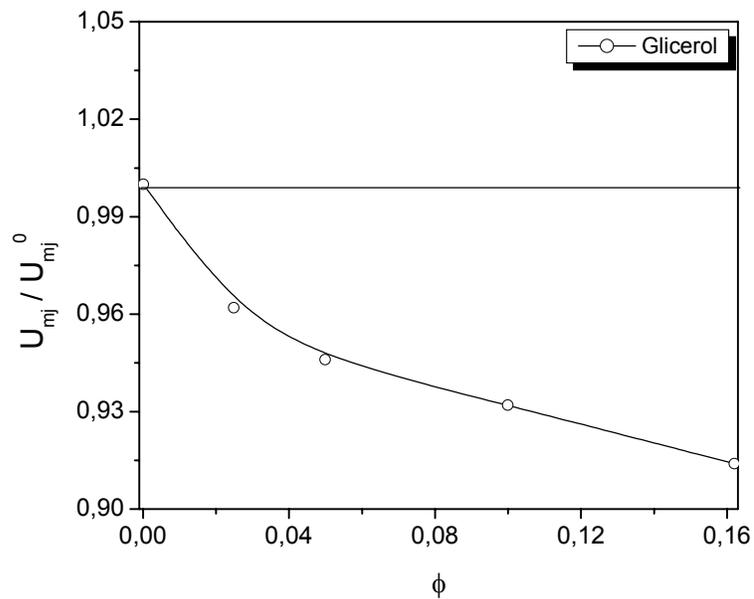
A Figura 2.19 mostra que quando foi adicionado o glicerol ao leite de jorro, para baixos valores de grau de saturação ( $\phi$ ) a queda de pressão em jorro estável aumenta com o aumento do grau de saturação até atingir um máximo em torno de 0,05. Contudo, este aumento obtido encontra-se dentro da faixa de erro experimental e admite-se que este parâmetro permanece constante quando o grau de saturação estiver na faixa entre zero e 0,05. Para altos graus de saturação, maiores que 0,05, a queda de pressão em jorro estável diminui à medida que o grau de saturação aumenta.

Já a velocidade mínima de jorro diminui com o aumento do grau de saturação de glicerol (Figura 2.20). Nesse caso, a diminuição do número de partículas e o aumento da velocidade do ar na região de jorro, devido ao aumento da fração de ar que atravessa a região de jorro, devem ser suficientemente grandes para compensar a instabilidade do jorro. Desse modo, é necessária uma vazão de ar menor para sustentar o jorro que aquela sem a presença do glicerol. Isso diminui a velocidade mínima de jorro.

Para a altura da fonte, observou-se que devido ao aumento da velocidade do ar no jorro e à diminuição do número de partículas na região de jorro, quanto maior o grau de saturação de glicerol maior é a altura da fonte para uma mesma velocidade do ar. E a altura da fonte aumenta em tal proporção que, mesmo que a velocidade mínima de jorro diminua com o aumento do grau de saturação, a altura mínima da fonte, definida como a altura da fonte numa velocidade do ar imediatamente acima da velocidade mínima de jorro, aumenta.



**Figura 2.19:** Queda de pressão em jorro estável em função do grau de saturação no leito para o glicerol; esferas de vidro;  $d_p = 2,6 \times 10^{-3}$  m; (Spitzner Neto, 2001).



**Figura 2.20:** Velocidade mínima de jorro em função do grau de saturação no leito para o glicerol; esferas de vidro;  $d_p = 2,6 \times 10^{-3}$  m; (Spitzner Neto, 2001).

Com a revisão efetuada até aqui foi possível projetar e construir o leito vibrofluidizado além de se ter uma idéia razoável do fenômeno de transferência de quantidade de movimento no sistema ar-pasta-inerte em um leito vibrofluidizado. No próximo capítulo detalhes do equipamento e do procedimento experimental utilizado serão apresentados.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 Partículas

As partículas usadas foram esferas de vidro tipo “ballotini”, escolhidas por serem de material inerte e amplamente utilizadas na literatura e em trabalhos no Centro de Secagem do DEQ/UFSCar, facilitando comparação futura dos dados encontrados. A densidade das partículas foi determinada com um picnômetro da marca Vidrolex de 50 ml calibrado e uma balança analítica GEHAKA modelo BG400 com precisão de  $5 \times 10^{-6}$  kg. A densidade obtida para estas partículas foi de  $2.500 \text{ kg/m}^3$ .

O diâmetro médio das partículas utilizadas, foi obtido por peneiramento. Foram realizados testes preliminares com partículas de diâmetro médio variando entre  $1,095 \times 10^{-3}$  até  $3,680 \times 10^{-3}$  m e observou-se que para as partículas com diâmetro médio superior a  $1,850 \times 10^{-3}$  m a fluidização era bastante irregular ou não ocorria, portanto não foram utilizadas neste trabalho. Segundo Geldart (1973) os leitos fluidizados não são bons para fluidizar partículas com diâmetro muito superiores a  $1 \times 10^{-3}$  m. Conseqüentemente, escolheu-se as partículas com diâmetro médio de peneira de  $1,095 \times 10^{-3}$ ,  $1,545 \times 10^{-3}$  e  $1,850 \times 10^{-3}$  m.

Malhotra *et al.* (1984) utilizaram em seu trabalho partículas inertes de vidro com diâmetro médio de  $0,353 \times 10^{-3}$  e  $0,667 \times 10^{-3}$  m (partículas do grupo B de Geldart), em ensaios fluidodinâmicos utilizando como “pasta” o glicerol. Visando completar o estudo destes autores serão analisadas partículas do grupo D

de Geldart. Para estas partículas, trabalhou-se com altura estática de inertes de 0,08 m, correspondendo à massa igual a 3 kg. Essa altura estática de inertes foi utilizada justamente por apresentar melhor estabilidade na fluidização, verificada através de testes preliminares.

### 3.1.2 Pasta

Como “pasta” foi utilizado o glicerol (com pureza mínima de 99,5%), que é uma substância orgânica, líquida, incolor ou ligeiramente amarelada, viscosa, adocicada e é um triálcool com fórmula química  $C_3H_8O_3$ . Também é conhecida como glicerina ou 1, 2, 3 - Propanotriol e possui massa molecular de 0,09209 kg/mol. Seu ponto de fusão é de 17,9°C e seu ponto de ebulição é de 290°C, ambos a pressão atmosférica. É muito solúvel em água e álcool e tem densidade igual a 1.258 kg/m<sup>3</sup> a 25°C (Perry e Green, 1997). 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 sobretudo para indústria de explosivos, e emprega-se 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 apenas como líquido.

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

|                            |           |           |           |           |           |           |           |            |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| <b>Temperatura (°C)</b>    | <b>20</b> | <b>30</b> | <b>40</b> | <b>50</b> | <b>60</b> | <b>70</b> | <b>80</b> | <b>100</b> |
| <b>Viscosidade (mPa.s)</b> | 1400      | 600       | 300       | 180       | 100       | 60        | 35        | 15         |

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

|                                     |           |           |           |
|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Temperatura (°C)</b>             | <b>15</b> | <b>20</b> | <b>25</b> |
| <b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b> | 1,2644    | 1,2613    | 1,2583    |

**Tabela 3.3:** Pressão de vapor do glicerol (Lide, 1997 e Perry e Green, 1997).

|                                |        |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Temperatura (°C)</b>        | 96,0   | 125,5 | 153,8 | 167,2 | 198,0 | 220,1 | 240,0 | 263,0 | 290,0 |
| <b>pressão de vapor (mmHg)</b> | 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 através de um soprador da marca IBRAM de 7,5 cv (1), o qual passa por uma válvula “by-pass” que auxilia na regulagem da vazão de ar. A vazão é obtida através da queda de pressão monitorada por uma placa de orifício (2) previamente calibrada ( $Q = 0,129\sqrt{\Delta h}$ , com Q em m<sup>3</sup>/min e Δh em cm de água). A placa de orifício está conectada a um manômetro de mercúrio em U (13) e a um transdutor de pressão (14) (Auto Tran Incorporated, 0 a 5 psi, suprimento de corrente 12-24 Volts), onde o manômetro neste caso serve apenas para calibrar o sistema de aquisição de dados (e monitorar qualitativamente a queda de pressão na linha). A queda de pressão é coletada através de um sistema de aquisição de dados (“software” desenvolvido no Centro

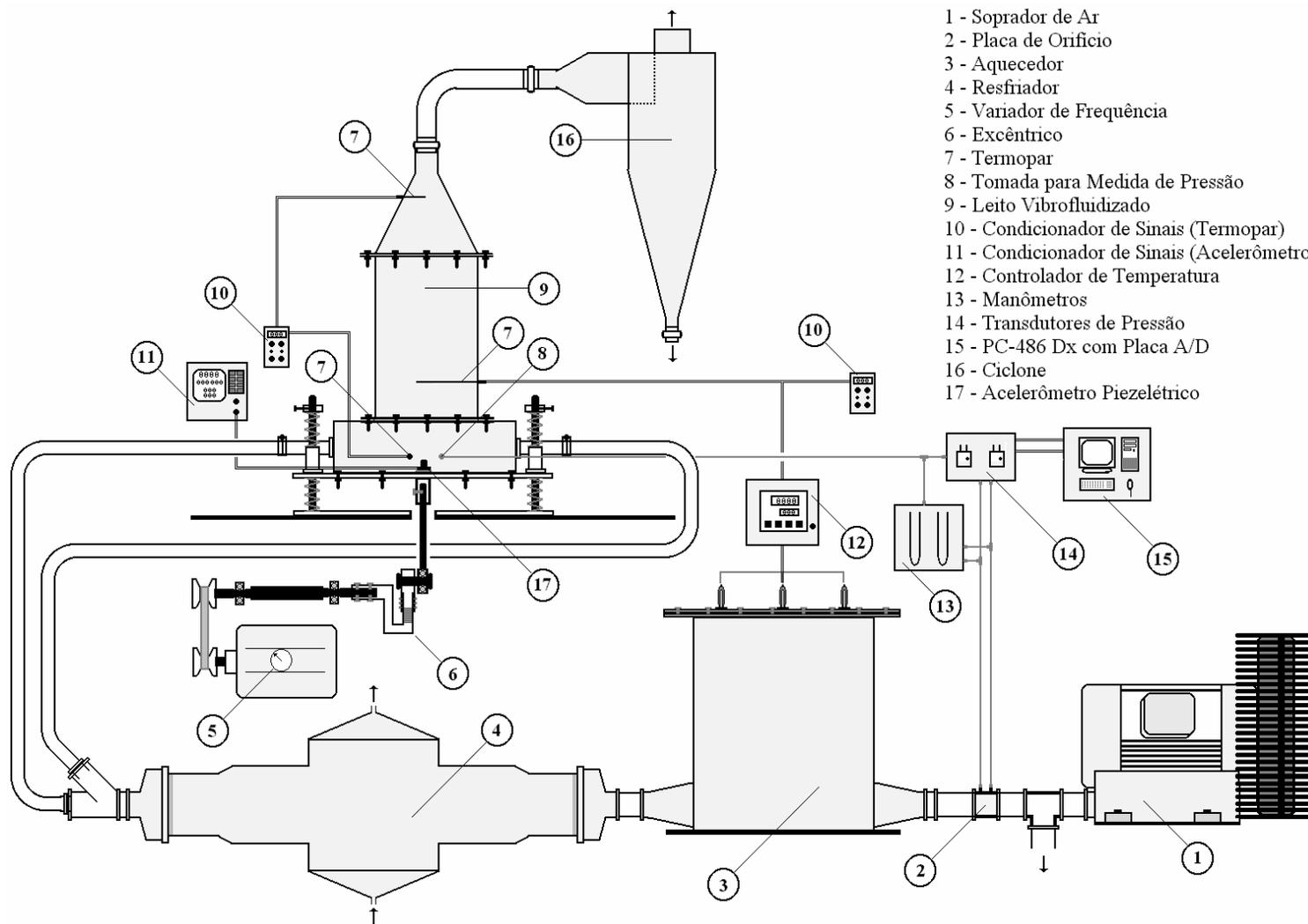
de Secagem do DEQ/UFSCar exclusivamente para este caso por Nivaldo Ap. Corrêa em 2001) em um microcomputador PC-486 DX com placa analógico digital de 12 bits (15), (modelo CA 12-36, fabricado pela Lynx Tecnologia Eletrônica Ltda). O “software” anteriormente citado, coleta 300 pontos em 3 segundos, fornecendo como resposta a média e o desvio padrão destes pontos. A queda de pressão, medida no pleno do leito (logo abaixo da placa distribuidora de ar), é feita de forma semelhante à medida da queda de pressão na placa de orifício, só que neste caso o manômetro em U é de água e o transdutor utilizado opera na faixa de 0 a 1 psi. O ar é aquecido em um aquecedor a resistências elétricas (3) (totalizando 3900 watts) ligadas a um controlador de temperatura Flyever FE50RP (12). Nos experimentos foi necessário o uso de um resfriador a água (4), principalmente em dias muito quentes, para amenizar o aquecimento natural provocado pelo soprador e devido ao atrito do ar na tubulação.

O ar atmosférico é injetado em contracorrente através de duas entradas no pleno, que serve para homogeneizá-lo, abaixo da placa distribuidora de ar que serve de sustentação dos inertes. Este distribuidor consiste de uma placa de  $2 \times 10^{-3}$  m de espessura com furos de  $0,8 \times 10^{-3}$  m de diâmetro. Estes furos resultam numa área aberta de aproximadamente 10% da placa. Samogin (1997) realizou testes mostrando a homogeneização do escoamento de ar no interior de um leito vibrofluidizado de estrutura semelhante ao deste estudo.

O leito vibrofluidizado (9) utilizado é composto por uma câmara de seção retangular com 0,20 m de comprimento, 0,10 m de largura e 0,30 m de altura, construído em aço carbono galvanizado. O ciclone tipo Lapple (16) e o cone de saída do leito mostrado na Figura 3.1, não foram utilizados nesta etapa do

trabalho. Em seu lugar (saída do leito), foi adaptada uma tela para evitar a elutriação das partículas e uma luminária encostada na tela, direcionada para o interior do leito, para tornar visível a parte interna do mesmo, indispensável na verificação do comportamento dos inertes. No centro do leito, está colocado um termopar tipo T (7) (com bainha de 0,02 m), e no pleno outro termopar tipo T (7) (com bainha de 0,015 m), ambos calibrados utilizando um calibrador de termopares de bloco (DB-35L) com resolução de 0,1 °C e precisão de 0,5 °C.

As vibrações foram impostas no leito através de uma haste ligada a um mecanismo excêntrico (6), 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 (5) possibilitando obter a frequência necessária, monitorada por um tacômetro óptico Aptho Taco TO-404. A amplitude de vibração era ajustada no próprio excêntrico. A aceleração, a velocidade e o deslocamento com o qual o sistema reage à vibração imposta foi monitorado por um acelerômetro piezelétrico Brüel & Kjær modelo 4371 (17) (previamente calibrado), o qual envia o sinal para um amplificador de sinais Brüel & Kjær modelo 2525 (11) (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. Em testes preliminares, verificou-se que o sistema operava com estabilidade mecânica até  $\Gamma$  próximo de 2.



**Figura 3.1:** Esquema geral do secador de leito vibrofluidizado.

### 3.3 Metodologia Experimental

A Tabela 3.4 fornece os intervalos dos parâmetros utilizados nestes experimentos.

**Tabela 3.4:** Parâmetros utilizados nos experimentos.

| <b>Parâmetro</b>                        | <b>Valores</b>   |
|---|--|
| <b><math>d_p</math> (m)</b>             | $1,095 \times 10^{-3}$ ; $1,545 \times 10^{-3}$ e $1,850 \times 10^{-3}$   |
| <b>T (°C)</b>                           | 40; 50 e 60  |
| <b><math>\phi</math></b>                | 0,0000; 0,0005; 0,0010; 0,0020; 0,0030 e 0,0040  |
| <b><math>\Gamma</math></b>              | 0,00; 0,50; 1,00 e 1,50  |
| <b><math>m_p</math> (kg)</b>            | 3  |
| <b><math>m_g</math> (kg)</b>            | 0; $7,40 \times 10^{-4}$ ; $1,48 \times 10^{-3}$ ; $2,96 \times 10^{-3}$ ; $4,44 \times 10^{-3}$ e $5,92 \times 10^{-3}$   |
| <b><math>H_0</math> (m)</b>             | $8,0 \times 10^{-2}$   |
| <b><math>V_g</math> (m<sup>3</sup>)</b> | 0; $6,00 \times 10^{-7}$ ; $1,20 \times 10^{-6}$ ; $2,40 \times 10^{-6}$ ; $3,60 \times 10^{-6}$ ; $4,80 \times 10^{-6}$ ; |
| <b>A (m)</b>                            | $3,0 \times 10^{-3}$   |
| <b>f (Hz)</b>                           | 6,4; 9,1 e 11,1  |
| <b><math>U_s</math> (m/s)</b>           | 0 a 1,40   |

O leito utilizado possui geometria retangular e foi operado com vibração (vibrofluidizado) e sem vibração (fluidizado). A tela colocada na saída do leito evita a elutriação das partículas para fora do equipamento, principalmente nos casos de altas vazões de ar e fluidização irregular por efeito da aglomeração das partículas. Foram utilizadas três temperaturas diferentes no leito, 40; 50 e 60 °C, justamente para testar o efeito da temperatura no comportamento dinâmico do leito.

A saturação de glicerol ( $\phi$ ) foi representada utilizando-se a relação entre o volume do glicerol e o volume de partículas secas, da seguinte forma:

$$\phi = \frac{V_g}{V_p} \quad (15)$$

considerando desprezíveis as perdas por evaporação, fixação de líquido nas paredes e arraste pela corrente de ar. Trabalhou-se com valores de saturação no intervalo de 0,0000 a 0,0040, e a alimentação do sistema foi efetuada em batelada. Em testes preliminares, observou-se que a saturação máxima nas condições de trabalho, não deveria exceder 0,0040 para o menor diâmetro de partícula utilizado ( $1,095 \times 10^{-3} \text{m}$ ), e 0,0020 para o maior diâmetro utilizado ( $1,850 \times 10^{-3} \text{m}$ ), principalmente para o leito fluidizado, pois acima destes valores observou-se grande instabilidade na fluidização ou ausência da mesma. Estes parâmetros são extremamente importantes, pois não se encontrou outro trabalho que indicasse intervalos a serem utilizados neste tipo de leito.

Foram também feitos alguns testes com a vibração e por motivos de estabilidade estrutural não se trabalhou com parâmetro vibracional superior a 1,5. Os parâmetros vibracionais utilizados estavam compreendidos entre 0,00 e 1,50.

Através dos testes preliminares com as partículas inertes, escolheu-se por motivos práticos, trabalhar-se com diâmetros médios de  $1,095 \times 10^{-3}$ ,  $1,545 \times 10^{-3}$  e  $1,850 \times 10^{-3}$  m. Acima do maior diâmetro, a fluidização não era satisfatória, impossibilitando a análise da velocidade mínima de fluidização, e abaixo do menor diâmetro, já existem estudos fluidodinâmicos com glicerol na literatura, apesar de não serem completos.

## **Fluidodinâmica**

A principal forma de avaliação da influência da vibração sobre a estrutura de um leito fluidizado é a obtenção de sua curva característica, a qual dá a informação da queda de pressão no leito em função da velocidade do ar que o percola. Esta curva foi obtida após o estabelecimento das condições de vibração, temperatura e diâmetro de inerte, onde se expandiu totalmente o leito de partículas inertes e depois de alcançado o regime, os valores de queda de pressão no leito foram medidos simultaneamente com a velocidade de ar decrescente, metodologia já clássica como pode ser visto em Bratu e Jinescu (1971). A padronização das medidas com a velocidade de ar decrescente foi escolhida, dentre vários fatores; devido à facilidade de homogeneizar o líquido nas partículas, manter a temperatura constante, facilitar a comparação com diversos autores que escolheram o mesmo método, e até que fosse instalado o controlador de temperatura, evitar danos às resistências elétricas pelo excesso de aquecimento provocado pela falta de ar, antes de iniciar as medidas.

Para obtenção do comportamento fluidodinâmico em 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 foram feitas réplicas das curvas, justamente para testar a reprodutividade dos dados obtidos, principalmente quando o glicerol era adicionado no leito e sob a influência da vibração.

### **Velocidade mínima de fluidização e velocidade mínima de mistura**

A literatura pesquisada sugere apenas uma forma de obtenção do ponto onde começa a ocorrer a fluidização para leitos vibrofluidizados, que é através da forma já clássica para o leito fluidizado, discutido no item 2.2.1 da Revisão Bibliográfica. Como já foi esclarecido, este método não parece ser muito indicado para leito vibrofluidizado, já que alguns autores obtiveram resultados desprovidos de significado físico, isto é, um aumento da velocidade mínima de vibrofluidização com o aumento de  $\Gamma$ . Uma metodologia alternativa é a obtenção visual da velocidade mínima de mistura, proposto por Gupta e Mujumdar (1980a) também já discutida no item 2.2.1. Neste trabalho, foram obtidas ambas as velocidades ( $U_{mvf}$  e  $U_{mm}$ ) para efeito de comparação e análise.

A velocidade mínima de fluidização ( $U_{mf}$ ) e de vibrofluidização ( $U_{mvf}$ ) foram obtidas então através da intersecção de duas retas sobre a curva característica, uma tangente à região de leito fixo e outra tangente à queda de pressão constante.

A velocidade mínima de mistura ( $U_{mm}$ ) foi obtida através da visualização do comportamento das partículas inertes pela parte superior do leito (esta observação deu-se pela parte superior justamente porque a câmara do leito não era feita de material transparente), onde a  $U_{mm}$  correspondeu ao ponto no qual as partículas iniciavam o movimento de umas com relação as outras. Como foi dito anteriormente, essas curvas foram obtidas para velocidade de ar decrescente. Assim, o último ponto de movimentação das partículas foi considerado o ponto de velocidade de mínima mistura, e o ponto seguinte, sem a movimentação das partículas, foi a região de leito fixo. Para a determinação da  $U_{mm}$  utilizou-se

velocidade de ar decrescente, pois a desfluidização do leito tornou mais fácil a verificação do ponto onde o fenômeno ocorria. Esta metodologia mostrou-se vantajosa especialmente para partículas recobertas, pois a fluidização neste sentido era mais vigorosa. Isto facilitou a visualização da passagem do estado de mistura intensa das partículas para um estado de imobilidade das mesmas. Nesta condição de desfluidização também foi possível manter a temperatura estável.

Foram feitos inúmeros testes preliminares para facilitar a padronização visual do comportamento do leito, dando maior segurança e confiabilidade aos pontos obtidos e os valores de queda de pressão no leito e de velocidade do ar também foram monitorados em tempo real de forma gráfica, evitando qualquer confusão no momento de determinar a velocidade.

### **Curvas de desvio padrão da queda de pressão**

Cada ponto de queda de pressão no leito foi obtido através da média aritmética de 300 pontos coletados no intervalo de 3 segundos (utilizando transdutores de pressão conectados a um sistema de aquisição de dados). O “software” utilizado fornece a média aritmética da queda de pressão e também calcula o desvio padrão desses pontos. Com as curvas de desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade de ar, foi possível analisar a dinâmica do leito para diferentes níveis de vibração e de saturação de líquido. A utilização de um transdutor de pressão foi necessário, já que é praticamente impossível observar as oscilações provocadas na queda de pressão com a utilização de manômetros.

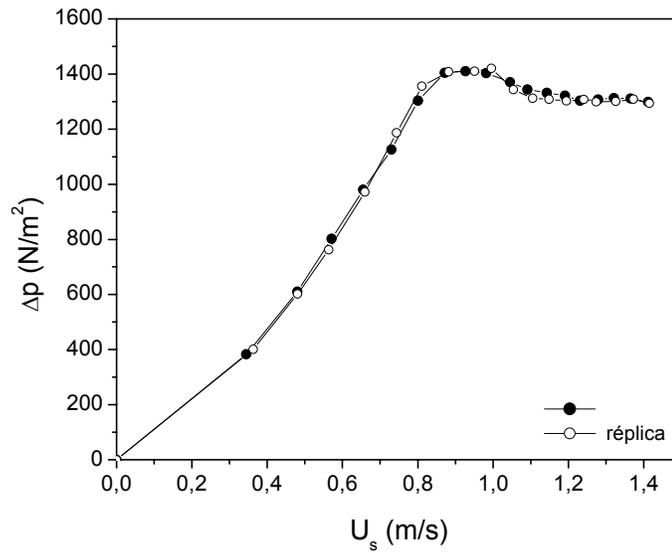
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo está dividido em quatro itens. No primeiro é testada a reprodutividade dos dados de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar, através das curvas características e do desvio padrão desses dados, em seguida é feita a análise fluidodinâmica para os leitos fluidizado e vibrofluidizado. Após esta análise é feito um estudo dos dados de desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar e por último é discutida a obtenção da velocidade mínima de fluidização e da velocidade mínima de mistura. Estes casos são analisados verificando-se a influência da temperatura, do diâmetro das partículas inertes, da intensidade de vibração e do grau de saturação de líquido. Todos os dados experimentais obtidos neste trabalho (vide Tabela 3.4), estão contidos nos apêndices, e em cada sub-item apresentado serão detalhados exemplos desses dados.

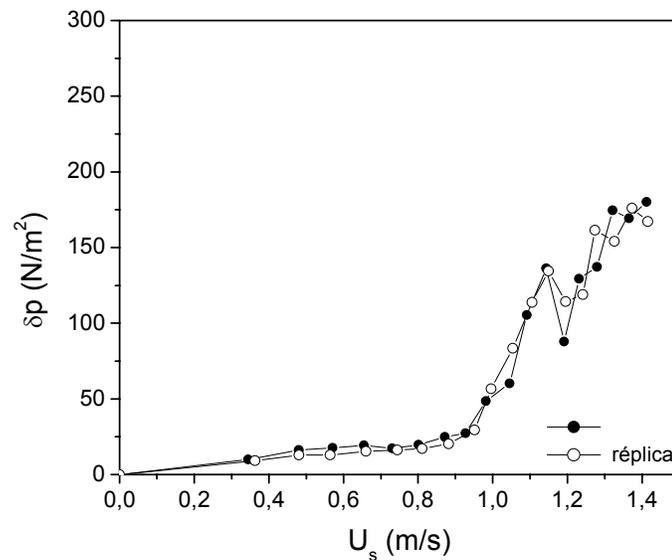
### 4.1 Reprodutividade das Curvas Características e de Desvio Padrão

A reprodutividade das curvas características e de desvio padrão da queda de pressão foram feitas todas utilizando partículas de diâmetro intermediário ( $d_p = 1,545 \times 10^{-3}$  m) e temperatura também intermediária ( $T = 50^\circ\text{C}$ ), mantendo a amplitude constante em  $3,0 \times 10^{-3}$  m. As curvas foram obtidas testando-se o efeito da vibração e da saturação de líquido no leito. Alguns dos resultados obtidos estão reproduzidos nas Figuras 4.1 a 4.8, e os demais encontram-se no Apêndice A.

A Figura 4.1 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. As duas curvas estão sobrepostas mostrando a boa reprodutividade dos dados obtidos nestas condições e as pequenas diferenças nestas curvas estão dentro da faixa de erro experimental. A Figura 4.2 apresenta o desvio padrão dos dados apresentados na Figura 4.1, mostrando uma diferença também dentro da faixa de erro experimental, entre a medida e a sua réplica. Uma peculiaridade que pôde ser verificada nesta curva, é que quando o leito se comporta como leito fixo o desvio padrão é muito baixo (menor que  $25 \text{ N/m}^2$ ), e justamente no regime de transição o desvio padrão se eleva drasticamente com o aumento da velocidade do ar, até que o leito apresente uma fluidização bem desenvolvida, e deste ponto em diante o desvio padrão ainda aumenta, mas apresenta comportamento oscilatório. (A fluidodinâmica do leito fluidizado e vibrofluidizado será discutida com mais detalhes no item 4.2 e o desvio padrão das curvas de queda de pressão será discutido no item 4.3).



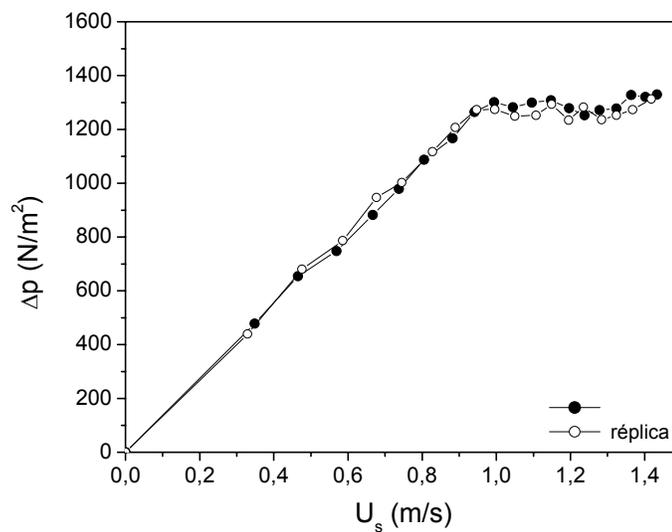
**Figura 4.1:** Réplica da curva de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar;  $\Gamma = 0,00$ ;  $\phi = 0,0000$ .



**Figura 4.2:** Réplica da curva de desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar;  $\Gamma = 0,00$ ;  $\phi = 0,0000$ .

Na Figura 4.3 é apresentada a curva característica para o leito vibrofluidizado com adimensional de vibração igual à unidade. Verifica-se neste caso que o desvio de uma curva com relação à outra também é muito pequeno e

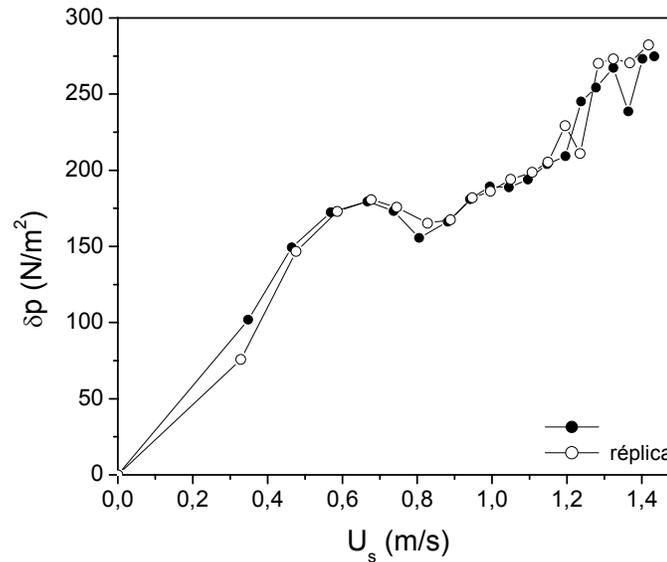
esta curva é muito semelhante à encontrada na literatura (um exemplo é a curva b da Figura 2.1). Como efeito da vibração, ainda é possível verificar a pequena atenuação da curva de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar, neste caso o tipo característico da passagem leito fixo-leito fluidizado não está presente.



**Figura 4.3:** Réplica da curva de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar;  $\Gamma = 1,00$ ;  $\phi = 0,0000$ .

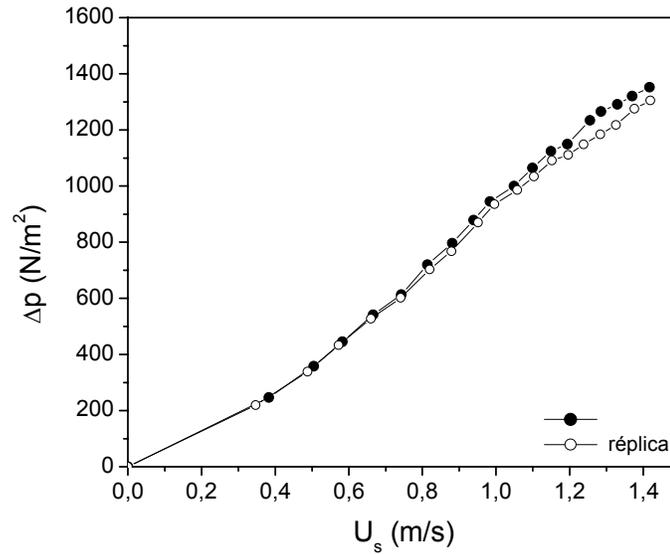
A Figura 4.4 apresenta o comportamento das curvas de desvio padrão obtidos com os dados da Figura 4.3. Nota-se que a reprodutividade continua sendo de boa qualidade. De forma complementar, observa-se que estas curvas não apresentaram uma tendência semelhante à curva de desvio padrão obtido para o leito fluidizado, visto que nestas o desvio padrão é muito grande; mesmo a baixas velocidades de ar, apresenta-se crescente e não é possível verificar claramente a região de transição do leito fixo para o fluidizado. No

entanto, quando a vibrofluidização já estava bem estabelecida, as curvas apresentaram comportamento oscilatório.

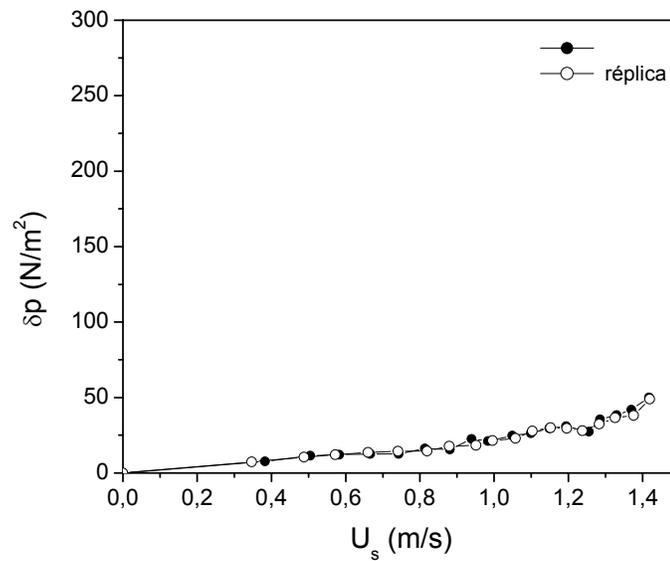


**Figura 4.4:** Réplica da curva de desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar;  $\Gamma = 1,00$ ;  $\phi = 0,0000$ .

A reprodutibilidade das curvas características e de desvio padrão da queda de pressão do leito fluidizado sob efeito da saturação de líquido pode ser observada nas Figuras 4.5 e 4.6. Ambas as figuras mostram que as curvas foram reprodutíveis e na Figura 4.5 nota-se que as curvas não apresentam nenhum patamar, isto é, não foi possível fluidizar as partículas sem a ação da vibração para o leito saturado com o líquido. Na Figura 4.6 é possível observar que o desvio padrão obtido foi muito baixo em toda a extensão de velocidade de ar, e isto ocorreu justamente porque o leito praticamente não fluidizou, deste modo, permaneceu na região de leito fixo onde são muito pequenas as oscilações na medida da queda de pressão.



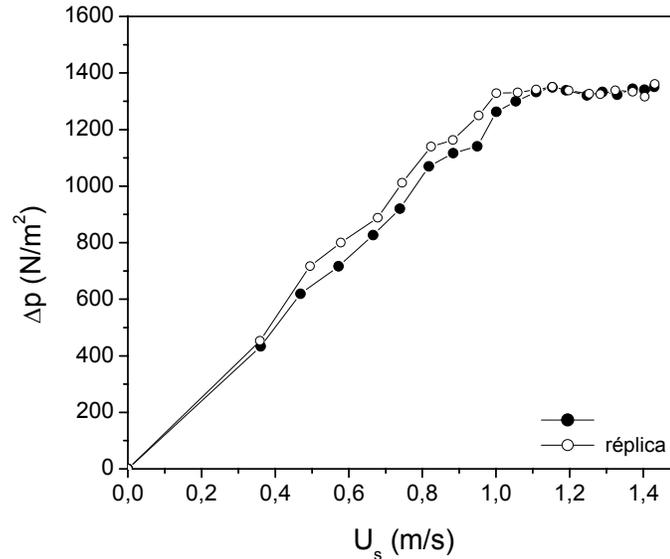
**Figura 4.5:** Réplica da curva de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar;  $\Gamma = 0,00$ ;  $\phi = 0,0010$ .



**Figura 4.6:** Réplica da curva de desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar;  $\Gamma = 0,00$ ;  $\phi = 0,0010$ .

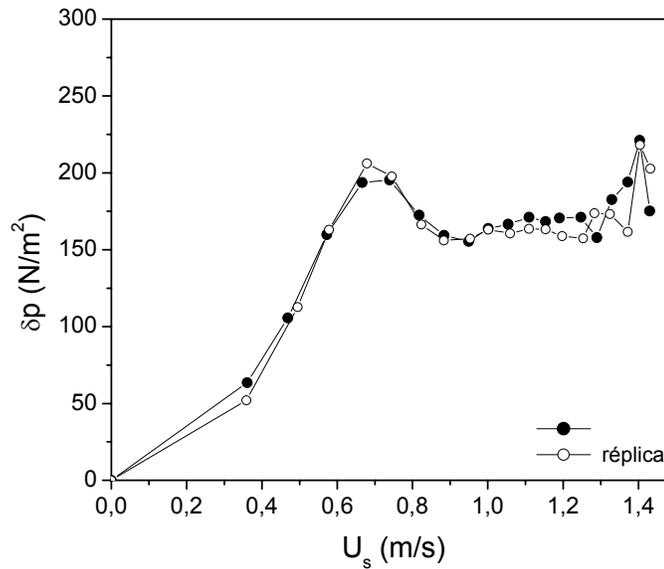
Para o leito vibrofluidizado, foi observado que mesmo com a adição de líquido o leito apresentou alguns patamares na curva de queda de pressão (Figura 4.7) mostrando que houve a passagem de leito fixo para

fluidizado. Estas curvas apresentaram um distanciamento um pouco maior que nos casos anteriores, mais ainda estão dentro da faixa de erro experimental.



**Figura 4.7:** Réplica da curva de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar;  $\Gamma = 1,00$ ;  $\phi = 0,0010$ .

As curvas de desvio padrão da Figura 4.8 também se mostraram reprodutíveis, e apresentaram um grande incremento com o aumento da velocidade de ar, até atingirem um pico próximo a  $U_s = 0,68$  m/s. Depois deste ponto decresceram com o aumento da velocidade de ar até atingirem um patamar de pouca variação, que perdurou até velocidade do ar próximo à máxima. Em torno da máxima velocidade de ar, estas curvas apresentaram oscilações, já percebidas nas figuras anteriores e caracterizadas como a região onde a fluidização já se encontra bem desenvolvida.



**Figura 4.8:** Réplica da curva de desvio padrão da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar;  $\Gamma = 1,00$ ;  $\phi = 0,0010$ .

Como já foi comentado anteriormente, pôde-se observar que em todos os casos onde foi testada a reprodutibilidade das curvas, estas se apresentaram dentro da faixa de erro experimental, portanto os dados são reprodutíveis e na continuação será analisado o seu comportamento em relação aos parâmetros já pré-selecionados.

#### 4.2 Análise da Fluidodinâmica dos Leitos Fluidizado e Vibrofluidizado

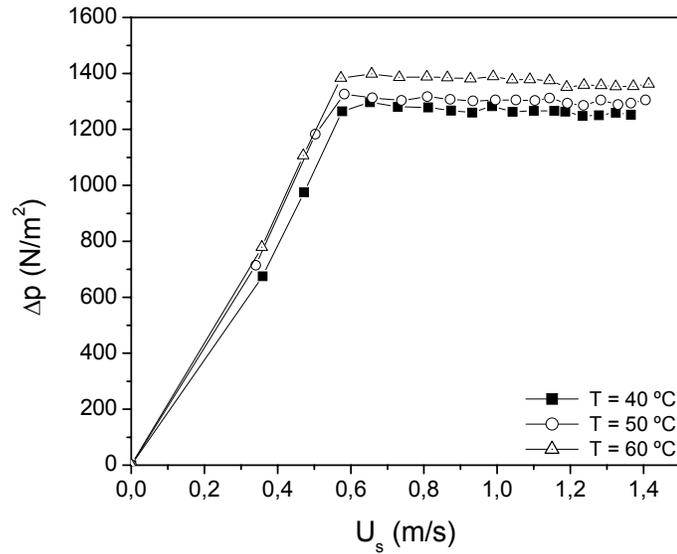
Nesta etapa serão analisadas as curvas características dando ênfase à queda de pressão e ao seu comportamento perante os parâmetros estudados, não sendo analisada aqui a velocidade de mínima fluidização, reservada ao item 4.4.

Os valores experimentais de queda de pressão em função da velocidade superficial de ar foram obtidos para 3 diâmetros médios de partículas inertes ( $1,095 \times 10^{-3}$ ,  $1,545 \times 10^{-3}$  e  $1,850 \times 10^{-3}$  m), 3 temperaturas (40, 50 e 60°C), 6

níveis de saturação de líquido (0,0000, 0,0005, 0,0010, 0,0020, 0,0030 e 0,0040) e 4 níveis de parâmetro vibracional (0,00, 0,50, 1,00 e 1,50), mantendo a amplitude constante em  $3,0 \times 10^{-3}$  m. Estes parâmetros foram combinados perfazendo-se um total de 216 corridas (excluindo-se deste número todos os testes preliminares), e aqui estão analisados consecutivamente o efeito da temperatura, do diâmetro dos inertes, do parâmetro vibracional e da saturação do líquido na dinâmica das partículas no leito fluidizado e vibrofluidizado. Todos os resultados obtidos para fluidodinâmica encontram-se no Apêndice C.

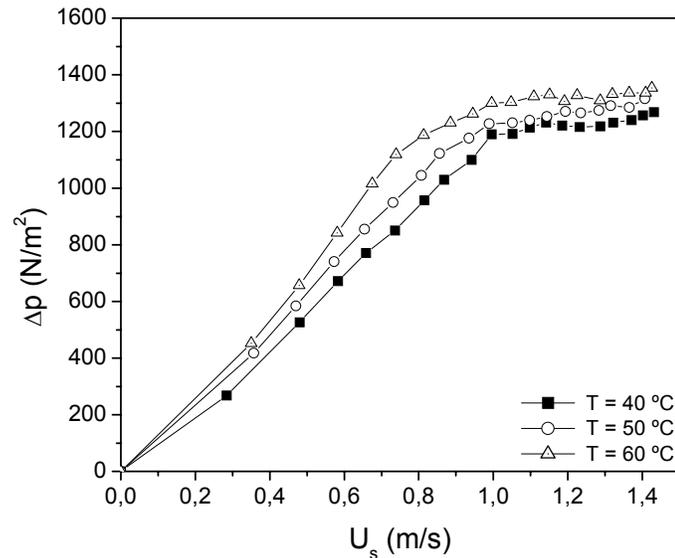
#### *4.2.1 Efeito da temperatura*

As curvas características obtidas para diferentes temperaturas estão mostradas nas Figuras 4.9 a 4.13. Na Figura 4.9 observa-se que as curvas são típicas de leito fluidizado sem a adição de líquido, apresentando uma “rampa” na região de transição entre leito fixo e fluidizado. Nesta figura verifica-se que a temperatura não influenciou significativamente a queda de pressão, resultado já esperado, uma vez que a viscosidade do ar varia muito pouco neste intervalo de temperatura.



**Figura 4.9:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado na temperatura no leito;  $\Gamma = 0,00$ ;  $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$  m;  $\phi = 0,0000$ .

Quando foi adicionada uma pequena quantidade de líquido no leito fluidizado bifásico (sólido-ar), observou-se a atenuação (suavização) da região de transição entre o leito fixo e fluidizado (Figura 4.10). Este comportamento é provocado pelas forças interpartículas (coesivas), as quais tendem a aglomerar as partículas do leito. Visualmente para velocidade do ar próxima à região de transição entre o leito fixo e o fluidizado, encontrou-se no leito alguns pontos localizados de fluidização irregular através de canais preferenciais. Com o aumento da velocidade do ar um número maior de partículas desprende-se do aglomerado e também iniciaram a fluidização, prolongando a região de transição entre o leito fixo e o fluidizado, até que o leito fluidizou por completo.



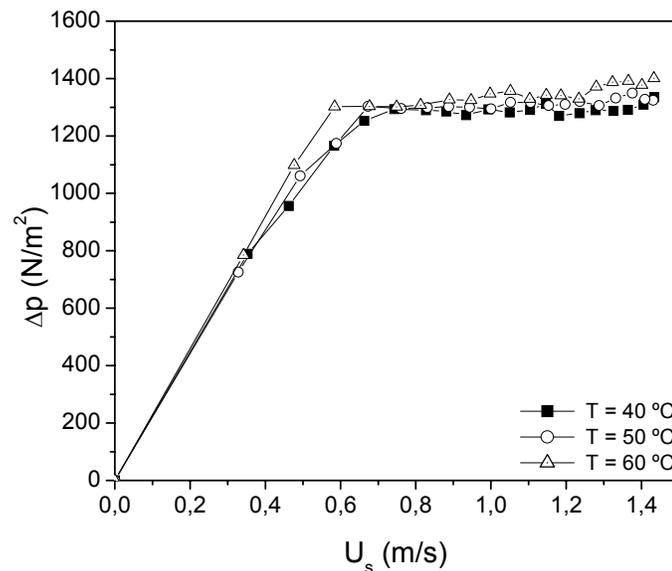
**Figura 4.10:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado na temperatura no leito;  $\Gamma = 0,00$ ;  $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$  m;  $\phi = 0,0010$ .

Efeito semelhante sobre a fluidodinâmica é verificado quando se utilizam partículas inertes de diferentes diâmetros misturadas no leito, mas sem líquido. Segundo Gauthier *et al.* (1999) para uma mistura segregada de partículas de diferentes diâmetros, as de menores diâmetros começam a fluidizar a baixas velocidades de ar, e com o aumento desta velocidade, ocorre a fluidização das partículas maiores, provocando um prolongamento na região de transição entre leito fixo e fluidizado. Para a análise do efeito da temperatura, verifica-se na Figura 4.10 que a elevação da mesma provoca uma pequena tendência do aumento da queda de pressão, comportamento semelhante ao apresentado na Figura 4.9, só que neste caso, em presença do glicerol que apresenta alta viscosidade no intervalo de temperatura utilizado. Neste caso, como foi adicionada uma certa quantidade de glicerol, o efeito da temperatura é sentido de duas formas pelo leito, uma pela influência da viscosidade do ar e outra pela influência da viscosidade do

líquido. O efeito da viscosidade do ar é muito pequeno como já foi discutido (Figura 4.9). Para o efeito da viscosidade do líquido, sabe-se que, em um líquido, a viscosidade aumenta com a redução da temperatura (comportamento oposto ocorre para um gás) reduzindo as forças coesivas, tornando mais fluido o sistema sólido-líquido e dificultando a percolação do ar neste sistema. Quando as partículas estão mais aglomeradas (para temperaturas menores), o aumento da velocidade de ar tende a “romper” o aglomerado de partículas em determinadas regiões no leito criando canais preferenciais à passagem de ar. Este padrão de escoamento “arrasta” algumas partículas soltas no percurso do ar nestes canais e esta fluidização pobre reduz a queda de pressão. Quando o sistema como um todo se torna mais fluido com a redução da viscosidade (aumentando a temperatura), o leito torna-se mais compacto e os canais que se formam são obstruídos por um grande número de partículas que se soltaram pela redução da viscosidade, dificultando a passagem de ar e aumentando a queda de pressão. Esta condição torna melhor a fluidização e a mistura das partículas no leito. Efeito semelhante foi obtido para o leito de jorro por Patel *et al.* (1986), onde a redução da temperatura provocou a redução da queda de pressão, ou seja, o aumento da viscosidade aglomera as partículas no leito fazendo com que menos partículas sigam da região anular para região de jorro e, naturalmente, menor é a resistência à passagem de ar.

Na Figura 4.11 as curvas características em presença de líquido e sob a influência da vibração ( $\Gamma = 1$ ) mostram-se pouco sensíveis ao aumento da temperatura, indicando que a vibração exerceu maior influência sobre esta, já que as curvas aproximam-se quando foi inserida vibração no leito. As curvas obtidas

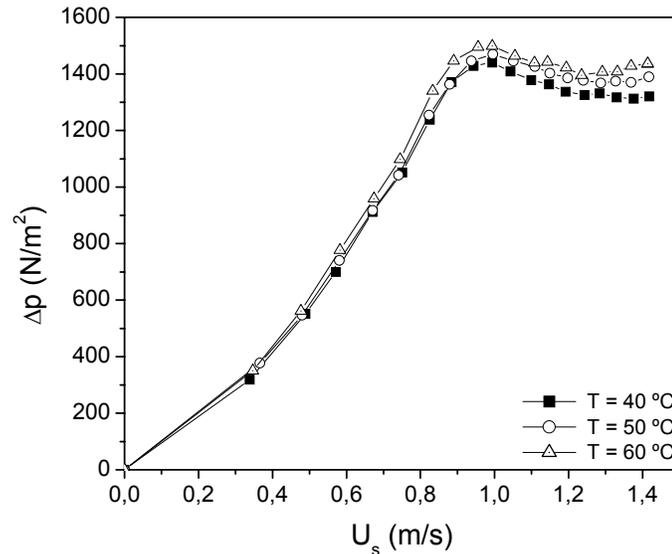
nestas condições apresentam uma mudança de regime de forma abrupta e bem definida (com uma “rampa”), e isto provavelmente ocorreu porque o conteúdo de glicerol adicionado no leito foi significativo, aglomerando as partículas em toda a extensão do leito. A vibração, neste caso, inicialmente não foi suficiente para “romper” as pontes líquidas entre as partículas, compactando o leito e tornando mais difícil o “rompimento” do aglomerado. A partir de uma certa velocidade limite de ar o leito se “rompeu” abruptamente, se expandindo, e a partir deste ponto, manteve suspensas as partículas equilibradas pela ação da gravidade e da vibração, mantendo a queda de pressão em um patamar constante.



**Figura 4.11:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado na temperatura no leito;  $\Gamma = 1,00$ ;  $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$  m;  $\phi = 0,0010$ .

A Figura 4.12 apresenta os dados de perda de carga em função da velocidade superficial de ar para uma situação semelhante à empregada na Figura 4.9, agora para a partícula de diâmetro maior ( $d_p = 1,850 \times 10^{-3}$  m). Nesta Figura é

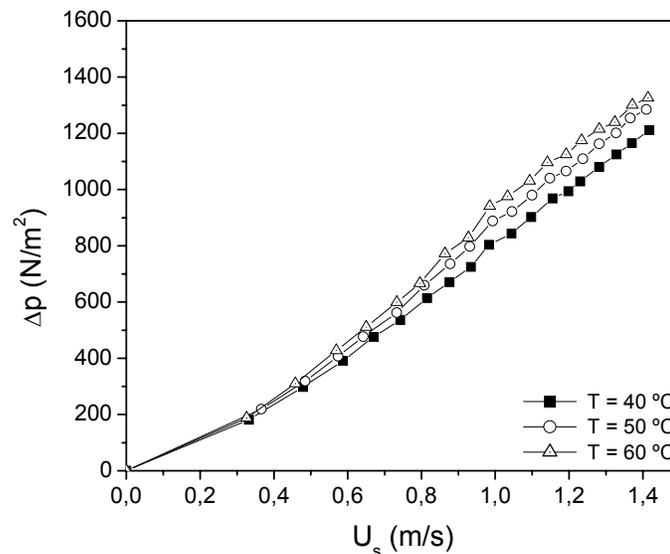
possível constatar que o efeito da temperatura é ainda menor e a variação da queda de pressão está compreendida na faixa de erro experimental.



**Figura 4.12:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado na temperatura no leito;  $\Gamma = 0,00$ ;  $d_p = 1,850 \times 10^{-3}$  m;  $\phi = 0,0000$ .

Quando é adicionado líquido no leito fluidizado nas condições apresentadas na Figura 4.12, é possível observar que o ar não conseguiu “romper” as pontes líquidas, não atingindo o regime fluidizado mesmo com o aumento da temperatura (Figura 4.13). Verifica-se novamente uma pequena tendência ao aumento da queda de pressão com o aumento da temperatura. Quando o leito é submetido à vibração é possível observar o aparecimento da fluidização através do surgimento dos patamares de queda de pressão (Figura 4.14). Este caso por si só justifica a utilização da vibração nestas condições, pois aumenta a eficiência dos fenômenos de transferência indispensáveis a uma boa secagem. Verifica-se que a tendência de variação da queda de pressão com a temperatura se mantém, pois o aumento de uma provoca o aumento da outra. Este comportamento, onde

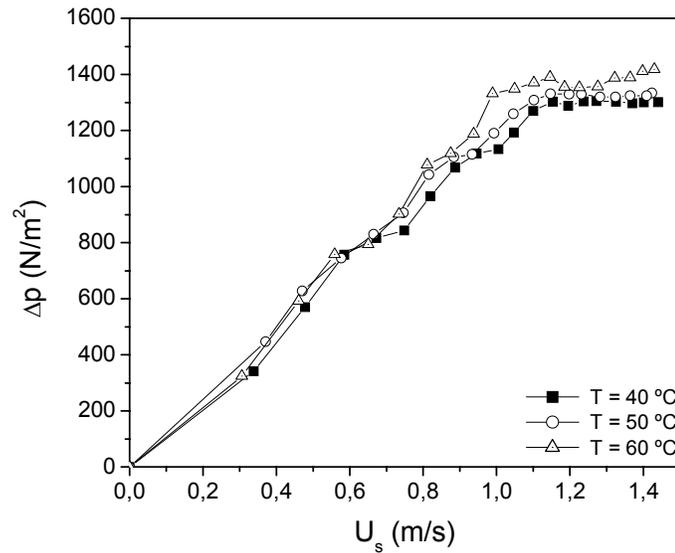
aparecem vários patamares nas curvas causados pela vibração, ocorre porque a vibração tende a rearranjar as partículas de forma que elas aglomerem o leito como um todo, o ar escoar por pequenos canais preferenciais e com a vibração ocorre o bloqueio destes canais provocando rupturas dos aglomerados, e quando isso ocorre, surgem oscilações na queda de pressão. Com a vibração estas partículas tendem a se rearranjar novamente, repetindo o processo. Após atingir um limite de velocidade de ar o leito fica suspenso como em uma fluidização normal, como pode ser observado na Figura 4.14.



**Figura 4.13:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado na temperatura no leito;  $\Gamma = 0,00$ ;  $d_p = 1,850 \times 10^{-3}$  m;  $\phi = 0,0010$ .

Em todos os casos observou-se que a influência da temperatura não é significativa no comportamento fluidodinâmico de queda de pressão no leito, assim nos sub-ítens seguintes, a análise do diâmetro das partículas inertes, do parâmetro vibracional e da saturação no leito será feita para uma única

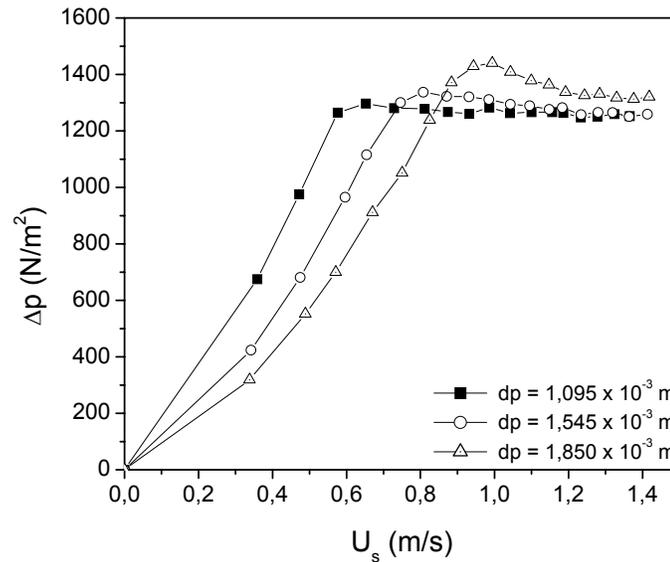
temperatura, a de 40°C (os dados obtidos para todas as temperaturas estão no Apêndice C).



**Figura 4.14:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado na temperatura no leito;  $\Gamma = 1,00$ ;  $d_p = 1,850 \times 10^{-3}$  m;  $\phi = 0,0010$ .

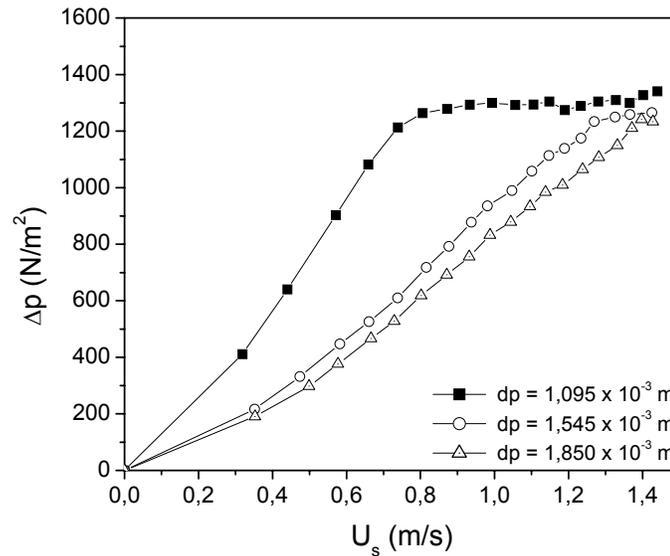
#### 4.2.2 Efeito do diâmetro das partículas inertes

Inicialmente avaliou-se a influência do diâmetro das partículas para o leito fluidizado sem a adição de líquido à temperatura de 40°C (Figura 4.15). Observa-se que a variação do diâmetro das partículas exerce uma influência significativa nas curvas de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar tanto para a região onde o leito muda de fixo para fluidizado ( $U_{mf}$ ) como no valor e forma da região de máxima pressão. A queda de pressão na fluidização já estabelecida sofreu pouca influência do diâmetro da partícula.



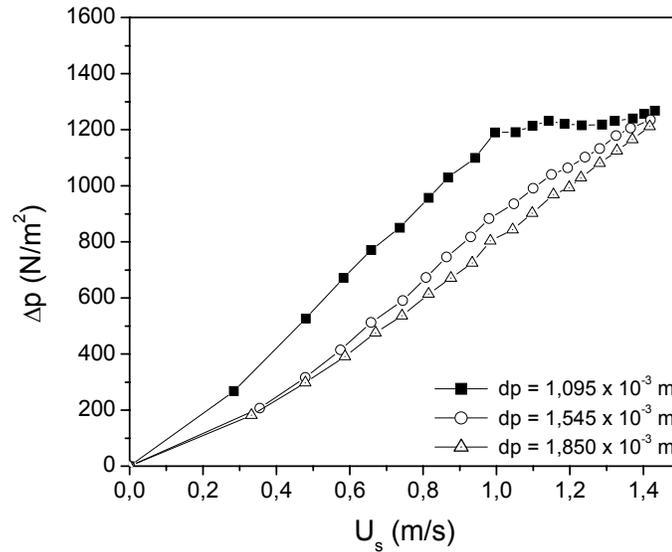
**Figura 4.15:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\Gamma = 0,00$ ;  $T = 40^\circ\text{C}$ ;  $\phi = 0,0000$ .

Na Figura 4.16 é apresentada uma situação similar à da Figura 4.15, só que com glicerol a uma saturação de 0,0005 sobre as partículas. Verifica-se que a curva para o menor diâmetro de inerte apresentou fluidização bem definida e estável, diferenciando-se do caso fluidizado da Figura 4.15 pela atenuação da curva na região de transição entre o leito fixo e o fluidizado e pela redução da queda de pressão na região de leito fixo. Com o aumento do diâmetro das partículas inertes verifica-se que o leito inicia fluidização na velocidade próxima do limite do soprador. Nestes casos a ação das forças viscosas somadas ao peso das partículas impediu que o leito se “rompesse” e a fluidização se desenvolvesse, mantendo o leito praticamente aglomerado.



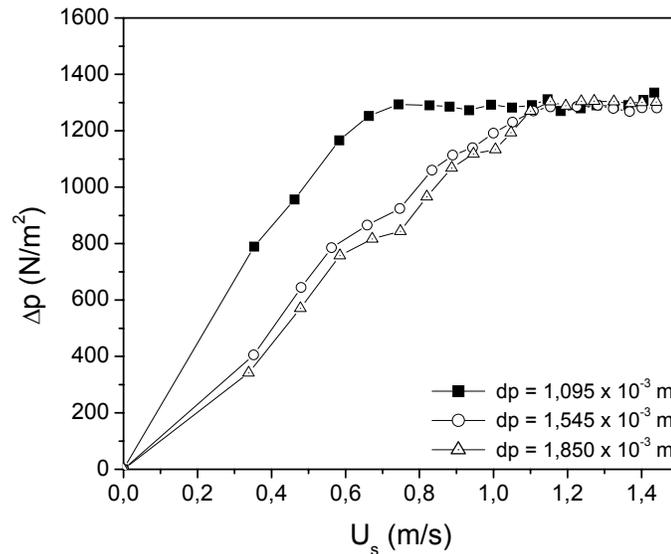
**Figura 4.16:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\Gamma = 0,00$ ;  $T = 40^\circ\text{C}$ ;  $\phi = 0,0005$ .

Na Figura 4.17 tem-se um caso semelhante ao da Figura 4.16 só que para um maior grau de saturação (0,0010). Verifica-se que a curva para o menor diâmetro ( $1,095 \times 10^{-3} \text{ m}$ ) aproxima-se das curvas obtidas para os dois outros diâmetros ( $1,545 \times 10^{-3} \text{ m}$  e  $1,850 \times 10^{-3} \text{ m}$ ), e estas últimas tem um comportamento quase inalterado quando comparadas com as da Figura 4.16, porém em nenhum ponto foi mostrada a tendência de fluidização. A aproximação das curvas ocorre justamente pelo aumento das forças coesivas com o aumento da saturação de líquido para os inertes de menor diâmetro, que tendem a reduzir a queda de pressão devido à formação de canais preferenciais, como já discutido.



**Figura 4.17:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\Gamma = 0,00$ ;  $T = 40^\circ\text{C}$ ;  $\phi = 0,0010$ .

Com a adição da vibração ( $\Gamma = 1$ ) verifica-se que as curvas que não fluidizaram anteriormente (Figura 4.16 e 4.17) agora apresentam patamares de queda de pressão indicando que o leito atingiu o regime fluidizado (Figura 4.18). Para a curva de menor diâmetro de inertes ainda dá para observar que, com a vibração, a região de transição entre o regime de leito fixo e fluidizado ocorreu a menores velocidades de ar não apresentando uma “rampa” bem definida, característica dos leitos vibrofluidizados. Também se constatou o aumento na queda de pressão, indicando que ocorreu a compactação do leito. Para os maiores diâmetros de inertes a adição da vibração provocou alguns patamares que são característicos da influência da vibração e da velocidade de ar sobre a dinâmica das partículas recobertas com líquido. Percebe-se ainda que a queda de pressão na região de leito fluidizado apresenta o mesmo patamar para todos os diâmetros de partículas.



**Figura 4.18:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\Gamma = 1,00$ ;  $T = 40^\circ\text{C}$ ;  $\phi = 0,0010$ .

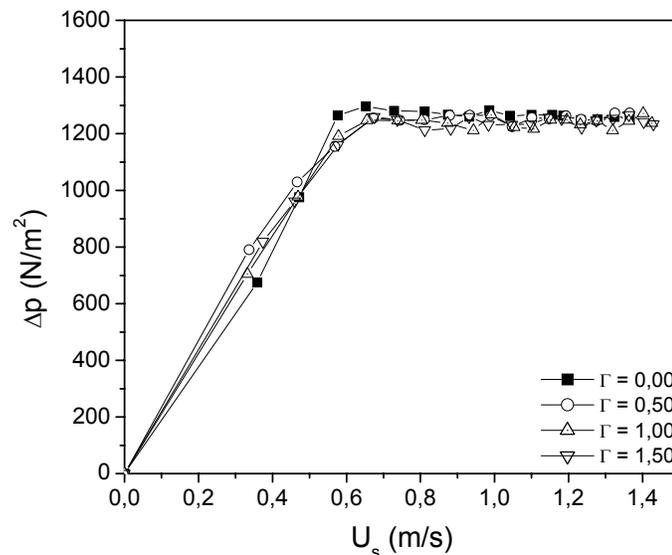
Malhotra *et al.* (1984) também obtiveram dados relativos a fluidodinâmica do leito vibrofluidizado com partículas inertes recobertas com líquido, utilizando dois diâmetros de partículas inertes ( $3,53 \times 10^{-4}$  e  $6,67 \times 10^{-4}$  m); no entanto não fazem uma análise parametrizada no diâmetro dos inertes utilizados, mas é possível observar a semelhança no comportamento das curvas obtidas pelos autores com as apresentadas até aqui neste trabalho.

De uma forma geral observou-se que o diâmetro das partículas inertes teve uma influência significativa sobre a dinâmica das partículas no leito. Na literatura sobre leitos vibrofluidizados praticamente não foram encontrados trabalhos que analisam com maior profundidade a influência deste parâmetro sobre a fluidodinâmica do leito, principalmente em presença de líquido. Já a literatura que trata a influência da vibração sobre a fluidodinâmica neste leito é

mais vasta (excluído o caso em presença de líquido), e será o próximo item a ser discutido.

#### 4.2.3 Efeito do parâmetro vibracional

Inicialmente avaliou-se a influência das diversas condições vibracionais ( $\Gamma$ ) impostas ao leito sem a adição de líquido na temperatura de  $40^\circ\text{C}$  e para o menor diâmetro de partículas ( $1,095 \times 10^{-3}$  m) apresentado na Figura 4.19. Estas curvas são semelhantes às encontradas por Bratu e Jinescu (1971). Observa-se de uma forma geral que a variação de  $\Gamma$  apresenta pouca influência sobre as curvas características do leito neste caso e pouca diferença do caso limite quando a vibração vai a zero. Verifica-se uma pequena tendência à suavização da região de transição entre o leito fixo e o fluidizado quando é inserida vibração no leito.

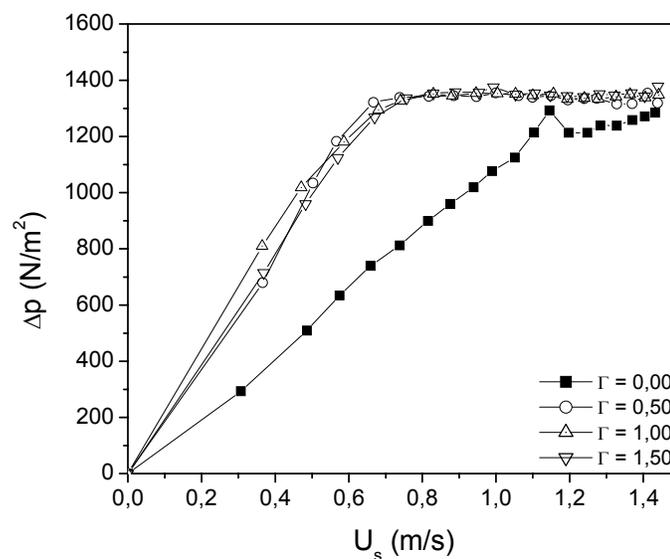


**Figura 4.19:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado em  $\Gamma$ ;  $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$  m;  $T = 40^\circ\text{C}$ ;  $\phi = 0,0000$ .

Na Figura 4.20 é possível notar a grande diferença entre as curvas fluidizadas e as vibrofluidizadas quando é adicionado o glicerol sobre as partículas (neste caso  $\phi = 0,0040$ ). A curva fluidizada apresenta queda de pressão menor em toda a sua extensão quando comparada com as curvas vibrofluidizadas. Este efeito é o oposto ao observado quando não está presente o glicerol, como mostrado na Figura 4.19. A utilização deste grau de saturação provocou a aglomeração das partículas recobertas com o líquido em função da ação das forças coesivas e o aparecimento de canais preferenciais caracterizados por uma fluidização pobre e irregular. A origem desses caminhos preferenciais à passagem de ar reduz a queda de pressão no leito já que nestes pontos o ar encontra pouca resistência para sair. A altas velocidades de ar, neste caso em particular, verifica-se o “rompimento” das pontes líquidas iniciando a fluidização por completo do leito. Esse ponto especificamente pode ser observado como sendo posterior ao pico que aparece na curva da Figura 4.20 para o leito fluidizado. Já para o caso vibrofluidizado verifica-se claramente que a vibração aumentou a queda de pressão, pois a vibração evita a formação de canais preferenciais e a coalescência de bolhas no leito. Em consequência, o mesmo tende a se compactar e a fluidização conseqüentemente torna-se mais homogênea, apresentando maior queda de pressão em toda a sua extensão. O aumento da vibração partindo de  $\Gamma = 0,5$  até  $\Gamma = 1,5$  não provocou distinções nítidas entre as curvas, mostrando que o efeito da vibração neste intervalo foi desprezível em relação ao efeito da saturação. Até o momento é possível afirmar que, para baixos valores de parâmetro vibracional ( $\Gamma = 0,5$ ), pode-se operar o equipamento de forma satisfatória, reduzindo os custos energéticos (resultado semelhante foi obtido por Mushtayev *et al.* em 1972),

lembrando que ainda falta analisar as outras condições e também a velocidade mínima de fluidização.

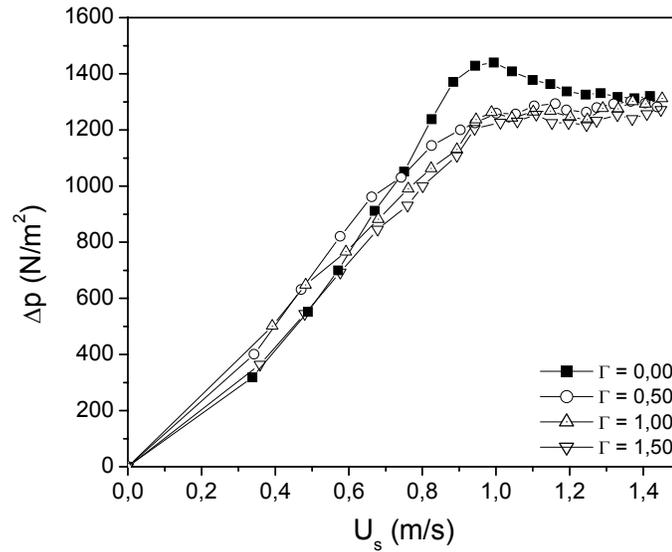
Complementando as observações feitas, verificou-se a dinâmica anterior para as partículas inertes de maior diâmetro ( $1,850 \times 10^{-3}$  m), já que o diâmetro dos inertes tem efeito significativo sobre a fluidodinâmica do leito.



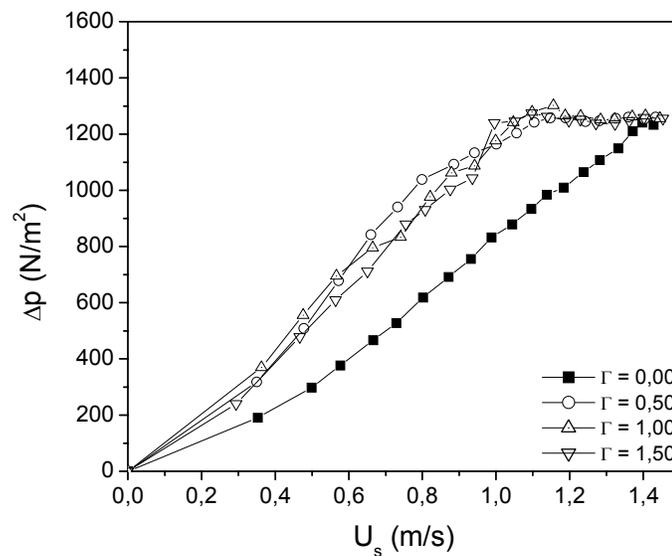
**Figura 4.20:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado em  $\Gamma$ ;  $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$  m;  $T = 40^\circ\text{C}$ ;  $\phi = 0,0040$ .

Na Figura 4.21 verifica-se que a curva característica sem a adição de líquido apresenta queda de pressão na região de leito fixo menor que as observadas para as curvas vibrofluidizadas e isto ocorreu porque a baixas velocidades de ar, a vibração contribuiu para compactação do leito e conseqüente aumento da queda de pressão. Com o aumento da velocidade de ar este comportamento altera-se, onde para o caso vibrado o leito começa a se expandir facilitando a percolação do ar e, conseqüentemente, reduzindo a queda de pressão. Para as curvas obtidas sem a vibração, a velocidade do ar tenta manter suspensas

as partículas ao custo do aumento expressivo da queda de pressão, principalmente na região de transição entre o leito fixo e o fluidizado. A expansão do leito observada para o caso vibrado através da redução da queda de pressão para moderadas velocidades de ar, na verdade ocorre porque, quando o ar tenta manter suspensas as partículas, ocorrem colisões entre as partículas e o vaso provocadas pela vibração, causando a desestruturação desse padrão de escoamento o que desloca desordenadamente as partículas facilitando a passagem de ar. Essas colisões são mais intensas para partículas de maior diâmetro do que para as de diâmetros 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 e isto somado ao efeito coesivo (que é maior para partículas desse tamanho), faz com que se aglomerem. Isso explica porque o comportamento descrito para Figura 4.19 (com  $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$  m) foi muito menos pronunciado do que para Figura 4.21 (com  $d_p = 1,850 \times 10^{-3}$  m). Finalizando, na Figura 4.22 é testado o efeito da adição de glicerol no leito fluidizado e vibrofluidizado mantendo os parâmetros mostrados na Figura 4.21. Como era de se esperar a curva para o leito fluidizado apresentou o início da região de transição entre estados na máxima velocidade de ar, isto é, praticamente não fluidizou em toda a sua extensão. Da mesma forma como foi explicado para a Figura 4.20, a queda de pressão para o leito vibrofluidizado foi maior em toda a extensão das curvas só que neste caso a região de transição entre os estados ocorreu para maiores velocidades de ar.



**Figura 4.21:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado em  $\Gamma$ ;  $d_p = 1,850 \times 10^{-3} \text{ m}$ ;  $T = 40^\circ\text{C}$ ;  $\phi = 0,0000$ .



**Figura 4.22:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado em  $\Gamma$ ;  $d_p = 1,850 \times 10^{-3} \text{ m}$ ;  $T = 40^\circ\text{C}$ ;  $\phi = 0,0005$ .

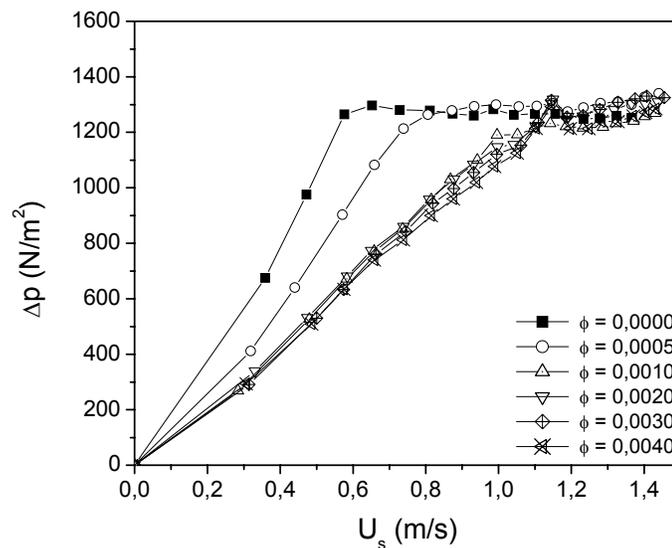
Em praticamente todas as curvas obtidas, independentemente da temperatura, o comportamento observado foi o mesmo descrito aqui, e pode-se observar algo interessante em relação à análise destas curvas características; que

não é necessário utilizar parâmetro vibracional maior que 0,5 na maioria dos casos estudados para obter o comportamento desejado, basta fluidizar o leito a baixas velocidades de ar obtendo economia energética e mantendo altas as taxas de transferências de quantidade de calor, massa e movimento.

#### *4.2.4 Efeito do grau de saturação de líquido*

A última análise será verificar como a adição de líquido influencia a fluidodinâmica do leito. Inicialmente avaliou-se a influência dos diversos graus de saturação de glicerol ( $\phi$ ) adicionados ao leito sem a presença da vibração, na temperatura de 40°C e para o menor diâmetro de partículas ( $1,095 \times 10^{-3}$  m), apresentado na Figura 4.23. Para este diâmetro de partícula foi possível saturar o leito até  $\phi = 0,0040$  e ainda observar a fluidização das partículas. Verifica-se que o aumento do grau de saturação de líquido provoca a redução da queda de pressão nas curvas características para o leito fluidizado. Acontece que com o aumento do volume de glicerol alimentado no leito, aumenta o grau de aderência das partículas estendendo o efeito da aglomeração; esse aumento do número de partículas aglomeradas provoca o escoamento irregular através do leito, e a formação de caminhos entre os aglomerados tendem a “arrastar” poucas partículas reduzindo a queda de pressão. Esse efeito ocorre até o ponto em que a velocidade do ar é suficiente para “romper” este aglomerado bloqueando estes canais e, para baixos valores de saturação, isso ocorre de forma gradual. Quando o grau de saturação é mais alto (neste caso entre 0,0020 a 0,0040) o “rompimento” do leito ocorre de forma abrupta e aparece uma região de grande descontinuidade (“pico”) na região de transição entre o leito fixo e o fluidizado. Verifica-se que para  $\phi$

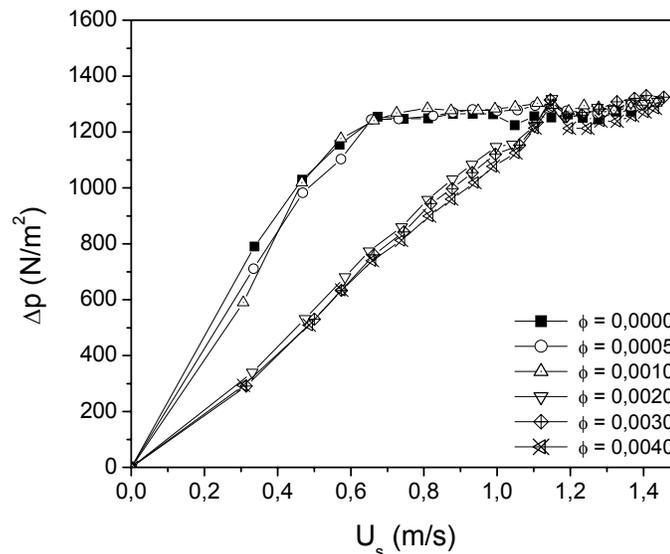
acima de 0,0020 as curvas obtidas praticamente ficaram sobrepostas, indicando que o leito encontrava-se bastante aglomerado e neste estado não sentiu a influência do aumento da saturação, necessitando de altas velocidades de ar para obter-se o regime fluidizado.



**Figura 4.23:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado em  $\phi$ ;  $\Gamma = 0,00$ ;  $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$  m;  $T = 40^\circ\text{C}$ .

Malhotra *et al.* (1984) obtiveram o mesmo comportamento em seu estudo, lembrando que as partículas inertes utilizadas eram de vidro com diâmetro de  $3,53 \times 10^{-4}$  e  $6,67 \times 10^{-4}$  m. Verificou-se nitidamente a suavização e redução na queda de pressão das curvas obtidas por eles para o leito fluidizado. Para o 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  $\phi$ ) reduziu a queda de pressão em jorro estável, já que em função do aumento das forças coesivas, um menor número de partículas migram da região anular para a região de jorro, reduzindo a resistência à passagem de ar. Na Figura 4.24

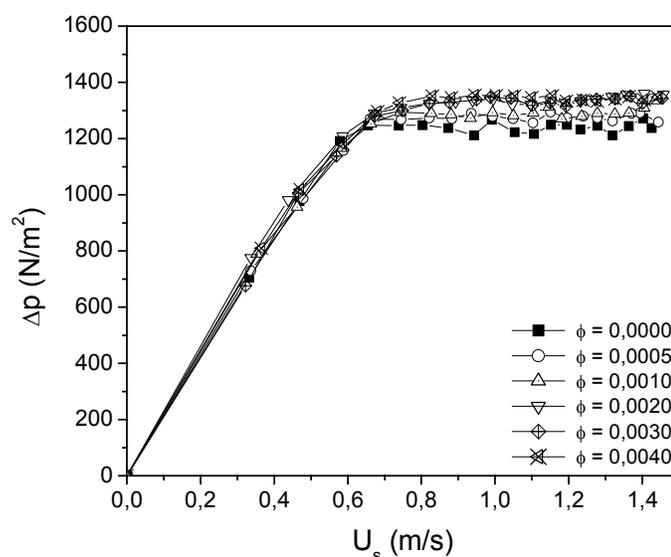
verificou-se que a adição da vibração no leito ( $\Gamma = 0,5$ ) fez com que as curvas a saturação de 0,0005 e 0,0010 se juntassem à curva de saturação de 0,0000 enquanto para maiores valores de saturação as curvas mantiveram-se praticamente inalteradas. Como as pontes líquidas formadas no primeiro caso eram mais fracas, a vibração foi suficiente para compactar o leito e evitar a formação dos canais preferenciais, aumentando portanto a queda de pressão. No segundo caso as forças coesivas eram muito fortes e o leito praticamente não sentiu a vibração. Neste sentido portanto, no primeiro caso as forças vibracionais dominaram a dinâmica do leito e no segundo caso, foram as forças coesivas.



**Figura 4.24:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado em  $\phi$ ;  $\Gamma = 0,50$ ;  $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$  m;  $T = 40^\circ\text{C}$ .

Utilizando-se a intensidade de vibração igual à unidade (Figura 4.25) observa-se a junção de todas as curvas em torno da curva na saturação de 0,0000 (sem glicerol), indicando que neste caso a vibração dominou a dinâmica do leito mesmo a altos valores de saturação. Na região onde o leito apresenta-se

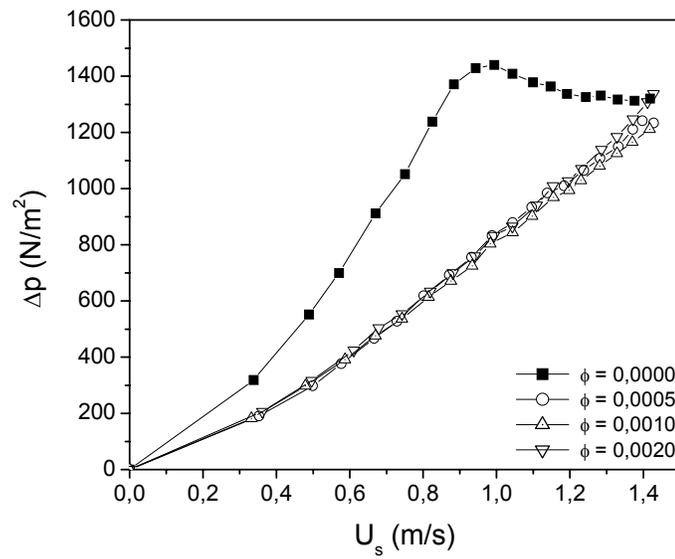
vibrofluidizado verifica-se que a queda de pressão é levemente maior para o maior grau de saturação e a vibração tende a compactar o leito, já a saturação de líquido, dificulta ainda mais a percolação do ar. Estas pequenas oscilações observadas nas curvas na região de vibrofluidização ocorrem devido às oscilações provocadas na queda de pressão em função da vibração e da coalescência de bolhas.



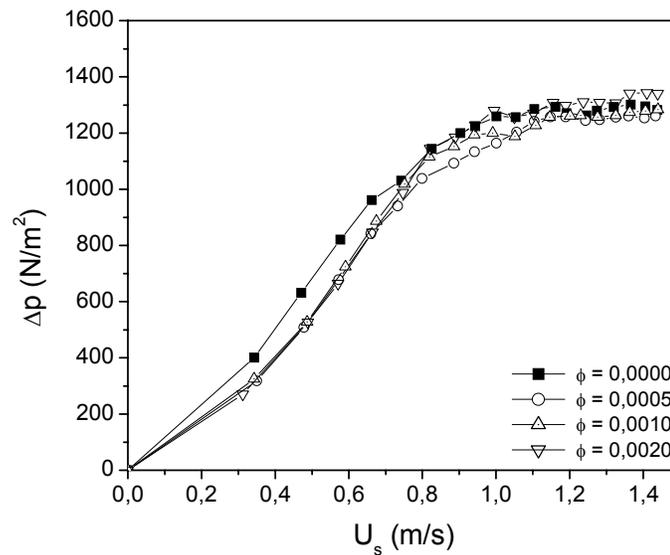
**Figura 4.25:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado em  $\phi$ ;  $\Gamma = 1,00$ ;  $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$  m;  $T = 40^\circ\text{C}$ .

Testou-se também as curvas características em função da saturação de glicerol para o maior diâmetro de partículas ( $1,850 \times 10^{-3}$  m). Na Figura 4.26 observa-se que o leito fluidizou apenas para o caso onde não estava presente o glicerol e na Figura 4.27, com uma pequena intensidade de vibração, foi possível alcançar o estado de leito vibrofluidizado para todas as saturações utilizadas. O aumento do diâmetro das partículas e o efeito da saturação de glicerol foram suficientes para que não ocorresse a fluidização no primeiro caso, mas com a vibração (mesmo para  $\Gamma = 0,5$ ) foi possível “romper” as pontes líquidas, já que as

partículas de maior diâmetro recebem maior influência da vibração. Vale lembrar, que para este diâmetro de partículas, foi utilizado saturação de glicerol no limite de 0,0020 pois acima deste grau a fluidização somente ocorria para o leito vibrado e mesmo assim era bastante instável e irregular.



**Figura 4.26:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado em  $\phi$ ;  $\Gamma = 0,00$ ;  $d_p = 1,850 \times 10^{-3}$  m;  $T = 40^\circ\text{C}$ .



**Figura 4.27:** Curvas da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado em  $\phi$ ;  $\Gamma = 0,50$ ;  $1,850 \times 10^{-3}$  m;  $T = 40^\circ\text{C}$ .

Pode-se verificar de uma forma geral que, em alguns casos, quando o leito é saturado de líquido e o mesmo não fluidiza, com a adição da força vibracional a fluidização é atingida e na maioria dos casos aqui mostrados isso ocorreu para baixos valores de  $\Gamma$  (menores que a unidade) exceto quando o grau de saturação foi muito alto. Essa informação é muito importante para o processamento de materiais na forma de pasta, pois pode auxiliar no projeto de secadores mais eficientes a custos muito mais baixos e, principalmente, que possam operar com pastas altamente coesivas. Vale salientar que, mesmo apresentando um regime fluidizado a baixos valores de  $\Gamma$ , em alguns casos a fluidização foi pobre e irregular principalmente com o aumento da saturação. Uma outra forma de análise do que ocorre no leito durante o processo de fluidização será feita no próximo item, através das curvas obtidas de desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar.

### **4.3 Análise da Fluidodinâmica Através do Desvio Padrão das Medidas de Queda de Pressão no Leito.**

Para as medidas simultâneas de perda de carga e de sua flutuação é recomendado a utilização de transdutores de pressão, que podem registrar as mínimas variações existentes na leitura da queda de pressão. Os valores de queda de pressão foram obtidos através da média aritmética de 300 pontos amostrados e, com estes pontos, a partir de um tratamento estatístico foi possível obter a variação em torno da média, expresso pelo seu desvio padrão. Através das curvas de desvio padrão pretende-se obter informações complementares sobre o comportamento do leito de partículas. Esta análise será apresentada de forma semelhante ao item 4.2, iniciando pelo estudo do efeito da temperatura.

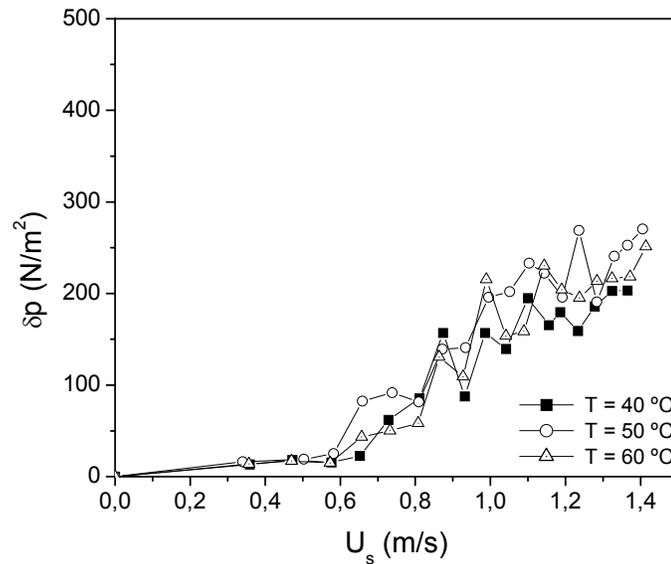
#### *4.3.1 Efeito da temperatura*

No item 4.2 foi verificado que a temperatura exerceu pouca influência sobre as curvas de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar no intervalo de parâmetros estudados. Foi verificado que as curvas obtidas de desvio padrão seguiram a mesma tendência, e assim serão apresentados dois exemplos em situações limites, discutidos a seguir (para as demais situações os dados encontram-se no Apêndice C).

Na Figura 4.28 são apresentadas as curvas de desvio padrão dos dados apresentados na Figura 4.9. Observa-se que a temperatura não exerce influência sobre o desvio padrão, pois não é possível distinguir a diferença de comportamento de uma curva em relação à outra. Esta observação é semelhante às

observações feitas sobre o efeito da temperatura na Figura 4.9, para a qual a viscosidade do ar praticamente não se altera nesta faixa de temperatura.

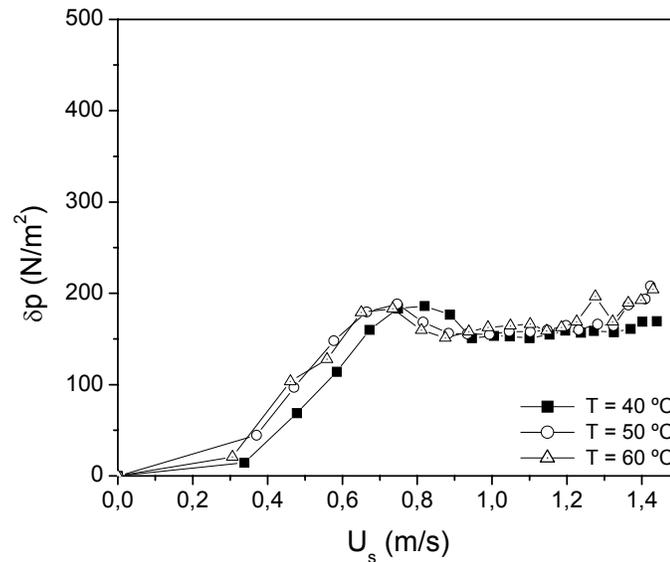
Na Figura 4.28 é possível observar também que as curvas apresentaram duas regiões distintas, onde a primeira coincide com a região de leito fixo para velocidades de ar menores do que 0,58 m/s, apresentando baixos valores de desvio padrão (menores que 25 N/m<sup>2</sup>). A segunda região inicia-se coincidentemente com a região de transição de leito fixo para fluidizado, em velocidade mínima de fluidização ( $U_{mf}$ ) igual a 0,58 m/s e na velocidade de mínima mistura ( $U_{mm}$ ) também em 0,58 m/s. A partir desta velocidade, inicia-se o movimento das partículas no leito, o que pode ser constatado através do aumento do desvio padrão. Isto ocorre porque, quando as partículas começam a ser “arrastadas” pelo ar, provocam alterações no escoamento e conseqüentemente oscilações na queda de pressão, aumentando o desvio padrão. Através da Figura 4.9 percebe-se que, após o regime fluidizado ser alcançado, a queda de pressão permanece praticamente constante, mas na Figura 4.28 nesta mesma região verificam-se oscilações bruscas no desvio padrão. Estas oscilações são provocadas principalmente pela intensa movimentação das partículas e pelo aparecimento de bolhas.



**Figura 4.28:** Curvas de desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar parametrizado na temperatura;  $\Gamma = 0,00$ ;  $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$  m;  $\phi = 0,0000$ .

Na Figura 4.29 é apresentada outra situação limite, agora para o maior diâmetro de partículas ( $d_p = 1,850 \times 10^{-3}$  m) em presença de líquido e de vibração. Com relação ao efeito da temperatura, verifica-se que esta praticamente não influenciou a dinâmica do leito (como também foi observado para a Figura 4.14), já que as curvas da Figura 4.29 não apresentam diferenças significativas umas com relação às outras. Observa-se também que na região de leito fixo, o desvio padrão alcançado é muito maior (com valores de até  $180 \text{ N/m}^2$ ) que o apresentado na Figura 4.28. Isto ocorre porque neste caso está presente a vibração, fazendo com que o leito apresente oscilações na medida da queda de pressão. Nesta figura observa-se ainda que, para velocidades de ar superiores a  $U_{mf}$  (em torno de  $0,85 \text{ m/s}$ ), as curvas apresentam um patamar quase constante. Durante o experimento observou-se visualmente que até velocidades de ar próximas da  $U_{mm}$  obtida (em torno de  $1,30 \text{ m/s}$ ), o leito estava suspenso mas aglomerado (sem a

movimentação das partículas) com a presença de canais preferenciais, mantendo os valores de desvio padrão no mesmo patamar. Apesar deste comportamento ter sido verificado após a  $U_{mf}$  o leito não estava fluidizando como foi descrito. Verificou-se que o início da movimentação das partículas ocorreu apenas a partir da  $U_{mm}$ , verificado pelo “rompimento” dos aglomerados, o que provocou as oscilações observadas nas curvas próximo à máxima velocidade de ar na Figura 4.29, principalmente para as temperaturas de 50 e 60°C.



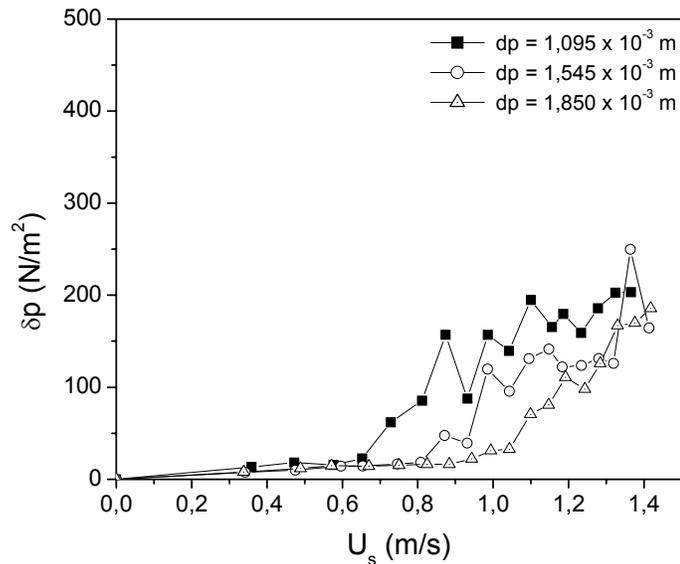
**Figura 4.29:** Curvas de desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar parametrizado na temperatura;  $\Gamma = 1,00$ ;  $d_p = 1,850 \times 10^{-3}$  m;  $\phi = 0,0010$ .

Nos sub-itens seguintes serão analisados individualmente o efeito do escoamento de ar e da vibração para o sistema bifásico (sólido-ar) e trifásico (sólido-ar-líquido), para determinar qual é a influência de cada parâmetro sobre o comportamento do desvio padrão. Em todos os casos verificados observou-se que a influência da temperatura não é significativa no comportamento do desvio

padrão dos dados de queda de pressão no leito, assim nos sub-itens seguintes será feita à análise dos parâmetros na temperatura de 40°C, como feito no item 4.2.

#### *4.3.2 Efeito do diâmetro das partículas inertes*

Primeiro estudou-se o efeito do diâmetro das partículas para o leito fluidizado sem a presença de glicerol. Na Figura 4.30 podem ser observadas mudanças significativas no desvio padrão da queda de pressão na região de leito fluidizado em função dos diferentes diâmetros de partículas. Verifica-se que, na região de leito fixo, o desvio padrão permaneceu quase inalterado em um baixo patamar (inferior a 25 N/m<sup>2</sup>). Isto é um indicativo de que a queda de pressão praticamente não oscilou neste intervalo, e apenas aumentou com o aumento da velocidade de ar como pode ser visto na Figura 4.15. Na Figura 4.30 para a região de leito fluidizado, 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 deste tipo e de menor tamanho são mais propensas à formação de bolhas e a movimentação destas no leito é mais intensa. 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.

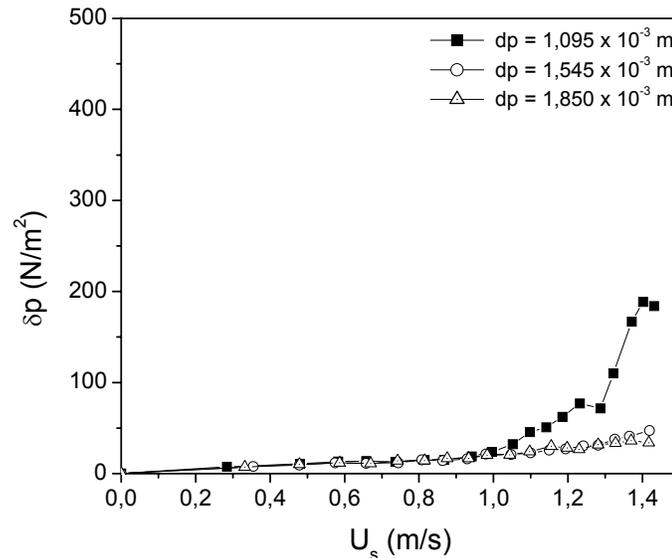


**Figura 4.30:** Curvas de desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\Gamma = 0,00$ ;  $T = 40^\circ \text{ C}$ ;  $\phi = 0,0000$ .

Uma informação complementar que foi observada, é que a movimentação das partículas (para  $d_p = 1,095 \times 10^{-3} \text{ m}$ ) iniciou-se para velocidade superior a  $0,58 \text{ m/s}$  (evidenciada pela mudança brusca de comportamento na curva), coincidindo com o valor obtido de  $U_{mf}$  e de  $U_{mm}$  para este diâmetro de partículas. Observação semelhante ocorreu para os outros diâmetros, onde a movimentação das partículas iniciou-se em torno de  $0,81 \text{ m/s}$  para o diâmetro de  $1,545 \times 10^{-3} \text{ m}$  e em  $0,95 \text{ m/s}$  para o diâmetro de  $1,850 \times 10^{-3} \text{ m}$ , valores próximos aos da  $U_{mf}$  e da  $U_{mm}$  obtidos. Observa-se que com o aumento do diâmetro das partículas, ocorre o aumento nos valores de velocidade na qual inicia-se o seu movimento, fato este explicado pela maior dificuldade que o ar tem de “arrastar” estas partículas em função do seu maior peso.

Na Figura 4.31 estão representadas as curvas de desvio padrão dos dados obtidos para queda de pressão da Figura 4.17, utilizando agora saturação de

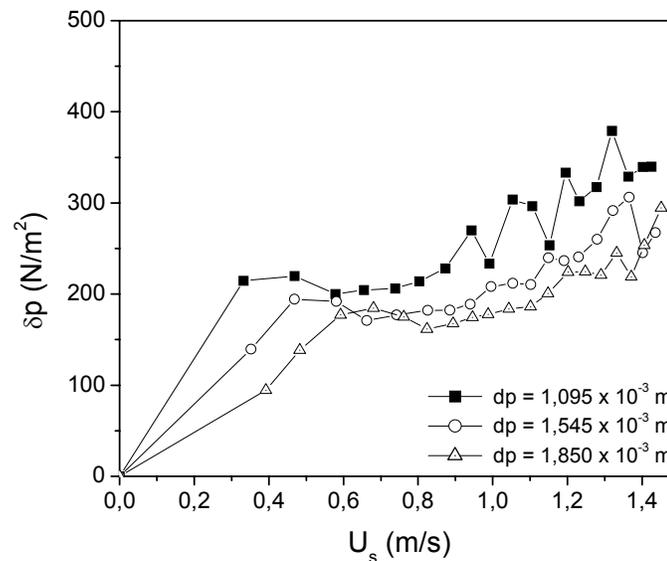
líquido de 0,0010. A primeira informação que se obtém da Figura 4.31 é que a adição de líquido reduz significativamente o desvio padrão das curvas quando comparadas ao caso sem líquido da Figura 4.30. Verifica-se que para os maiores diâmetros de partículas, o desvio padrão máximo obtido ficou abaixo de  $50 \text{ N/m}^2$  e a  $U_{mf}$  e  $U_{mm}$  em torno de  $1,40 \text{ m/s}$ , que é praticamente a máxima velocidade de ar alcançada neste experimento. Essas informações indicam que o leito permaneceu praticamente na região de leito fixo, o que explica os pequenos valores de desvio padrão obtidos e apresentados na Figura 4.31. Nota-se que na presença de glicerol, e para os maiores diâmetros de partículas, a velocidade de ar utilizada não foi suficiente para “romper” as pontes líquidas formadas e o leito não fluidizou. Já para as partículas de menor diâmetro o leito alcançou o regime fluidizado. Observa-se que o desvio padrão obtido para este tamanho de partícula apresenta um aumento mais pronunciado após a velocidade de ar de  $1,00 \text{ m/s}$ , coincidindo com os valores obtidos de  $U_{mf}$  e  $U_{mm}$ . Próximo à máxima velocidade de ar, percebe-se que a curva de desvio padrão para o menor diâmetro de partícula dá um salto, neste momento no leito verificou-se visualmente que as partículas estavam em intensa mistura, bloqueando a formação de canais preferenciais e evitando a formação de grande aglomerados.



**Figura 4.31:** Curvas de desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\Gamma = 0,00$ ;  $T = 40^\circ \text{ C}$ ;  $\phi = 0,0010$ .

A variação do desvio padrão dos dados de queda de pressão quando o leito está sob a influência da vibração (Figura 4.32) é muito mais pronunciada do que nos casos apresentados anteriormente. Verifica-se que o desvio padrão é alto mesmo a baixas velocidades de ar. Este aumento dos valores de desvio padrão são ocasionados pelo efeito da vibração no leito. Verifica-se para a curva obtida para o menor diâmetro de partículas que o desvio padrão atinge um valor de  $215 \text{ N/m}^2$  na velocidade do ar de  $0,33 \text{ m/s}$  e permanece em um patamar quase constante até velocidade de cerca de  $0,88 \text{ m/s}$ . A baixas velocidades de ar isto ocorre porque as partículas colidem mais fortemente com a placa distribuidora de ar, perturbando significativamente o leito e elevando o desvio padrão. No segundo caso, o ar a maiores velocidades e em presença de líquido começa a formar canais preferenciais facilitando a passagem de ar e a manter suspenso o leito como um todo, reduzindo as colisões com a placa distribuidora de ar, atenuando o aumento

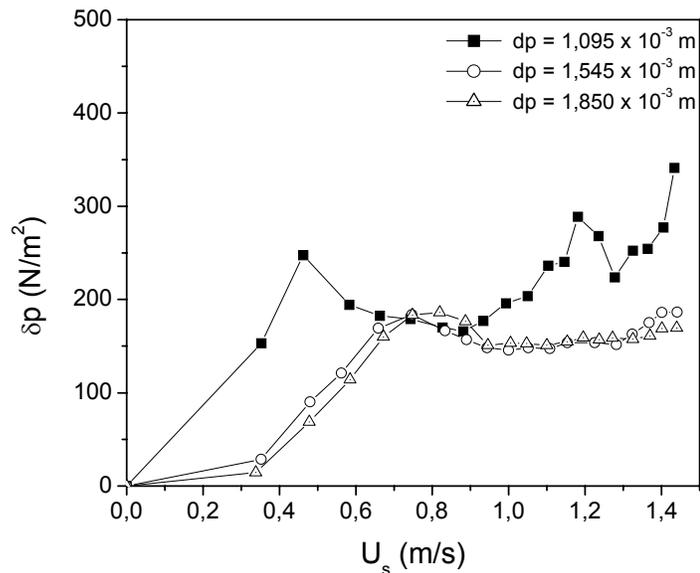
do desvio padrão. Verifica-se que para velocidades de ar maiores que 0,88 m/s o desvio padrão apresenta oscilações e tendência à elevação. Isto ocorre porque nesta fase, as partículas estão em intensa movimentação no leito e mesmo com a presença da vibração ocorre o aparecimento de bolhas, provocando oscilações bruscas nos valores de desvio padrão. Para os maiores diâmetros, verifica-se que as curvas apresentam um desvio padrão menor e as oscilações neste desvio ocorrem a maiores velocidades de ar. Com o leito em presença de vibração não foi possível criar uma associação com as curvas de desvio padrão para identificar a região onde começa a ocorrer a movimentação das partículas (onde se inicia a fluidização), como aconteceu para o leito fluidizado.



**Figura 4.32:** Curvas de desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\Gamma = 1,00$ ;  $T = 40^\circ \text{C}$ ;  $\phi = 0,0000$ .

Na Figura 4.33 estão representadas as curvas de desvio padrão dos dados de queda de pressão apresentados na Figura 4.18, caso semelhante ao

apresentado na Figura 4.32, só que para saturação de glicerol de 0,0010. Observa-se que as curvas apresentadas na Figura 4.33 mostram uma atenuação nos valores obtidos de desvio padrão quando comparadas com a Figura 4.32, isto é, já foi verificado que a vibração aumenta os valores de desvio padrão e o efeito da saturação reduz estes valores, somando-se os dois efeitos tem-se a situação apresentada na Figura 4.33. Para todos os diâmetros apresentados nesta figura, ocorreu a fluidização, mas novamente não foi possível criar associação das curvas de desvio padrão com o momento em que se inicia a movimentação das partículas. Na curva obtida para o menor diâmetro, observa-se que o desvio padrão aumentou bruscamente até velocidade de 0,46 m/s, alcançando o valor de  $250 \text{ N/m}^2$ . A partir desta velocidade o desvio padrão diminui e mantém-se em um patamar quase constante. Esta redução do desvio padrão ocorre devido principalmente a formação de canais preferenciais e da suspensão das partículas. A partir deste patamar, observam-se oscilações na curva de desvio padrão, provocadas principalmente pela intensificação da fluidização e formação de bolhas. Para as partículas de maiores diâmetros, verifica-se que o desvio padrão apresentou menores valores que para o menor diâmetro de partículas em quase toda a sua extensão, e as curvas apresentam-se no mesmo patamar constante, indicando que o desvio padrão é quase independente da velocidade de ar neste intervalo. Apesar de ter apresentado este comportamento, foi verificado que a movimentação das partículas, ocorreu para velocidades de ar superiores a 1,25 m/s.



**Figura 4.33:** Curvas de desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\Gamma = 1,00$ ;  $T = 40^\circ \text{ C}$ ;  $\phi = 0,0010$ .

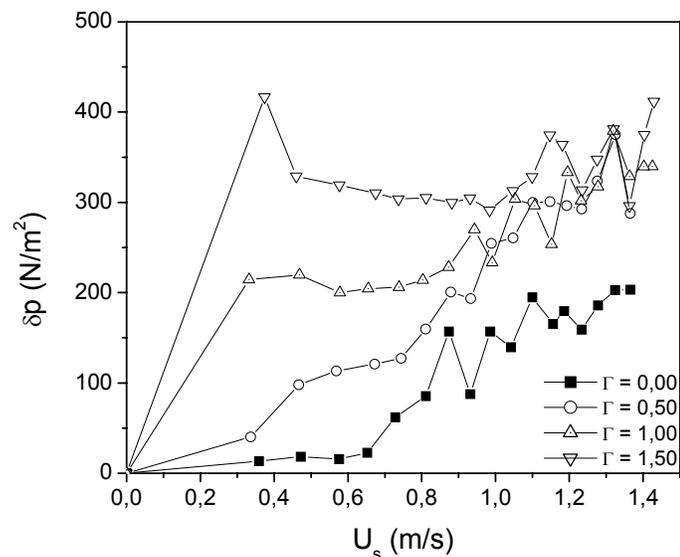
Confirmou-se neste sub-item que o tamanho das partículas teve influência significativa sobre a dinâmica das partículas, principalmente para o leito vibrofluidizado. Já para o leito fluidizado a influência das partículas foi notada apenas no caso onde a fluidização foi possível. Na fluidização com a presença do glicerol o fato de haver aglomeração das partículas prejudicou a análise da influência do diâmetro das partículas. Foi possível estimar o início da movimentação das partículas no leito fluidizado independente da presença de líquido. Já para o leito vibrofluidizado, não foi possível encontrar uma associação direta para prever este ponto.

No próximo sub-item será analisada a influência da vibração sobre as curvas de desvio padrão das medidas de queda de pressão.

#### 4.3.3 Efeito do parâmetro vibracional

Inicialmente avaliou-se a influência das diversas condições vibracionais ( $\Gamma$ ) impostas ao leito sem a adição de líquido na temperatura de 40°C e para o menor diâmetro de partículas ( $1,095 \times 10^{-3}$  m), estes dados estão apresentados na Figura 4.34. As curvas presentes indicam que a vibração influencia significativamente o comportamento do desvio padrão, uma vez que, quanto maior é o parâmetro vibracional, maior o desvio padrão obtido. Percebe-se que para o leito fluidizado e para  $\Gamma$  de 0,5 existe uma tendência de alta nos valores de desvio padrão com o aumento da velocidade de ar. Já para maiores valores de  $\Gamma$  observa-se uma tendência de alta até a velocidade em torno de 0,4 m/s, acima deste valor as curvas permanecem em um patamar quase constante. Para a curva de leito fluidizado, até a velocidade de 0,58 m/s o leito apresenta-se na região de leito fixo, apresentando baixos valores de desvio padrão. Para maiores velocidades, inicia-se a movimentação das partículas no leito, provocando o aumento do desvio padrão. Para altas velocidades de ar, a curva mostra oscilações que indicam que o leito está em intensa movimentação que somada à coalescência de bolhas, provocam as oscilações bruscas no desvio padrão. Para  $\Gamma$  de 0,5 verifica-se que a curva tem um comportamento semelhante ao caso fluidizado, só que apresentando maiores valores de desvio padrão, provocados pela vibração. Para velocidade pouco maior que 0,47 m/s verifica-se um patamar quase constante em uma pequena região, mostrando que o aumento da velocidade começa a manter suspensas as partículas 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, aumentam mais ainda o desvio padrão que

apresenta agora um comportamento oscilatório. Quando o parâmetro vibracional é igual a unidade, observa-se que para velocidade de ar acima de 0,33 m/s a curva apresenta um patamar praticamente constante até velocidade de ar em torno de 0,80 m/s. Até velocidade de 0,33 m/s o desvio padrão aumenta significativamente porque para baixas velocidades de ar, a vibração tem maior influência sobre a dinâmica do leito. Acima de 0,33 m/s, o ar começa a suspender as partículas deixando o leito menos susceptível as oscilações provocadas pelo efeito da vibração. Como as partículas tocam menos intensamente a placa distribuidora de ar, menor também é a oscilação captada pelo transdutor de pressão. Para velocidades de ar acima de 0,90 m/s, as curvas se juntam com todos os casos vibrados, mostrando que o leito neste intervalo encontrava-se em intensa movimentação e com dinâmica praticamente independente do nível de vibração, excluindo-se o caso fluidizado.

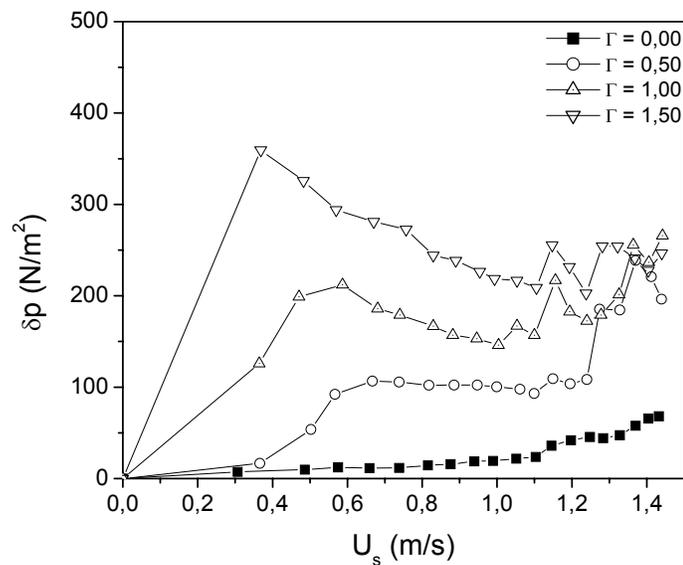


**Figura 4.34:** Curvas de desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar parametrizado em  $\Gamma$ ;  $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$  m;  $T = 40^\circ$  C;  $\phi = 0,0000$ .

Para parâmetro vibracional maior que a unidade, verifica-se alto valor de desvio padrão ( $417 \text{ N/m}^2$ ) na velocidade de  $0,37 \text{ m/s}$ . Isso mostra a grande influência deste nível de vibração a baixas velocidades de ar. Acima desta velocidade as partículas começam a se desprender do fundo do leito, atenuando o efeito da vibração. Quando o leito está fluidizado, é mantido um patamar quase constante até o momento que as curvas apresentam oscilações, indicando a intensa mistura das partículas. No entanto, na Figura 4.19 verifica-se pouca influência da vibração nas curvas de queda de pressão. Isto ocorreu porque as partículas são pequenas (mas pouco coesivas) e a baixas velocidades de ar elas ficam suspensas, atenuando os efeitos da vibração.

Na Figura 4.35 é possível notar um distanciamento maior entre as curvas para o leito fluidizado e o vibrofluidizado quando é adicionado o glicerol sobre as partículas (neste caso  $\phi = 0,0040$ ). A curva fluidizada apresenta uma grande atenuação, sendo aumentada à velocidade na qual inicia a movimentação das partículas ( $U_{mf} = 1,10 \text{ m/s}$  e  $U_{mm} = 1,15$ ). Mesmo após a fluidização, o desvio padrão altera-se muito pouco, caracterizado pelo aparecimento de canais preferenciais em meio aos aglomerados apresentando fluidização muito pobre e irregular. Já para o caso vibrofluidizado verifica-se claramente que a vibração aumentou o desvio padrão e todas as curvas apresentaram uma atenuação dos valores de desvio padrão na região de leito fluidizado, quando comparado aos dados apresentados na Figura 4.34. Como a adição de líquido tende a aglomerar o leito, verifica-se que, com o aumento da velocidade de ar, as partículas são mantidas suspensas como um todo e mesmo com a vibração tem-se o aparecimento de canais preferenciais, reduzindo mais significativamente o desvio

padrão e tornando a fluidização menos intensa. Com o aumento da velocidade do ar, aumentam os canais preferenciais atenuando mais ainda as curvas de desvio padrão. A altas velocidades, o leito apresenta movimentação mais intensa caracterizada pelo aparecimento de bolhas maiores e pequenos conjuntos de aglomerados, o que provoca as oscilações observadas nas curvas da Figura 4.35. Essas oscilações nas curvas representam, neste caso, um aumento médio dos valores de desvio padrão, ocasionado justamente por essa movimentação mais irregular e compacta que no caso sem a adição de pasta.



**Figura 4.35:** Curvas de desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar parametrizado em  $\Gamma$ ;  $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$  m;  $T = 40^\circ$  C;  $\phi = 0,0040$ .

Não serão apresentados aqui os resultados para os maiores diâmetros de partículas, pois foram muito semelhantes aos resultados obtidos anteriormente. Uma observação a ser feita, é que para os maiores diâmetros de partículas foram verificadas poucas (em alguns casos nenhuma) oscilações nas curvas de desvio padrão para altas velocidades de ar, principalmente quando está

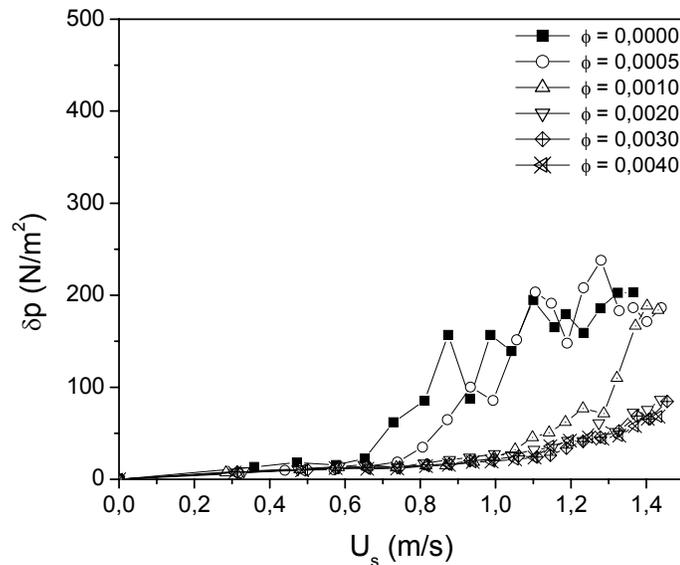
presente o glicerol, indicando que nesta situação a movimentação das partículas foi menos intensa e foi caracterizada por bolhas maiores e em menor quantidade que para o menor diâmetro de partículas. Garim (1998) em um leito vibrofluidizado com partículas de vidro ( $d_p = 1,10 \times 10^{-3}$  m) trabalhando com parâmetro vibracional em torno da unidade, também verificou maiores valores de desvio padrão para maiores valores de  $\Gamma$ , e com o aumento da velocidade de ar, o leito vibrofluidizado apresentou desvio padrão muito superior ao apresentado para o leito fluidizado. Camargo e Freire (2002) utilizando inertes de vidro ( $d_p = 7,00 \times 10^{-4}$  m) verificaram que, para parâmetro vibracional em torno de 2, o aumento da velocidade de ar aproxima a curva de desvio padrão da curva obtida para o leito fluidizado. No primeiro caso, o aumento do desvio padrão com o aumento da velocidade de ar foi ocasionado pela compactação do leito com a vibração e no segundo caso, a redução do desvio padrão com o aumento da velocidade de ar foi ocasionado pela expansão do leito com a vibração.

Em todas as curvas obtidas de desvio padrão, observou-se considerável influência da vibração, independente do parâmetro vibracional utilizado. Algo interessante a ser observado, é que as curvas de queda de pressão correspondentes, em alguns casos, não foram muito influenciadas pela vibração, exceto para os maiores diâmetros de partículas ou quando estava presente o glicerol. Isto indica que se pode obter informações complementares a respeito da fluidodinâmica do leito através das curvas de desvio padrão, principalmente quando não podem ser detectadas as variações através apenas da média dos valores da queda de pressão. No próximo sub-item será analisada a influência da adição de líquido no leito sobre as curvas de desvio padrão da queda de pressão.

#### 4.3.4 Efeito do grau de saturação de líquido

A última análise será verificar como a adição de uma quantidade de líquido influencia a fluidodinâmica do leito através das curvas de desvio padrão da queda de pressão no leito. Inicialmente avaliou-se a influência dos diversos graus de saturação de glicerol adicionados ao leito sem a presença da vibração, na temperatura de 40°C, para o menor diâmetro de partículas ( $1,095 \times 10^{-3}$  m), estando os dados estão apresentados na Figura 4.36. Nesta figura constata-se que na região de leito fixo, as curvas de desvio padrão são independentes da adição de líquido, permanecendo todas em um mesmo patamar inferior a  $25 \text{ N/m}^2$ . Para a região de leito fluidizado, verifica-se que o aumento do grau de saturação de líquido provoca a redução nos valores de desvio padrão. Isto acontece porque com o aumento do volume de glicerol no leito, aumenta o grau de aderência das partículas estendendo o efeito da aglomeração, dificultando a fluidização. Verifica-se que para  $\phi$  acima de 0,0020 as curvas obtidas foram praticamente idênticas, indicando que o leito encontrava-se bastante aglomerado e neste estado não foi influenciado pelo aumento da saturação, necessitando de altas velocidades de ar para obter-se o regime fluidizado. Este regime foi alcançado mas foi caracterizado por uma fluidização pobre e irregular, apresentando canais preferenciais. Verifica-se que para valores de  $\phi$  até 0,0020 a fluidização ocorre apresentando uma inclinação bem definida nas curvas, coincidindo com o início da movimentação das partículas. Quando maior o grau de saturação, maior o valor de velocidade no qual ocorre o “rompimento” do leito para iniciar a fluidização. Verifica-se então que a adição de líquido tende a aglomerar o leito e evitar que este consiga alcançar o regime fluidizado, o que ocasiona reduzidos valores de

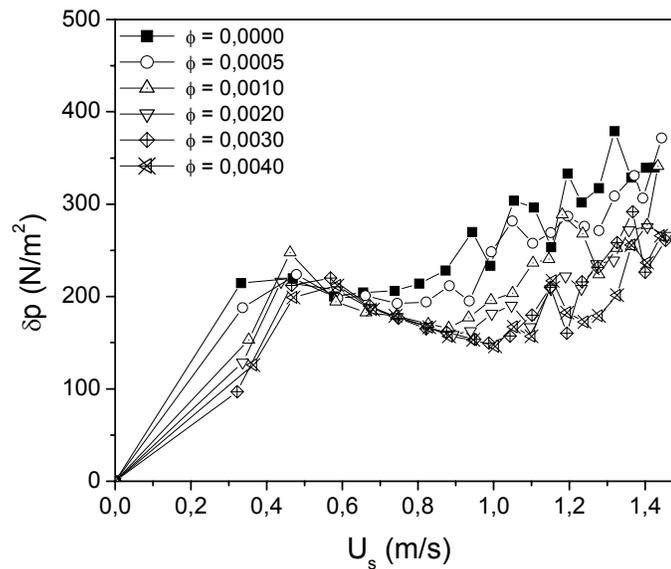
desvio padrão. Verifica-se também que para grau de saturação inferior a 0,0020 e após o leito já estar fluidizado, as curvas apresentam oscilações indicando intensa movimentação das partículas no leito.



**Figura 4.36:** Curvas de desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar parametrizado em  $\phi$ ;  $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$  m;  $T = 40^\circ \text{C}$ ;  $\Gamma = 0,00$ .

Adicionando a vibração ao sistema, (Figura 4.37) observa-se a junção de todas as curvas em torno da velocidade de ar de 0,50 m/s. Na região de leito fixo, verifica-se que o aumento da saturação provoca a redução dos valores de desvio padrão, indicando maior aglomeração das partículas e menor influência da vibração sobre o aglomerado. Na região de leito fluidizado verifica-se que quanto maior o grau de saturação, menor o desvio padrão, indicando que o leito apesar de fluidizado, apresenta canais preferenciais e pontos de aglomeração. Com o aumento da velocidade de ar, esta região apresenta oscilações nas curvas, porque o sistema a baixos valores de saturação, é caracterizado pelas alterações na resistência à passagem de ar, como a coalescência de bolhas e a intensa mistura e,

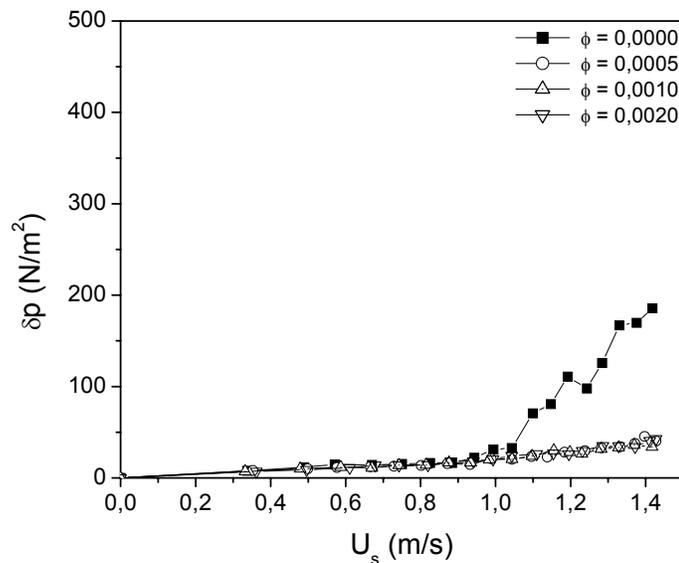
para maiores quantidades de líquido, pelo “rompimento” abrupto dos aglomerados e a intensa mistura das partículas. Portanto de forma geral, a vibração aumenta o desvio padrão de todas as curvas, principalmente a baixas velocidades de ar, quando comparados ao caso fluidizado da Figura 4.36.



**Figura 4.37:** Curvas de desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar parametrizado em  $\phi$ ;  $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$  m;  $T = 40^\circ \text{C}$ ;  $\Gamma = 1,00$ .

Testou-se também as curvas de desvio padrão em função da saturação de glicerol para o maior diâmetro de partículas ( $1,850 \times 10^{-3}$  m). Na Figura 4.38 observa-se que o leito fluidizou apenas para o caso onde não estava presente o glicerol e na Figura 4.39 com uma pequena intensidade de vibração foi possível alcançar o estado de leito vibrofluidizado para todas as curvas. Na Figura 4.38, observa-se que as curvas de desvio padrão obtidas quando o glicerol está presente, apresenta valores muito baixos para toda a extensão de velocidade de ar, que não foi suficiente para “romper” o leito. Quando não estava presente o glicerol, o início da movimentação das partículas coincide com os valores obtidos

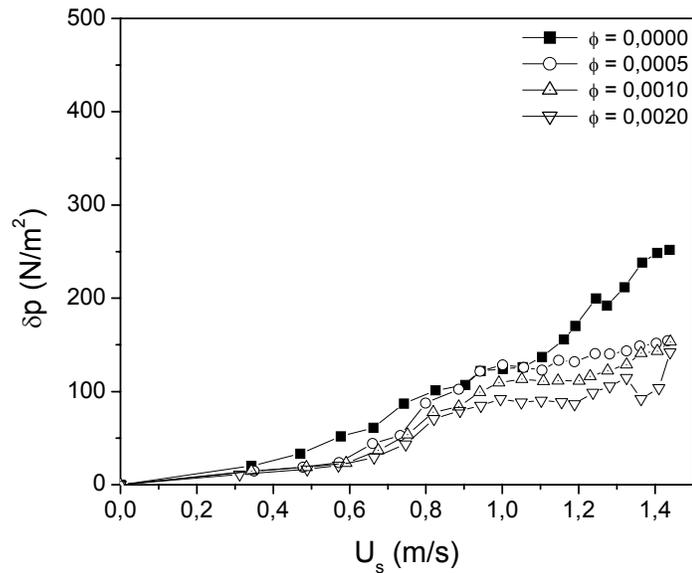
de  $U_{mf}$  e  $U_{mm}$ . Na Figura 4.39 verifica-se que com o efeito da vibração foi possível obter o regime fluidizado, observando-se neste caso também o aumento dos valores de desvio padrão para todas as curvas quando comparadas ao caso fluidizado. Esse aumento é menos intenso quando comparado com as curvas obtidas para o menor diâmetro de partículas e praticamente não são verificadas oscilações nas curvas próximo a máxima velocidade de ar. Isto ocorre porque a movimentação das partículas de maior diâmetro é menos intensa e com formação de menos bolhas (desconsiderando a vibração). Para maiores graus de saturação também são observados canais preferenciais maiores, dificultando o “rompimento” do leito sem o efeito da vibração.



**Figura 4.38:** Curvas de desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar parametrizado em  $\phi$ ;  $d_p = 1,850 \times 10^{-3}$  m;  $T = 40^\circ$  C;  $\Gamma = 0,00$ .

Portanto verifica-se que na região de leito fixo, as curvas de desvio padrão sempre apresentam o mesmo comportamento, exceto quando está presente a vibração. Já a região de leito fluidizado é caracterizada por altos valores de

desvio padrão da queda de pressão no leito, e estes são maiores quando está presente a vibração, para o intervalo de  $\Gamma$  utilizado neste trabalho.



**Figura 4.39:** Curvas de desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar parametrizado em  $\phi$ ;  $d_p = 1,850 \times 10^{-3}$  m;  $T = 40^\circ \text{C}$ ;  $\Gamma = 0,50$ .

No próximo item será feita a análise dos valores obtidos de velocidade mínima de fluidização ( $U_{mf}$ ) e de velocidade mínima de mistura ( $U_{mm}$ ).

#### 4.4 Velocidade Mínima de Fluidização e Velocidade Mínima de Mistura

As metodologias para obtenção da velocidade mínima de fluidização ( $U_{mf}$ ) e da velocidade mínima de mistura ( $U_{mm}$ ) estão descritas no capítulo 3, sendo a primeira obtida através da curva característica e a segunda através do comportamento no leito obtido visualmente (neste trabalho  $U_{mf}$  pode se referir coletivamente ao leito com vibração ou sem vibração, ou seja, ao leito vibrofluidizado ou ao fluidizado). Nas Tabelas 4.1 e 4.2 estão os valores de velocidade mínima de fluidização e da velocidade mínima de mistura, ambos na condição inicial, usada como referência no adimensional das Figuras 4.40 a 4.45. Na Tabela 4.1  $U_{mf0}$  é a velocidade mínima de fluidização e  $U_{mm0}$  é a velocidade mínima de mistura, ambas sem a presença de líquido e na Tabela 4.2  $U_{mf0}$  é a velocidade mínima de fluidização e  $U_{mm0}$  é a velocidade mínima de mistura ambos sem a presença de vibração. Com os valores de  $U_{mf0}$  e de  $U_{mm0}$  é possível obter alguns dos valores de  $U_{mf}$  e de  $U_{mm}$  a partir das Figuras 4.40 a 4.45 (todos os dados relativos a  $U_{mf}$  e a  $U_{mm}$  se encontram no apêndice B).

**Tabela 4.1:** Valores da velocidade mínima de fluidização e da velocidade mínima de mistura, na presença de vibração mas sem presença de líquido.

|                                       |          | $\phi = 0,0000$ |       |       |                 |       |       |      |
|---------------------------------------|----------|-----------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|------|
|                                       |          | $U_{mf0}$ (m/s) |       |       | $U_{mm0}$ (m/s) |       |       |      |
|                                       |          | 40 °C           | 50 °C | 60 °C | 40 °C           | 50 °C | 60 °C |      |
| $d_p$ ( $\times 10^{-3}$ )<br>1,095 m | $\Gamma$ | 0,00            | 0,58  | 0,58  | 0,57            | 0,58  | 0,58  | 0,58 |
|                                       |          | 0,50            | 0,57  | 0,61  | 0,60            | 0,58  | 0,58  | 0,57 |
|                                       |          | 1,00            | 0,60  | 0,60  | 0,60            | 0,58  | 0,57  | 0,49 |
|                                       |          | 1,50            | 0,63  | 0,61  | 0,60            | 0,57  | 0,57  | 0,48 |
| $d_p$ ( $\times 10^{-3}$ )<br>1,545 m | $\Gamma$ | 0,00            | 0,73  | 0,87  | 0,88            | 0,87  | 0,87  | 0,88 |
|                                       |          | 0,50            | 0,72  | 0,79  | 0,74            | 0,82  | 0,88  | 0,88 |
|                                       |          | 1,00            | 0,83  | 0,95  | 0,93            | 0,82  | 0,81  | 0,88 |
|                                       |          | 1,50            | 0,82  | 0,87  | 0,97            | 0,82  | 0,82  | 0,82 |
| $d_p$ ( $\times 10^{-3}$ )<br>1,850 m | $\Gamma$ | 0,00            | 0,90  | 0,91  | 0,90            | 0,99  | 0,94  | 0,96 |
|                                       |          | 0,50            | 0,83  | 0,84  | 0,83            | 0,94  | 0,88  | 0,89 |
|                                       |          | 1,00            | 0,99  | 1,00  | 1,00            | 0,90  | 0,82  | 0,89 |
|                                       |          | 1,50            | 0,95  | 1,00  | 1,00            | 0,90  | 0,82  | 0,84 |

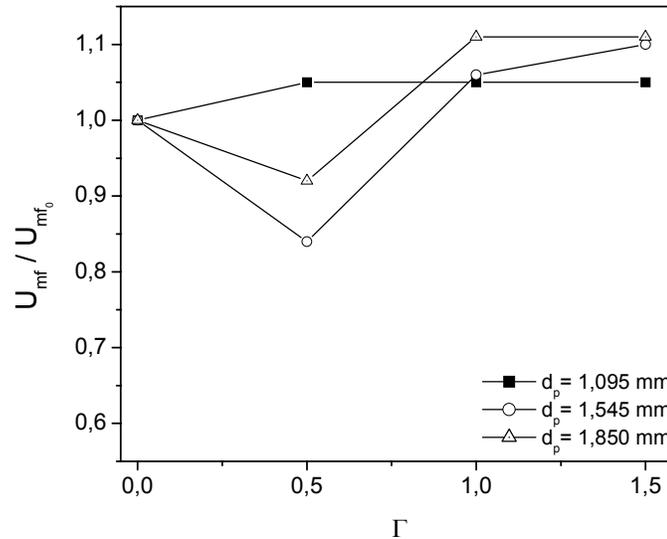
**Tabela 4.2:** Valores da velocidade mínima de fluidização e da velocidade mínima de mistura, na presença de líquido mas sem a presença de vibração.

|                                       |        | $\Gamma = 0,00$ |       |       |                 |       |       |      |
|---------------------------------------|--------|-----------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|------|
|                                       |        | $U_{mf0}$ (m/s) |       |       | $U_{mm0}$ (m/s) |       |       |      |
|                                       |        | 40 °C           | 50 °C | 60 °C | 40 °C           | 50 °C | 60 °C |      |
| $d_p$ ( $\times 10^{-3}$ )<br>1,095 m | $\phi$ | 0,0000          | 0,58  | 0,58  | 0,57            | 0,58  | 0,58  | 0,58 |
|                                       |        | 0,0005          | 0,78  | 0,77  | 0,87            | 0,74  | 0,67  | 0,81 |
|                                       |        | 0,0010          | 1,03  | 0,87  | 0,96            | 1,00  | 0,86  | 0,89 |
|                                       |        | 0,0020          | 1,07  | 1,05  | 1,05            | 1,15  | 1,15  | 1,10 |
|                                       |        | 0,0030          | 1,07  | 1,06  | 1,10            | 1,15  | 1,15  | 1,15 |
|                                       |        | 0,0040          | 1,10  | 1,13  | 1,10            | 1,15  | 1,24  | 1,20 |
| $d_p$ ( $\times 10^{-3}$ )<br>1,545 m | $\phi$ | 0,0000          | 0,73  | 0,87  | 0,88            | 0,87  | 0,87  | 0,88 |
|                                       |        | 0,0005          | 1,22  | 1,21  | 1,09            | 1,33  | 1,29  | 1,15 |
|                                       |        | 0,0010          | 1,37  | 1,25  | 1,23            | 1,37  | 1,29  | 1,28 |
|                                       |        | 0,0020          | -     | -     | -               | 1,37  | 1,33  | 1,36 |
|                                       |        | 0,0030          | -     | -     | -               | -     | -     | -    |
|                                       |        | 0,0040          | -     | -     | -               | -     | -     | -    |
| $d_p$ ( $\times 10^{-3}$ )<br>1,850 m | $\phi$ | 0,0000          | 0,90  | 0,91  | 0,90            | 0,99  | 0,94  | 0,96 |
|                                       |        | 0,0005          | 1,40  | 1,27  | 1,09            | 1,40  | 1,24  | 1,33 |
|                                       |        | 0,0010          | 1,42  | 1,37  | 1,35            | 1,42  | 1,37  | 1,41 |
|                                       |        | 0,0020          | -     | -     | -               | -     | -     | -    |
|                                       |        | 0,0030          | -     | -     | -               | -     | -     | -    |
|                                       |        | 0,0040          | -     | -     | -               | -     | -     | -    |

As curvas de  $U_{mf}/U_{mf0}$  foram obtidas sob diversas condições e estão apresentadas nas Figuras 4.40, 4.42 e 4.44. Foram obtidos também dados de  $U_{mm}/U_{mm0}$  e são apresentados nas Figura 4.41, 4.43 e 4.45.

O primeiro caso a ser analisado apresentado na Figura 4.40 mostra a influência da intensidade de vibração sobre a velocidade mínima de fluidização parametrizado no diâmetro médio das partículas inertes, na ausência de glicerol. Para o menor diâmetro médio de partícula ( $1,095 \times 10^{-3}$  m) nas condições apresentadas verifica-se que ocorreu um “suave” aumento no valor da  $U_{mf}$  até  $\Gamma = 0,5$  e a partir daí manteve-se praticamente constante até a máxima vibração. Para os inertes com diâmetros médios de  $1,545 \times 10^{-3}$  e  $1,850 \times 10^{-3}$  m quando o leito foi vibrado, os valores de  $U_{mf}$  apresentaram inicialmente redução até  $\Gamma 0,5$ .

Seqüencialmente o aumento do parâmetro vibracional ocasionou o aumento de  $U_{mf}$  para valores inclusive maiores que no caso fluidizado, como pode ser visto pelo adimensional na Figura 4.40.

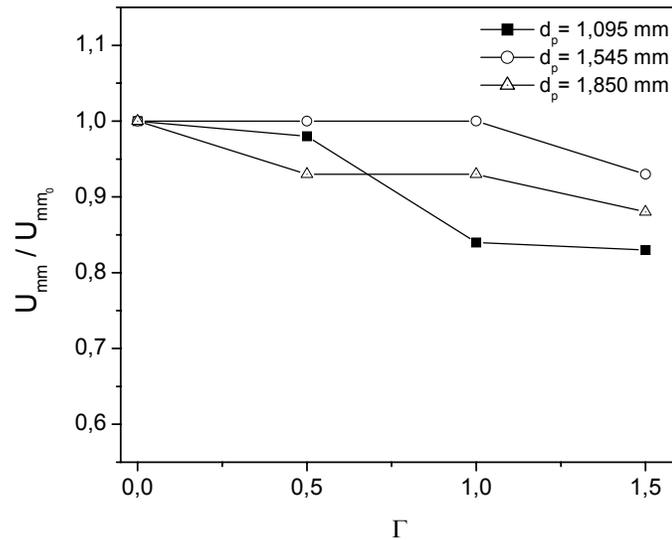


**Figura 4.40:** Adimensional de velocidade mínima de fluidização em função do parâmetro vibracional parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\phi = 0,0000$ ;  $T = 60^\circ\text{C}$ .

Gupta e Mujumdar (1980a) também verificaram que  $U_{mf}$  diminui com o aumento de  $\Gamma$  (para  $\Gamma$  menor que a unidade) e depois aumenta com o aumento de  $\Gamma$ , utilizando como inertes discos de polietileno ( $d_p = 3,11 \times 10^{-3}$  m). Para um leito fluidizado agitado Khalid e Mujumdar (1982) verificaram o aumento de  $U_{mf}$  com o aumento da intensidade de agitação para peneiras moleculares ( $d_p = 2,03 \times 10^{-3}$  e  $3,57 \times 10^{-3}$  m). Para  $\Gamma$  até próximo da unidade, Garim e Freire (1994) também verificaram o aumento de  $U_{mf}$  com o aumento de  $\Gamma$ , utilizando como inertes esferas de vidro ( $d_p = 1,1 \times 10^{-3}$  m). O aumento de  $U_{mf}$  ocasionado pelo aumento de  $\Gamma$  não tem significado físico, como foi declarado por

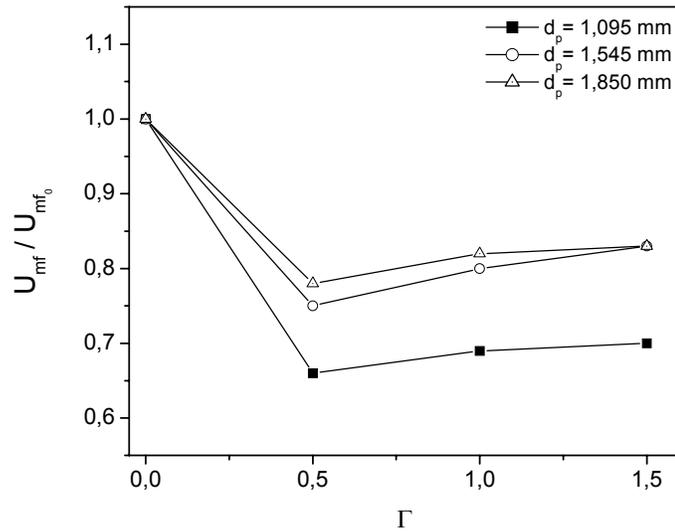
Gupta e Mujumdar (1980a). Esta incoerência ocorre principalmente porque as curvas características para o leito vibrofluidizado geralmente apresentam prolongamento da região de transição entre o leito fixo e o fluidizado e/ou vários patamares de queda de pressão, inviabilizando na maioria dos casos aqui observados a utilização deste método para determinar o ponto onde inicia a fluidização das partículas.

Na Figura 4.41 são mostrados os valores obtidos de  $U_{mm}$  nas mesmas condições apresentadas na Figura 4.40. Para todas as curvas verifica-se uma “leve” redução de  $U_{mm}$  com o aumento da intensidade de vibração. Para ambas as figuras não serão comparadas entre si as curvas de diferentes diâmetros, porque a adimensionalização foi feita com base no valor inicial da velocidade para cada curva independente, isto é,  $U_{mf0}$  e  $U_{mm0}$  são diferentes para cada curva. Esta metodologia facilita a observação das curvas e a comparação com as do trabalho de Gupta e Mujumdar (1980a), mas inviabiliza uma correta comparação entre elas. Na Figura 4.40 portanto confirmam-se as observações de Gupta e Mujumdar (1980a) de que a definição da velocidade mínima de fluidização para os leitos vibrofluidizados não descreve o real comportamento do leito. A definição de velocidade de mínima mistura proposta por Gupta e Mujumdar (1980a) (em substituição a definição anterior), dá uma boa estimativa da mínima velocidade de ar necessária para agitar as partículas no leito para uma dada aceleração vibracional. O comportamento do leito até o momento foi semelhante ao observado por estes autores, apesar de serem utilizados como inertes discos de polietileno e peneiras moleculares (esféricas).

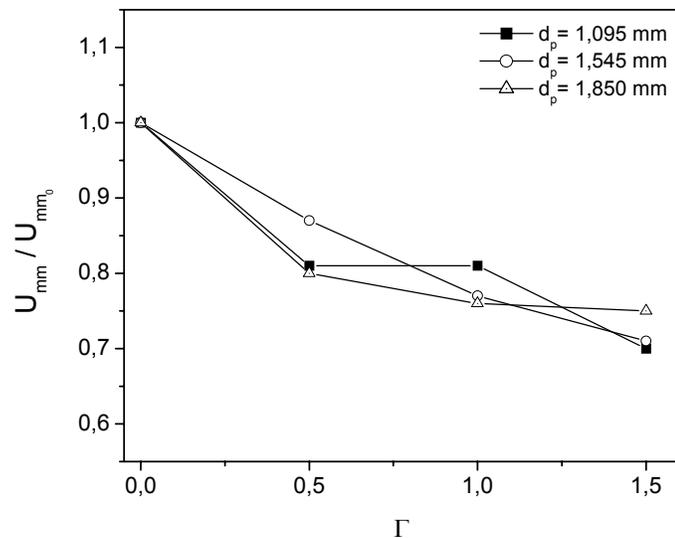


**Figura 4.41:** Adimensional de velocidade mínima de mistura em função do parâmetro vibracional parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\phi = 0,0000$ ;  $T = 60^\circ\text{C}$ .

No estudo do comportamento da  $U_{mf}$  em presença de líquido (Figura 4.42 com  $\phi$  de 0,0005) observa-se que a vibração reduziu bruscamente a  $U_{mf}$  até  $\Gamma = 0,5$ . Deste ponto em diante o aumento da aceleração vibracional provoca um “suave” aumento de  $U_{mf}$ . Na Figura 4.43 (em presença de glicerol), verifica-se que  $U_{mm}$  diminui com o aumento da intensidade de vibração para todo o intervalo de  $\Gamma$ . Esta dinâmica verificada, mostra novamente que a definição convencional de  $U_{mf}$  não pode ser aplicada satisfatoriamente para estimar a velocidade mínima de ar necessária para agitar as partículas no leito sob condições vibratórias, situação que foi satisfeita pelos dados obtidos de  $U_{mm}$ .



**Figura 4.42:** Adimensional de velocidade mínima de fluidização em função do parâmetro vibracional parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\phi = 0,0005$ ;  $T = 60^\circ\text{C}$ .



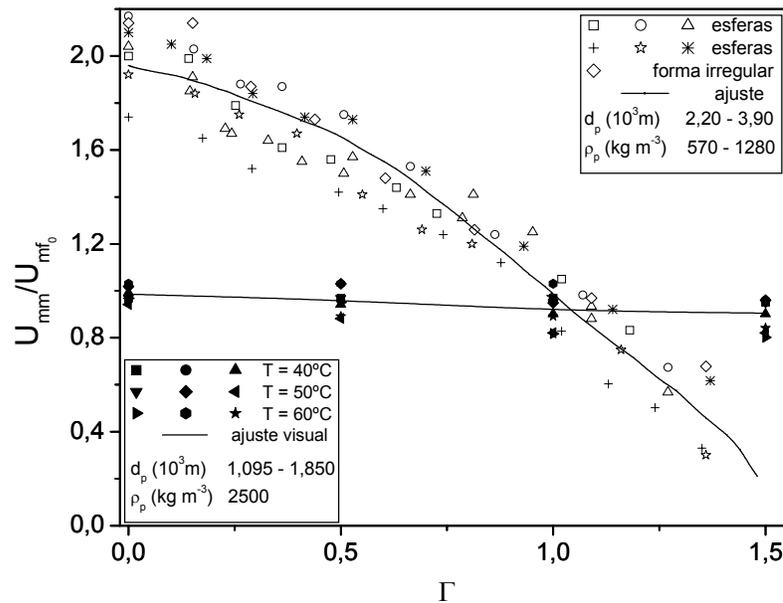
**Figura 4.43:** Adimensional de velocidade mínima de mistura em função do parâmetro vibracional parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\phi = 0,0005$ ;  $T = 60^\circ\text{C}$ .

É necessário salientar que  $U_{mm}$  é uma medida visual, o que pode provocar distorções quando feita por outro pesquisador e quantitativamente

dificulta comparações. Mesmo assim, esta metodologia é muito útil quando se pretende avaliar o comportamento do leito e predizer quais condições provocam a redução da velocidade de ar necessária para movimentar as partículas no leito, que é de fundamental importância no projeto deste tipo de equipamento. Neste trabalho, em função da boa distribuição dos valores de velocidade superficial de ar coletados, da utilização de um sistema de aquisição de dados e da prática na observação do comportamento no leito, foi possível coletar valores de  $U_{mm}$  mais facilmente e de forma confiável. Estes valores estavam geralmente compreendidos em uma região visual estreita facilitando a coleta, apesar da mesma não ser uma região muito bem definida. Khalid e Mujumdar (1982) também verificaram o decréscimo de  $U_{mm}$  com o aumento da intensidade de vibração em um leito fluidizado agitado, neste caso utilizando como inertes peneiras moleculares ( $d_p = 3,57 \times 10^{-3}$  m) e sílica gel ( $d_p = 1,05 \times 10^{-3}$  m). Mujumdar (1984) observou que a  $U_{mm}$  decresce mais expressivamente até  $\Gamma = 0,4$  e após este valor a redução é mais “suave”, lembrando que neste caso utilizou partículas inertes de polietileno ( $d_p = 3,5 \times 10^{-3}$  m) e peneiras moleculares ( $d_p = 2,5 \times 10^{-3}$  m). Erdész e Ormós (1984) também verificaram a redução de  $U_{mm}$  (definida por eles como  $U_{mf}$  mas foi obtido da forma como foi definido  $U_{mm}$  neste trabalho) com o aumento da intensidade de vibração, para  $\Gamma$  variando de 0 a 13,4.

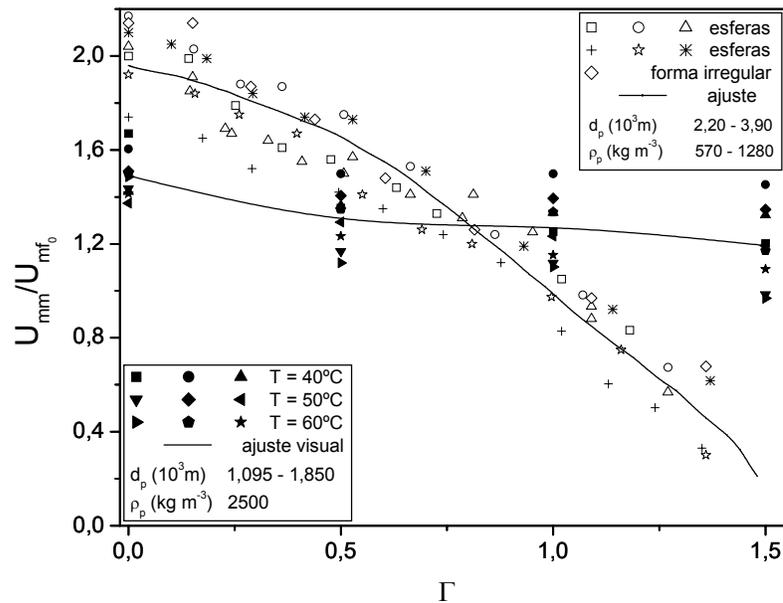
Para comparar qualitativamente as medidas de  $U_{mm}$  sob a influência da vibração, usou-se os dados de Gupta e Mujumdar (1980a) adimensionalizados, dividindo  $U_{mm}$  pela velocidade mínima de fluidização para o leito fluidizado ( $U_{mf0}$ ) obtido pela correlação de Wen e Yu (1966) (Equação 3), sem a presença de glicerol, como é apresentado na Figura 4.44. Nesta figura nota-se uma grande

diferença entre os dois conjuntos de medidas, no conjunto de dados obtidos neste trabalho, a redução de  $U_{mm}$  é muito pequena quando comparada ao conjunto de dados obtidos por Gupta e Mujumdar (1980a). Isto ocorre provavelmente, devido às diferenças existentes no tipo de partícula inerte utilizado (tendo implícito a sua densidade, forma, tamanho, etc.) e na altura de leito estático. As propriedades físicas dos inertes utilizados pelos autores e a deste trabalho estão mostrados na Figura 4.44, lembrando que neste trabalho a amplitude foi mantida invariável em  $3,0 \times 10^{-4}$  m. De forma complementar, foi possível observar que, no trabalho de Gupta e Mujumdar (1980a), o leito iniciou a mistura das partículas a velocidades de ar em torno de duas vezes maiores que os valores de  $U_{mf0}$  obtidos pela correlação de Wen e Yu (Equação 3) para  $\Gamma = 0$ . Para  $\Gamma$  próximo de 1,3 o valor de  $U_{mm}$  é praticamente metade do valor obtido para  $U_{mf0}$ . Já neste trabalho, os valores de  $U_{mm}$  ficaram com valores próximos ao obtido para  $U_{mf0}$ , decrescendo muito pouco com o aumento da intensidade de vibração. Vale lembrar que a equação de Wen e Yu (1966) (Equação 3) para obtenção de  $U_{mf0}$  leva em consideração propriedades das partículas inertes usadas, como densidade e diâmetro, e quanto menor o valor destas propriedades, menor é o valor de  $U_{mf0}$  obtido pela equação.



**Figura 4.44:** Adimensional de velocidade mínima de mistura em função do parâmetro vibracional;  $\phi = 0,0000$ ; símbolo cheio: este trabalho;  $H_0 = 8,0 \times 10^{-3}$  m; esferas de vidro; símbolo vazio: Gupta e Mujumdar (1980a);  $H_0 = 12,5 \times 10^{-3}$  a  $50,0 \times 10^{-3}$  m.

Na Figura 4.45 são apresentados os dados obtidos por Gupta e Mujumdar (1980a) comparando com os resultados deste trabalho para o caso em que se utilizou o grau de saturação de glicerol de 0,0010. Verifica-se que a adição de líquido no leito provoca a redução mais acentuada da  $U_{mm}$  quando comparada ao caso sem pasta e os pontos apresentam-se maiores que a unidade para a maioria dos dados, mostrando que  $U_{mm}$  obtido é maior que  $U_{mf0}$ . Verifica-se então que a adição de glicerol provoca a aproximação dos valores obtidos neste trabalho com os obtidos pelos autores, para baixos valores de  $\Gamma$ . Com o aumento da intensidade de vibração, ocorre o cruzamento destes pontos com os de Gupta e Mujumdar (1980a) e a partir daí, ocorre o distanciamento dos mesmos.



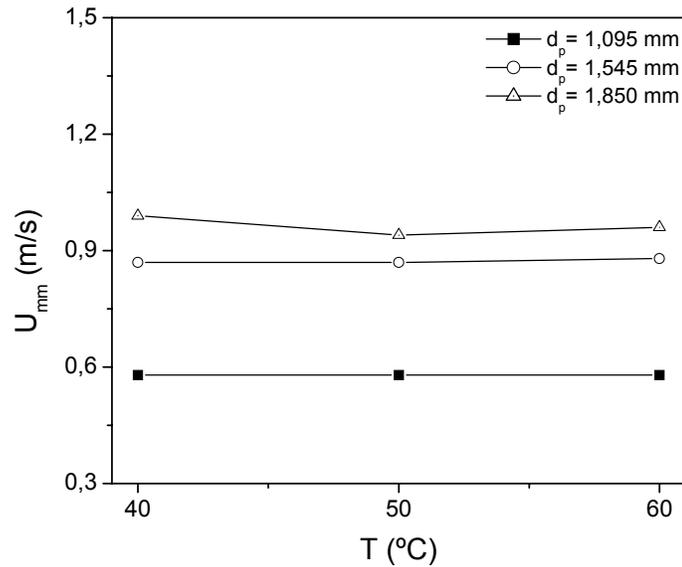
**Figura 4.45:** Adimensional de velocidade mínima de mistura em função do parâmetro vibracional; símbolo cheio: este trabalho;  $\phi = 0,0010$ ;  $H_0 = 8,0 \times 10^{-3}$  m; esferas de vidro; símbolo vazio: Gupta e Mujumdar (1980a);  $\phi = 0,0000$ ;  $H_0 = 12,5 \times 10^{-3}$  a  $50,0 \times 10^{-3}$  m.

De uma forma geral, verifica-se que  $U_{mf}$  apresenta problemas de inconsistência física levando-se em conta que não tem explicação o fato de  $U_{mf}$  aumentar com o aumento de  $\Gamma$ , fato este não verificado com relação a  $U_{mm}$ .  $U_{mm}$  satisfaz esta condição justamente porque é obtida visualmente, o que possibilita determinar a velocidade real do momento em que se inicia o movimento das partículas no leito. Portanto, neste trabalho será utilizada a definição de  $U_{mm}$  para descrever o início da movimentação das partículas no leito, analisada sob a influência da temperatura, do grau de saturação de glicerol, do diâmetro de partículas inertes e do parâmetro vibracional. Não será destinado um item específico para tratar da influência do diâmetro das partículas inertes porque grande parte das figuras foram parametrizadas nestes diâmetros, sendo portanto

analisados desta forma. No próximo item será estudada a influência da temperatura sobre a  $U_{mm}$ .

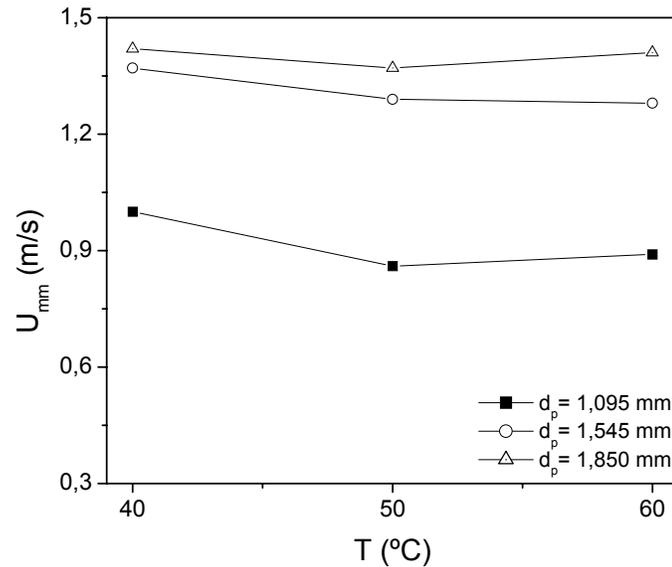
#### *4.4.1 Efeito da temperatura*

As curvas características obtidas para diferentes temperaturas estão mostradas nas Figuras 4.46 a 4.49. Observa-se para o leito fluidizado sem a presença de líquido que  $U_{mm}$  quase não se altera com o aumento da temperatura, como é mostrado na Figura 4.46. Verifica-se neste intervalo de temperatura que a viscosidade do ar varia muito pouco e este é um dos principais fatores que poderiam ocasionar a variação de  $U_{mm}$  nesta situação. Guiraldelo (2001) verificou para um leito fluidizado com partículas inertes de areia ( $d_p = 0,71 \times 10^{-3}$  m), que o aumento da temperatura de 28°C para 100°C, provocou a redução da velocidade mínima de fluidização em apenas 7,3%. Qualquer redução na  $U_{mm}$  nesta situação, seria provocada pelo aumento da viscosidade do ar (com o aumento da temperatura) o que ocasionaria uma maior facilidade do ar de “arrastar” as partículas, e conseqüentemente redução da vazão de ar necessária para iniciar a movimentação das mesmas. Nesta mesma figura, nota-se que para partículas inertes de menor diâmetro é exigido uma velocidade de ar relativamente menor para movimentar as mesmas, como é observado pelo distanciamento das curvas. Isto ocorre porque as partículas de menor tamanho possuem menor peso, o que requer menor vazão de ar para suspendê-las (para este intervalo de diâmetro de partículas).



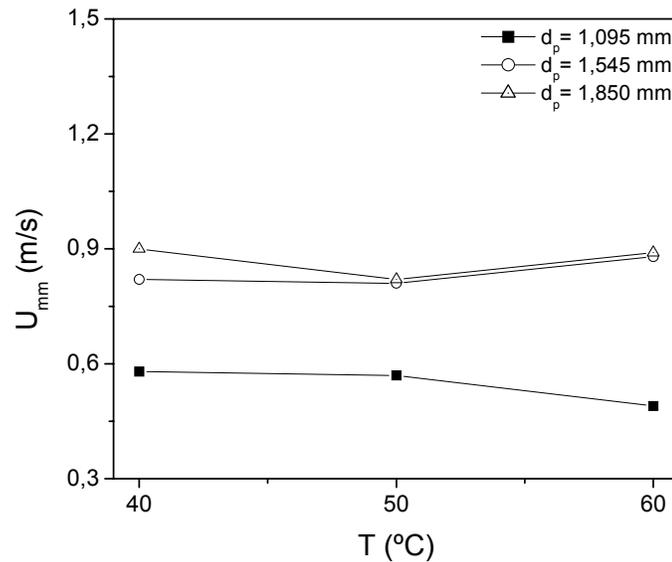
**Figura 4.46:** Velocidade mínima de mistura em função da temperatura parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\phi = 0,0000$ ;  $\Gamma = 0,00$ .

A Figura 4.47 mostra  $U_{mm}$  em função da temperatura para o leito fluidizado em presença de glicerol ( $\phi = 0,0010$ ). Percebe-se que o aumento da temperatura nesta situação praticamente não provocou alterações em  $U_{mm}$ . Em alguma das curvas até nota-se uma tendência à redução de  $U_{mm}$  com o aumento da temperatura e isto provavelmente deveria ocorrer, uma vez que com o aumento da temperatura ocorre a redução das forças de coesão, facilitando o “rompimento” das pontes líquidas, e portanto requerendo menor velocidade de ar para iniciar o movimento das partículas no leito. Nesta figura pode-se verificar ainda que com o aumento do diâmetro das partículas inertes, é necessária uma velocidade de ar maior para movimentar as partículas. Nota-se também que as curvas para os dois maiores diâmetros estão bem mais próximas que o de menor diâmetro e isso foi verificado porque a relação entre os diâmetros médios é menor para os maiores diâmetros do que para os menores diâmetros.



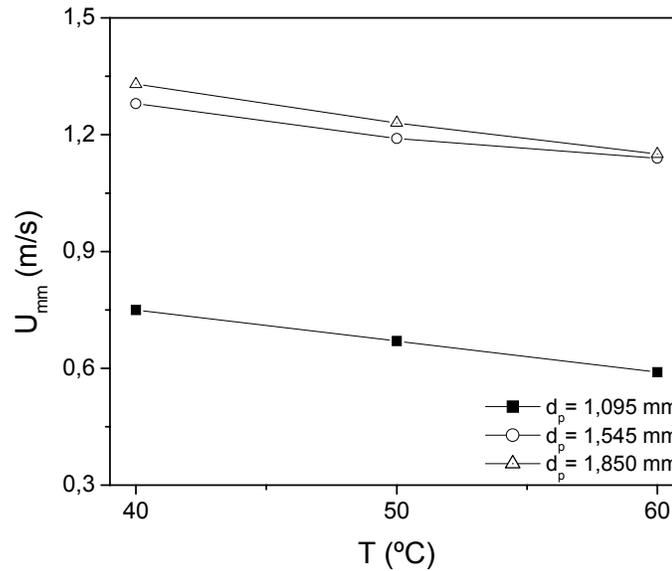
**Figura 4.47:** Velocidade mínima de mistura em função da temperatura parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\phi = 0,0010$ ;  $\Gamma = 0,00$ .

Para o leito vibrofluidizado ( $\Gamma = 1$ ) o aumento da temperatura também não influencia  $U_{mm}$ , já que as curvas permanecem no mesmo patamar e não apresentam praticamente nenhuma tendência (Figura 4.48). Neste caso, novamente o intervalo de temperatura é muito pequeno para que ocorram alterações no comportamento das curvas de  $U_{mm}$ . Percebe-se que, com a adição da vibração no sistema, as curvas para os maiores diâmetros de inertes juntam-se apresentando o mesmo comportamento e todas as curvas apresentam menores valores de  $U_{mm}$  quando comparadas com a Figura 4.48. Como já foi dito, a vibração tende a ajudar na movimentação das partículas, reduzindo  $U_{mm}$ .



**Figura 4.48:** Velocidade mínima de mistura em função da temperatura parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\phi = 0,0000$ ;  $\Gamma = 1,00$ .

Na Figura 4.49, para o leito vibrofluidizado em presença de líquido, verifica-se que o aumento da temperatura reduz  $U_{mm}$  com uma tendência mais pronunciada que nos casos anteriores. Isto acontece porque o aumento da temperatura reduz as forças de coesão entre as partículas que somado ao efeito da vibração facilita o “rompimento” das pontes líquidas e inicia o movimento das partículas a velocidades de ar menores, o que praticamente não foi observado nos casos anteriores. Observa-se ainda que, com a adição de líquido, as curvas apresentam maiores valores de  $U_{mm}$  quando comparadas com as da Figura 4.48 por exemplo, efeito que será analisado no sub-item 4.4.2.



**Figura 4.49:** Velocidade mínima de mistura em função da temperatura parametrizado no diâmetro média das partículas;  $\phi = 0,0010$ ;  $\Gamma = 1,00$ .

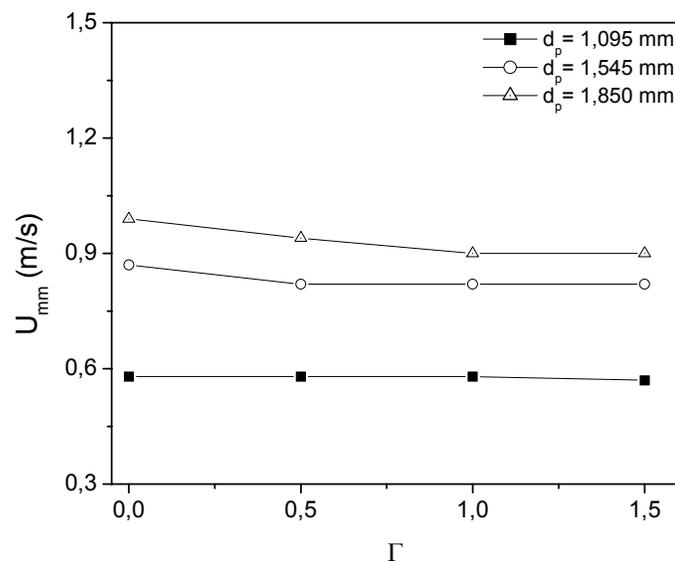
De uma forma geral, constata-se que a temperatura tem na prática, efeito quase insignificante para a maioria dos dados de  $U_{mm}$  obtidos neste trabalho. Como já foi dito, neste intervalo de temperatura utilizado, a variação da viscosidade do ar é praticamente desprezível e para o líquido já não, mas mesmo assim ainda não foi suficiente para provocar razoável influência na movimentação das partículas. A seguir será analisado o efeito da intensidade de vibração sobre  $U_{mm}$ .

#### 4.4.2 Efeito do parâmetro vibracional

Nas Figuras 4.41, 4.43, 4.44 e 4.45 foram mostradas algumas curvas de  $U_{mm}$  adimensionalizadas em função da aceleração vibracional. Para complementar a análise do efeito da intensidade de vibração sobre a  $U_{mm}$  serão apresentadas algumas curvas sem adimensionalização. Esta análise será feita a

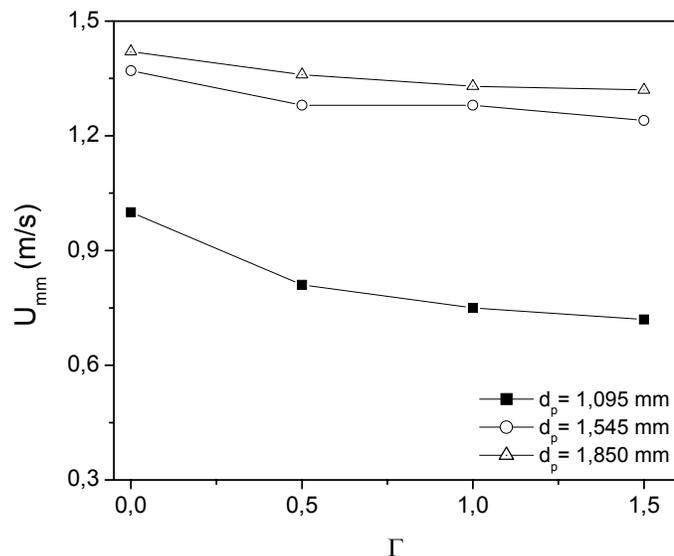
40°C, temperatura escolhida arbitrariamente pois para as demais temperaturas as curvas apresentam o mesmo comportamento.

Na Figura 4.50, sem a presença de glicerol, é verificada a redução de  $U_{mm}$  com o aumento da intensidade de vibração, como já foi apresentado anteriormente. Verifica-se, no entanto, que esta tendência é pouco pronunciada, principalmente para os menores diâmetros de partículas neste caso. Portanto, a vibração não altera significativamente o ponto onde se inicia a mistura das partículas no leito e esta foi mais pronunciada para partículas de  $1,850 \times 10^{-3}$  m de diâmetro. Isto ocorre justamente porque as partículas de maior diâmetro são mais afetadas pela dinâmica da vibração imposta no leito, reduzindo a necessidade de ar para o início da movimentação das partículas, como já exposto, efeito que é atenuado para as partículas de menor diâmetro.



**Figura 4.50:** Velocidade mínima de mistura em função do parâmetro vibracional parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\phi = 0,0000$ ;  $T = 40^\circ\text{C}$ .

Para o caso apresentado na Figura 4.51, verifica-se que com a adição de uma quantidade de líquido ( $\phi = 0,0010$ ) a vibração tende a reduzir  $U_{mm}$  mais intensamente que no caso apresentado na Figura 4.50. Com a adição de líquido sobre as partículas inertes, estas tendem a aglomerar-se aumentando a velocidade de ar necessária para “romper” as pontes líquidas formadas. A vibração neste caso ajuda a promover a movimentação das partículas facilitando o “rompimento” destas pontes líquidas, reduzindo a necessidade de ar para o início deste movimento. Claro que, pelo que já foi exposto até aqui, este efeito deve ser mais pronunciado quanto maior for a intensidade de vibração (pelo menos no intervalo estudado neste trabalho) e quanto maior for o tamanho das partículas, como foi verificado.



**Figura 4.51:** Velocidade mínima de mistura em função do parâmetro vibracional parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $\phi = 0,0010$ ;  $T = 40^\circ\text{C}$ .

Nestas análises, apesar de se ter verificado que o efeito da vibração sobre  $U_{mm}$  não foi muito pronunciado, na prática verifica-se visualmente que a

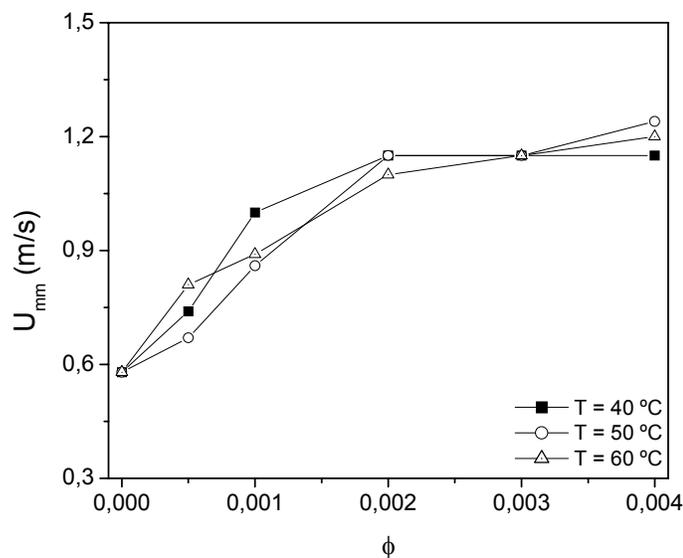
vibração melhora a movimentação das partículas no leito e a estabilidade do regime fluidizado. Em alguns casos somente com a vibração pode-se atingir o regime de movimentação das partículas (fluidização) no leito quando está presente o glicerol. Não se têm dúvidas da necessidade da vibração no processamento deste tipo de material, que além de poder fluidizar o leito também se comprova que em alguns casos são necessárias menores vazões de ar para manter a movimentação das partículas durante o processo. No próximo item será analisada a influência da adição de líquido no leito (medido através do grau de saturação) sobre  $U_{mm}$ .

#### *4.4.2 Efeito da saturação de glicerol*

Como foi verificado anteriormente, a temperatura tem uma influência mais pronunciada sobre o leito em presença de líquido do que para o leito bifásico (sólido-ar), portanto  $U_{mm}$  será analisada primeiro em função do grau de saturação de glicerol ( $\phi$ ) parametrizado na temperatura. Esta análise será feita para o diâmetro médio de partícula de  $1,095 \times 10^{-3}$  m, uma vez que para este diâmetro foram feitos experimentos utilizando um número maior de graus de saturação do que para os outros diâmetros, facilitando a análise. Neste caso, para estas partículas ( $1,095 \times 10^{-3}$  m) pôde-se trabalhar até  $\phi = 0,0040$  e ainda alcançar o regime fluidizado, enquanto que para partículas maiores na maioria dos casos não foi possível atingir o regime fluidizado para  $\phi > 0,0020$  mesmo com a ajuda da vibração. Para os outros diâmetros de partículas os dados obtidos encontram-se no Apêndice B.

Na Figura 4.52 para o leito fluidizado, verifica-se claramente que o aumento do grau de saturação de glicerol provoca o aumento de  $U_{mm}$ . Este

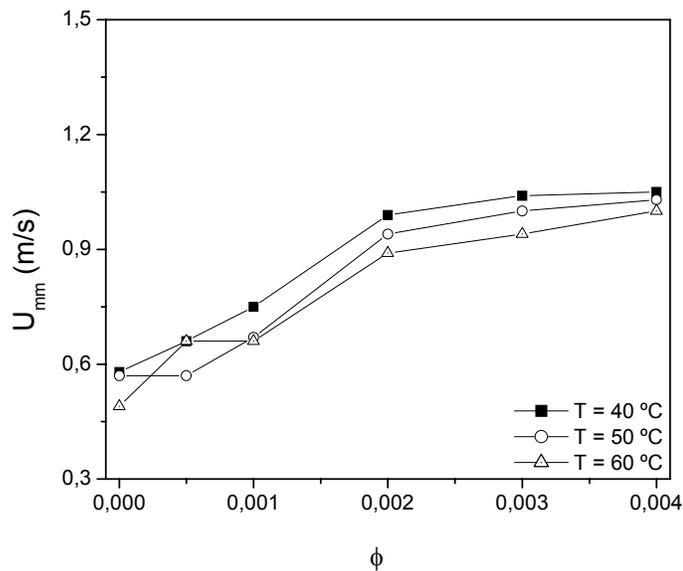
aumento ocorreu de forma praticamente contínua até  $\phi = 0,0020$  onde se verifica que a curva atinge um patamar, e mesmo com o aumento do grau de saturação a curva mantém este patamar. Verifica-se também que a variação da  $U_{mm}$  foi pouco afetada pela temperatura, já que estas curvas apresentam aproximadamente o mesmo comportamento.



**Figura 4.52:** Velocidade mínima de mistura em função do grau de saturação de glicerol parametrizado na temperatura do leito;  $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$  m;  $\Gamma = 0,00$ .

Para o leito vibrofluidizado ( $\Gamma = 1,00$ ) verifica-se que as curvas apresentam-se diferenciadas para as diferentes temperaturas, mostrando a tendência ao aumento de  $U_{mm}$  com a redução da temperatura. Isto ocorre porque a redução da temperatura aumenta as forças coesivas, dificultando o “rompimento” das pontes líquidas, o que ocasiona o aumento de  $U_{mm}$  observado na Figura 4.53. Quando se comparam as Figuras 4.53 e 4.52 nota-se que a vibração reduz os valores de  $U_{mm}$ . A vibração, nesta situação, fez com que o “rompimento” das pontes líquidas ocorresse a velocidades de ar menores e conseqüentemente a

mistura das partículas é observada mais cedo. Os dados da Figura 4.53 indicam que, para saturações maiores que 0,0020, houve pouco aumento de  $U_{mm}$ , mantendo um patamar quase constante. Isso indica que, em ambos os casos apresentados (Figuras 4.52 e 4.53), para este diâmetro de partícula é possível operar com maiores graus de saturação sem que sejam necessárias maiores quantidades de ar para manter o leito fluidizado, reduzindo o consumo energético. Essa afirmação é válida sob esta análise porque, em alguns casos, foram verificados que maiores graus de saturação tornaram a fluidização mais pobre e instável, o que reduz a eficiência dos fenômenos de transferência.



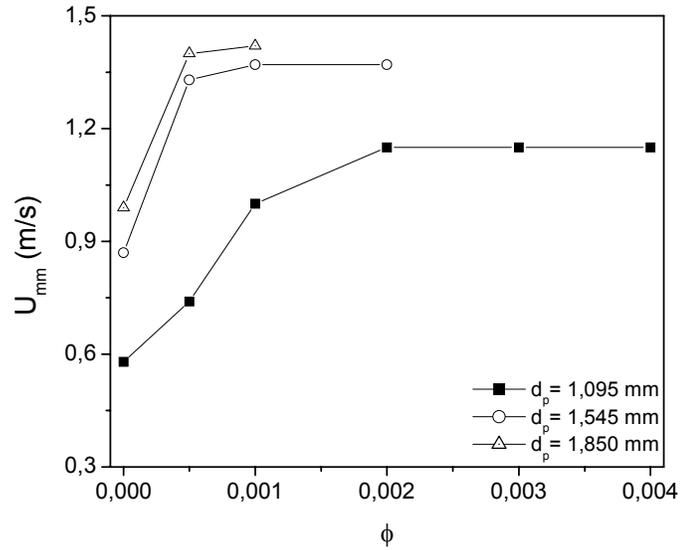
**Figura 4.53:** Velocidade mínima de mistura em função do grau de saturação de glicerol parametrizado na temperatura do leito;  $d_p = 1,095 \times 10^{-3}$  m;  $\Gamma = 1,00$ .

De uma forma geral foi observado que o efeito da temperatura não foi significativo sobre  $U_{mm}$  exceto para alguns casos na vibrofluidização.

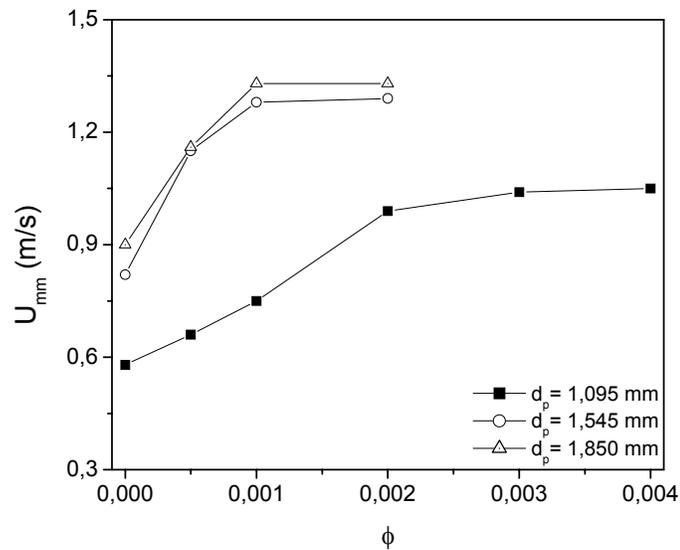
A seguir, serão analisados os dados obtidos de  $U_{mm}$  em função do grau de saturação de glicerol parametrizado no diâmetro médio das partículas, na

temperatura de 40°C. Como nos casos anteriores optou-se por esta temperatura de forma arbitrária, uma vez que nos outros casos o comportamento observado foi muito semelhante ao apresentado nas Figuras 4.54 e 4.55.

Nota-se na Figura 4.54 que o aumento do diâmetro das partículas inertes torna nitidamente maiores os valores de  $U_{mm}$ . É possível verificar que todos os diâmetros apresentam um patamar onde  $U_{mm}$  mantém-se praticamente constante após um determinado valor de grau de saturação. Esses patamares ocorrem a menores graus de saturação para os maiores diâmetros de partículas e ocorrem próximos às máximas velocidades superficiais de ar atingidas no experimento. Para o maior diâmetro não foi possível fluidizar no grau de saturação de 0,0020, indicando que para o leito fluidizado com este diâmetro de partícula, o grau de saturação de 0,0010 foi o limite máximo a ser utilizado. Na Figura 4.55, para o maior diâmetro de partícula a vibração tornou possível movimentar as partículas no leito para a saturação até 0,0020. É possível observar ainda que a vibração torna mais “suave” as curvas, principalmente para o menor diâmetro de partícula. Isto ocorre, porque com a vibração, a passagem do estado de leito fixo para fluidizado torna-se mais “suave”, atenuando o “rompimento” das pontes líquidas e tendendo a reduzir  $U_{mm}$ . Verifica-se ainda nas Figuras 4.54 e 4.55 que existe um distanciamento muito grande entre os dados obtidos para o menor diâmetro de partículas com relação aos maiores, indicando que o “rompimento” das pontes líquidas para movimentação das partículas é muito mais difícil nestas em função da maior força de coesão entre as partículas.



**Figura 4.54:** Velocidade mínima de mistura em função do grau de saturação de glicerol parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $T = 40^\circ\text{C}$ ;  $\Gamma = 0,00$ .



**Figura 4.55:** Velocidade mínima de mistura em função do grau de saturação de glicerol parametrizado no diâmetro médio das partículas;  $T = 40^\circ\text{C}$ ;  $\Gamma = 1,00$ .

Finalizando esta análise, pode-se afirmar que podem ser utilizadas partículas de menores diâmetros quando se deseja reduzir a velocidade de ar necessária para misturar as partículas no leito (ou fluidizar) considerando-se esta

análise anterior como referência. Apenas através do estudo da eficiência do processo de secagem pode ser confirmado se é vantajoso utilizar partículas de menores diâmetros, já que outros fenômenos envolvidos devem ser considerados, como a taxa de remoção do material seco aderido nas partículas, eficiência dos fenômenos de transferência, entre outros.

Este estudo de  $U_{mm}$  deve ser continuado tentando-se obter dados desde as situações experimentais utilizadas por Gupta e Mujumdar (1980a) até partículas mais densas e de outras formas. Até o presente momento não dá para se tirar uma conclusão final sobre um fenômeno equivalente à velocidade mínima de fluidização quando se trata de leitos vibrofluidizados e ainda mais com a presença de líquido. Visando principalmente trabalhos futuros, todos os dados obtidos nesta pesquisa estão contidos no Apêndice B.

## **5 CONCLUSÕES**

Pôde-se observar que, em todos os casos em que foram testados a reprodutividade das curvas características e de desvio padrões destas medidas, estas se apresentaram dentro da faixa de erro experimental, mostrando uma boa qualidade nos dados obtidos. Devido ao fato de se ter pesquisado a influência de vários parâmetros e ainda em leitos com e sem pasta optou-se por fazer o capítulo de conclusões acompanhando os sub-itens dos resultados.

### **5.1 Fluidodinâmica**

#### **Sem a presença de glicerol no leito**

Para o leito fluidizado e para o leito vibrofluidizado, a temperatura praticamente não influenciou o comportamento das curvas características, e foi independente do diâmetro de partículas utilizado.

Para o 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, e foi independente da temperatura.

Para o leito vibrofluidizado, o aumento do diâmetro das partículas reduziu a queda de pressão na região de leito fixo, e praticamente não a influenciou na região de leito fluidizado.

No menor diâmetro de partículas, o aumento da intensidade de vibração praticamente não influenciou o comportamento da queda de pressão, já para o maior diâmetro de partículas, o aumento da vibração provocou a expansão

do leito na região de leito fluidizado, contribuindo para uma redução nos valores de queda de pressão.

Verificou-se também que, para o leito vibrofluidizado, o intervalo de parâmetro vibracional praticamente não alterou o comportamento da queda de pressão no leito, e foi independente do diâmetro de partículas.

### **Em presença de glicerol no leito**

Para o leito fluidizado, a temperatura teve pouca influência sobre o comportamento da queda de pressão para todos os diâmetros de partículas, mostrando uma pequena tendência ao aumento da queda de pressão com o aumento da temperatura. Para o maior diâmetro de partículas o leito não atingiu o regime fluidizado.

No leito vibrofluidizado, independente do diâmetro das partículas, a temperatura praticamente não influenciou o comportamento da queda de pressão. Para todas as situações, em presença de vibração o leito alcançou o regime fluidizado.

Para o leito fluidizado em presença de uma pequena quantidade de líquido, o aumento do diâmetro de partículas reduziu a queda de pressão no leito e também dificultou o surgimento do regime fluidizado. Para os maiores diâmetros de partículas, o leito praticamente não fluidizou e foi caracterizado pelo aparecimento de canais preferenciais. O aumento progressivo da saturação de líquido tornou mais difícil o surgimento do regime fluidizado, inclusive para o menor diâmetro de partícula. Após o estabelecimento da fluidização, nesta

situação, esta foi caracterizada pela formação de pequenos aglomerados e por uma fluidização turbulenta.

No leito vibrofluidizado, o aumento do diâmetro das partículas provocou a redução da queda de pressão na região de leito fixo, que após atingir o regime fluidizado, manteve os mesmos patamares de queda de pressão. A inserção da vibração tornou possível atingir o regime fluidizado para todos os tamanhos de partículas. A vibração tornou mais vigorosa a fluidização para o menor tamanho de partículas e apareceram alguns patamares para os maiores diâmetros de partículas.

Utilizando um alto grau de saturação de glicerol e no menor diâmetro de partículas, verificou-se que a adição de vibração no leito provocou o aumento da queda de pressão, mas no leito vibrofluidizado, o aumento da intensidade de vibração praticamente não alterou o comportamento da queda de pressão. Já para os maiores diâmetros de partículas, sem a adição de vibração o leito não “rompeu” as pontes líquidas e conseqüentemente não fluidizou. Com a adição de vibração, o leito apresentou uma região fluidizada, mas a queda de pressão foi independente da intensidade de vibração. A transição de leito fluidizado para o vibrofluidizado, foi também caracterizada pelo aumento na queda de pressão.

Para o leito fluidizado no menor tamanho de partículas, verificou-se que o aumento do grau de saturação reduziu a queda de pressão no leito, ocasionado principalmente pelo aparecimento de canais preferenciais. Para este tamanho de partículas foi verificado o regime fluidizado em todos os graus de saturação utilizados, mas acima de um determinado limite, o aumento da

saturação praticamente não alterou o comportamento das curvas características. O aumento do grau de saturação, além de reduzir a queda de pressão, tornou as curvas muito mais “suaves”. Para os maiores diâmetros de partículas, verificou-se que apenas para o caso sem a presença de pasta o leito fluidizou, apresentando queda de pressão muito superior ao caso saturado de líquido. Em presença de líquido, o leito não fluidizou e apresentou muitos canais preferenciais.

No leito vibrofluidizado, a vibração tornou maior a queda de pressão das curvas saturadas, sobrepondo-as à curva sem a presença de líquido. Isto foi observado para todos os diâmetros de partículas, indicando que no caso dos maiores diâmetros de partículas, a vibração ajudou a “romper” as pontes líquidas e nesta situação, as forças vibracionais foram mais fortes que as forças que aglomeraram o leito.

## **5.2 Desvio Padrão da Queda de Pressão**

Nos leitos fluidizado e vibrofluidizado, a temperatura teve pouca influência no comportamento do desvio padrão das medidas de queda de pressão, para todos os diâmetros e graus de saturação estudados.

### **Sem a presença de glicerol no leito**

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 de desvio padrão das medidas de queda de pressão.

A altas velocidades de ar, verificaram-se oscilações nas curvas de desvio padrão, provocadas pelo aparecimento de bolhas e pela intensa movimentação das partículas. Esse efeito é maior quanto menores forem as 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 possível estimar a velocidade na qual inicia-se o movimento das partículas no leito.

Na presença de vibração, as maiores partículas apresentaram menores valores para o desvio padrão. Na região de leito fluidizado, o desvio padrão permaneceu em um patamar quase constante. A altas velocidades de ar, o aumento da velocidade de ar apresentou tendência ao aumento no desvio padrão e oscilações nas curvas. Não foi possível obter uma relação entre as curvas de desvio padrão com o momento em que se inicia a movimentação das partículas no leito.

Para todas os tamanhos de partículas, o aumento da intensidade de vibração provocou significativo aumento nos valores obtidos de desvio padrão. Na região de leito fixo, quanto maior for a intensidade de vibração, mais significativo é o aumento no desvio padrão com o aumento da velocidade de ar. Quando a fluidização já está bem estabelecida em presença de vibração, o desvio padrão permanece em patamares quase inalterados com o aumento da velocidade de ar, e a altas velocidades, verificou-se o aparecimento de oscilações nas curvas apresentadas com pequena tendência ao aumento do desvio padrão. Para o leito

sem a presença de vibração o desvio padrão é muito inferior ao obtido para quando está presente a vibração, principalmente na região de leito fixo.

### **Em presença de glicerol no leito**

Para o leito fluidizado na região de leito fixo, o desvio padrão foi independente do diâmetro de partículas, atingindo a fluidização apenas para o menor diâmetro. Em presença de líquido, também foi possível associar o momento onde inicia-se a movimentação das partículas com o comportamento das curvas de desvio padrão, auxiliando na estimativa de  $U_{mm}$ .

No leito vibrofluidizado, o aumento do diâmetro de partículas reduziu os valores de desvio padrão, principalmente na região de leito fixo. Em todas as situações foi verificado o surgimento do regime fluidizado. Para os maiores diâmetros de partículas e na região de leito fluidizado, as curvas apresentaram patamares constantes, não apresentando oscilações mesmo a altas velocidades de ar. Também nesta situação, não foi possível verificar alguma relação entre as curvas de desvio padrão com o início da movimentação das partículas.

Em todos os diâmetros de partículas e para um alto grau de saturação, o aumento da intensidade de vibração provocou significativo aumento nos valores obtidos de desvio padrão. Na região de leito fixo, quanto maior for a intensidade de vibração, mais significativa é o aumento no desvio padrão com o aumento da velocidade de ar. Quando a fluidização já está bem estabelecida na presença de vibração, o desvio padrão apresenta uma pequena tendência à diminuição dos seus valores com o aumento da velocidade de ar. Em altas

velocidades, verificou-se o aparecimento de poucas oscilações nas curvas quando comparadas ao caso sem a presença de pasta, com leve tendência ao aumento destes valores. Para o leito sem a presença de vibração, o desvio padrão apresentou-se muito inferior ao obtido para o caso em que está presente a vibração, em toda a extensão da curva.

Para o leito fluidizado no menor tamanho de partículas, verificou-se que, na região de leito fixo, as curvas de desvio padrão foram independentes do grau de saturação de líquido. O aumento do grau de saturação de líquido, aumenta os valores de velocidade de ar necessários para fluidizar o leito, atenuando as curvas de desvio padrão em toda a sua extensão. Para baixos graus de saturação, depois de estabelecido o regime fluidizado, verificou-se que as curvas de desvio padrão apresentaram oscilações, com tendência ao aumento nos valores com o aumento da velocidade de ar. Para altos graus de saturação, o leito fluidizou neste tamanho de partículas, mas apresentou muitos canais preferenciais resultando em uma fluidização muito pobre, mas tornando baixos os valores de desvio padrão. Para os maiores diâmetros de partículas, o desvio padrão obtido foi inferior, apresentando o regime fluidizado apenas no caso sem a presença de pasta.

Na presença de vibração e no menor tamanho de partículas, verificou-se que, na região de leito fixo, o aumento da saturação reduz os valores de desvio padrão. Na região fluidizada, o aumento da saturação provocou pequena tendência à redução nos valores de desvio padrão com o aumento da velocidade de ar. Para altas velocidades de ar, verificou-se oscilações nas curvas, mostrando tendência a um aumento nos valores de desvio padrão com a redução do grau de saturação de líquido. Para os maiores diâmetros de partículas, verificou-se em

toda a extensão das curvas, pequena redução nos valores de desvio padrão com o aumento do grau de saturação. Também, as curvas praticamente não apresentaram oscilações e estavam em patamares inferiores aos observados para o menor tamanho de partículas.

### **5.3 Velocidade Mínima de Fluidização e Velocidade Mínima de Mistura**

Em todos os casos estudados, verificou-se que a velocidade mínima de fluidização diminuiu, passou por um mínimo e depois aumentou com o aumento do parâmetro vibracional. Já a velocidade mínima de mistura diminuiu com o aumento do parâmetro vibracional para as mesmas situações. Em função do comportamento da  $U_{mf}$  não estar condizente com razões físicas, o restante das conclusões serão apresentadas para  $U_{mm}$ .

Em comparações feitas com os dados obtidos por Gupta e Mujumdar (1980a) observou-se grande diferença entre os conjuntos de medidas mesmo na presença de líquido, exceto o fato de que  $U_{mm}$  diminuiu com o aumento do parâmetro vibracional. Estas diferenças foram provocadas principalmente por diferenças nos parâmetros utilizados pelos autores.

#### **Sem a presença de glicerol no leite**

No leite fluidizado e vibrofluidizado, a temperatura praticamente não influenciou o comportamento de  $U_{mm}$ , em todos os tamanhos de partículas utilizados.

Em todos os casos apresentados, o aumento do diâmetro de partículas aumentou significativamente os valores de  $U_{mm}$ . Verificou-se que o

aumento da intensidade de vibração aproximou os valores de  $U_{mm}$  principalmente para os dois maiores diâmetros de partículas.

Verificou-se que o aumento do parâmetro vibracional tornou levemente menores os valores de  $U_{mm}$ , em todos os diâmetros de partículas.

### **Em presença de glicerol no leito**

No leito fluidizado, o aumento da temperatura praticamente não influenciou o comportamento da  $U_{mm}$ , em todos os tamanhos de partículas utilizados. Já para o leito vibrofluidizado, verificou-se uma pequena tendência à diminuição de  $U_{mm}$  com o aumento da temperatura.

Verificou-se que o aumento do parâmetro vibracional provocou uma leve redução nos valores de  $U_{mm}$  para os maiores diâmetros de partículas, e este efeito foi mais acentuado para o menor diâmetro de partículas.

No leito fluidizado e para o menor diâmetro de partículas, o aumento do grau de saturação tornou maiores os valores de  $U_{mm}$  até um certo patamar, independente da temperatura. A partir deste limite o aumento do grau de saturação praticamente não alterou os valores de  $U_{mm}$ . Já para o leito vibrofluidizado ocorreu a atenuação dos valores de  $U_{mm}$  com o efeito da vibração, principalmente na maior temperatura.

Verificou-se também que o aumento do diâmetro das partículas provocou um aumento significativo nos valores de  $U_{mm}$ , e que na ausência da vibração, este parâmetro só pode ser obtido para menores graus de saturação nos maiores tamanhos de partículas. Portanto pode-se alimentar o leito com uma quantidade maior de líquido para partículas de menor tamanho e ainda assim

atingir a  $U_{mm}$ . Os valores obtidos de  $U_{mm}$  foram muito semelhantes para os maiores diâmetros de partículas.

É importante salientar que em todos os casos em que estavam presentes o glicerol, ocorreu a aglomeração das partículas no leito, tornando a fluidização pobre e irregular e com a formação de canais preferenciais. A vibração nestes casos tornou melhor a movimentação das partículas, auxiliando no “rompimento” das pontes líquidas, atenuando a formação de canais preferenciais e melhorando as características de transporte. De uma forma geral, verificou-se que a temperatura tem efeito quase insignificante sobre o comportamento da queda de pressão nas condições estudadas. Com exceção da transição entre o leito fluidizado para o vibrofluidizado, a intensidade de vibração também não tornou significativas as variações da queda de pressão. Já o aumento do grau de saturação de líquido, tanto quanto a variação do diâmetro das partículas, tiveram grande influência sobre o comportamento das curvas características, principalmente no que tange à queda de pressão no leito.

Quando foi feita uma análise do comportamento fluidodinâmico do leito sob a ótica das flutuações observadas na medida da queda de pressão, verificou-se que, quando o leito está na região de leito fixo ou totalmente aglomerado, o desvio padrão apresentado foi muito pequeno em função principalmente da passagem do ar por caminhos preferenciais em seu escoamento de ar no leito. Quando o leito estava fluidizando, a movimentação das partículas promoveu oscilações na queda de pressão, principalmente a altas velocidades de ar, ocasionando variações significativas no desvio padrão destas medidas. Em presença de vibração, este efeito foi intensificado, principalmente pela

movimentação das partículas no leito e pelas alterações na resistência ao escoamento do ar com a vibração. Esta metodologia utilizada também pode auxiliar na determinação do momento em que se iniciou o movimento das partículas no leito para o leito fluidizado, já que foi possível encontrar relação entre os dois fenômenos mesmo em presença de líquido.

Com relação à obtenção da  $U_{mf}$ , verificou-se que a metodologia utilizada realmente não apresentou resultados coerentes, situação que foi satisfeita por  $U_{mm}$  tal como foi definida por Gupta e Mujumdar (1980a). Pode-se verificar que a temperatura praticamente não influenciou o comportamento deste parâmetro e a intensidade de vibração teve pouca influência em  $U_{mm}$ , nas condições deste trabalho. Já a quantidade de líquido adicionada no leito e o tamanho das partículas tiveram influência considerável. A redução do tamanho das partículas e a utilização de menores graus de saturação tornaram menores os valores de  $U_{mm}$ , reduzindo a necessidade de ar para movimentar as partículas no leito.

## 6 SUGESTÕES

Para continuidade destes estudos, são dadas as seguintes sugestões:

- realizar estudos fluidodinâmicos relacionados com a queda de pressão na mínima fluidização e na mínima mistura sob a influência da vibração e da adição de glicerol;
- realizar mais estudos fluidodinâmicos relacionados à velocidade de mínima fluidização e a de mínima mistura sob a influência da vibração e da adição de glicerol, para parâmetros vibracionais maiores que 1,5, temperaturas maiores que 60°C e diâmetro de partículas menores que  $1 \times 10^{-3}$  m;
- realizar estudos relacionados ao desvio padrão da queda de pressão para os ensaios sugeridos anteriormente;
- verificar a influência de outros parâmetros como diferentes tipos de partículas, amplitudes de vibração, geometria de leito, alturas de leito estático, entre outras, sobre a fluidodinâmica do leito e as flutuações da queda de pressão e/ou simular as mesmas condições experimentais de Gupta e Mujumdar (1980a), para efeito de comparação;
- realizar os ensaios anteriores utilizando pastas reais (como ovo, tomate, sucos, etc.) para efeito de comparação com os resultados obtidos para o glicerol;
- realizar os ensaios anteriores estudando formas de alimentar o leito para estudos com alimentação contínua de pasta;
- realizar estudos sobre bolhas, circulação das partículas e fazer análise de tensões no leito e

- realizar estudos referentes à transferência de calor e massa no leito em presença de pasta.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ, P. I.; REYES, A. (1997). *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, Ed. 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. São Paulo - SP., Ed. Ícone. p.205-6.
- BAKHMAN, G. K.; ZHIRNOVA, G. F.; MIKHAILOV, G. M.; TYABIN, N. V. (1970). *Trudy Volgo Gradskogo Polit. Inst. Ser. Khim*. In: STRUMILLO, C.; PAKOWSKI, Z. (1980). *Drying of Granular Products in Vibrofluidized Beds*. In: Drying '80, Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque. v.1, p.211-26.
- BARRET, N.; FANE, A. (1990). *Drying of Liquid Material in a Spouted Bed*. In: Drying '89. Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque. p.415-20.
- 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 the 10<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS 96), Polônia, v.A, p.398-404.
- BRATU, E.; JINESCU, G. I. (1969). In: GUPTA, R.; MUJUMDAR, A. S. (1980). *Aerodynamics of a Vibrated Fluid Bed*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa. v.58, p.332-38.
- BRATU, E.; JINESCU, G. I. (1971). *Effect of Vertical Vibrations on the Pressure Drop in a Fluidized Layer*. British Chemical Engineering, v.16, n.8, p.691-95.
- BRATU, E.; JINESCU, G. I. (1972). In: GUPTA, R.; MUJUMDAR, A. S. (1980). *Aerodynamics of a Vibrated Fluid Bed*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa. v.58, p.332-38.
- BROD, F. P. R. (1999). *Construção e Teste de um Secador Vibro-fluidizado*. Campinas - SP, FEA/UNICAMP. 200p. Dissertação.
- 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 the 11<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS 98), Grécia, v. B, p.1237-43.

- CAMARGO, C. F. S. (1998). *Determinação do Coeficiente Global de Transferência de Calor em um Cilindro Submerso em um Leito Vibrofluidizado*. São Carlos - SP, PPG-EQ/UFSCar. 146p. Dissertação.
- CAMARGO, C. F. S.; FREIRE, J. T. (2002). *Fluidodinâmica de um Leito Vibrofluidizado: Análise das Curvas Características Utilizando Curvas de Desvio Padrão*. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, XXIX., São João del-Rei - MG, 2002. Anais do XXIX ENEMP, São João del-Rei - MG. (no prelo).
- CANELAS NETO, A. A. (2000). *Uso da Técnica de Sublimação do Naftaleno na Determinação do Coeficiente de Transferência de Massa em Leito Vibrofluidizado*. São Carlos - SP, PPG-EQ/UFSCar. 126p. Dissertação.
- CARDOSO, C. S. B. (1998). *Secagem de fatias de banana em leito vibrofluidizado a altas temperaturas por curto tempo*. Campinas - SP, FEA/UNICAMP. 104p. Dissertação.
- CARDOSO, C. S. B.; KIECKBUSH, T. G. (1998). *Secagem de Fatias de Banana em Leito Vibrofluidizado a Altas Temperaturas por Curto Tempo*. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, XXVI., Teresópolis - RJ, 1998. Anais do XXVI ENEMP, Teresópolis - RJ, Ed. UFRRJ, v.2, p.385-92.
- CHEVILENKO, V. A.; MUSHTAYEV, V. I.; KOROTOKOV, V. M.; IZHORIM, G. L.; LYALIN, V. A.; PLANOVSKI, A. N. (1979). In: PAKOWSKI, Z.; MUJUNDAR, A. S.; STRUMILLO, C. (1984). *Theory and Application of Vibrated Beds and Vibrated Fluid Beds for Drying Process*. In: Advances in Drying, Hemisphere Publishing Corporation, Washington. v.3, p.245-306.
- CHLENOV, V. A.; MIKHAILOV, N. V. (1965). In: PAKOWSKI, Z.; MUJUNDAR, A. S.; STRUMILLO, C. (1984). *Theory and Application of Vibrated Beds and Vibrated Fluid Beds for Drying Process*. In: Advances in Drying, Hemisphere Publishing Corporation, Washington. v.3, p.245-306.
- CHLENOV, V. A.; MIKHAILOV, N. V. (1972). *Vibrokipyashchii Sloi (Vibrofluidized Beds)*. In: STRUMILLO, C.; PAKOWSKI, Z. (1980). *Drying of Granular Products in Vibrofluidized Beds*. In: Drying '80, Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque. v.1, p.211-26.
- COLLARES, F. P. (2001). *Desprendimento de Filmes de Pastas Alimentícias Durante a Secagem Sobre Superfícies de Sólidos e sua Relação com a Transição Vítreá*. Campinas - SP, FEQ/UNICAMP. 205p. Tese.
- COURDEC, J. P. (1985). *Incipient Fluidization and Particulate Systems*. In: DAVIDSON, J. F.; CLIFT, R.; HARRISON, D. *Fluidization*. 2.ed. Academic Press, Londres. Cap. 1, p.1-46.

- DELLA TONIA JR., V. G. (1990) *Desenvolvimento, Instrumentação e Fluidodinâmica de um Leito Vibro-fluidizado*. São Carlos - SP, PPG-EQ/UFSCar. 142p. Dissertação.
- DELLA TONIA JR, V. G.; FREIRE, J. T.; TOBINAGA, S. (1989). *Leito Vibrofluidizado I: Desenvolvimento do Equipamento e Testes Preliminares*. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, XVII., São Carlos - SP, 1989. Anais do XVII ENEMP, São Carlos - SP, Ed. UFSCar, v.1, p.307-11.
- ERDÉSZ, K. (1990) *Hydrodynamic Studies on Vibrated Fluidized Beds*. Power Handling & Processing, Alemanha. v.2, n.4, p.327-39.
- ERDÉSZ, K.; MUJUMDAR, A. S. (1986) *Hydrodynamic Aspects of Conventional and Vibrofluidized Beds: A Comparative Evaluation*. Powder Technology, Netherlands. v.46, p.167-172.
- ERDÉSZ, K.; MUJUMDAR, A. S.; RINGER, D. U. (1986). *Hydrodynamic Similarity of Conventional and Vibrated Fluidized Beds*. In: Drying '86, Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque. v.1, p.169-176.
- ERDÉSZ, K.; ORMÓS, Z. (1984). *Bed Expansion and Pressure Drop in Vibrofluidized Layers*. In: Drying '84, Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque. v.1, p.169-77.
- ERDÉSZ, K.; ORMÓS, Z. (1985). *Drying of Past-like Materials in Vibrofluidized Bed of Inert Packing*. In: Drying '85, Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque. v.1, p.177-82.
- ERESHCHENKO, G. V.; (1965). In: STRUMILLO, C.; PAKOWSKI, Z. (1980). *Drying of Granular Products in Vibrofluidized Beds*. In: Drying '80, Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque. v.1, p.211-26.
- FINZER, J. R. D. (1984). *Secagem de Fatias de Cebola em Leito Vibro-fluidizado*. Campinas - SP, FEA/UNICAMP. 134p. Dissertação.
- 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, Espanha. v.17, n.1, p.140-47.
- 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, Espanha. v.15, n.2, p.221-26.
- FREIRE, J. T. (1992). *Secagem de Pastas em Leito de Jorro*. In: FREIRE, J. T.; SARTORI, D. J. M. *Tópicos Especiais em Secagem*. Editora da UFSCar, São Carlos - SP. v.1, p.41-85.

- GARIM, M. M. (1994) *Coeficiente de Transferência de Massa de um Corpo Submerso para um Leito Vibro-fluidizado*. São Carlos - SP, PPG-EQ/UFSCar. 131p. Dissertação.
- GARIM, M. M. (1998). *Estudo dos Coeficientes de Transferência de Massa em Leito Fluidizado e Vibro-fluidizado*. São Carlos - SP, PPG-EQ/UFSCar. 140p. Tese.
- GARIM, M. M.; FREIRE, J. T. (1994). *Leito Vibro-fluidizado Aerado: Estudos Relacionados a Determinação de  $U_{mf}$  e  $\Delta P_{mf}$* . In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 10<sup>o</sup>., São Paulo - SP, 1994. Anais do 10<sup>o</sup> COBEQ, São Paulo - SP, v.1, p.295-300.
- GARIM, M. M.; FREIRE, J. T. (1998). *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, Ed. UFRRJ, v.1, p.253-59.
- 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. Elsevier Science, v.74, p.181-96.
- GELDART, D. (1973). *Types of Gas Fluidization*. Powder Technology, Netherlands. v.7, p.285-92.
- GUIRALDELO, J. (2001). *Transferência de Calor entre um Cilindro Submerso e um Leito Fluidizado, na Faixa de Temperaturas da Ambiente até 400°C*. São Carlos - SP, DEQ/UFSCar. 52p. Trabalho de Graduação.
- GUPTA, R.; MUJUMDAR, A. S. (1980a). *Aerodynamic of a Vibrated Fluid Bed*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa. v.58, p.332-38.
- GUPTA, R.; MUJUMDAR, A. S. (1980b). *Aerodynamic and Thermal Characteristics of Vibrated Fluid Beds: a Review*. In: Drying '80, Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque. v.1, p.141-50.
- GUPTA, R.; LEUNG, P.; MUJUMDAR, A. S. (1980). *Drying Granular Materials in a Vibrated Fluidized Bed*. In: Drying '80, Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque. v.2, p.201-7.
- 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 the 11<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS 98), Grécia, v.C, p.2079-2083.

- KHALID, M.; MUJUMDAR, A. S. (1982). *Aerodynamic and Drying Characteristics of an Agitated Fluidized Bed Dryer*. In: Drying '82, Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque. v.1, p.61-73.
- KRÖLL, W. (1955). *Fliesserscheinungen an Haufwerken in Schwingenden Gafassen*. *Chimie. Ing. Techn.* v.27, n.1, p.33-8. (em alemão).
- 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 the 10<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS 96), Polônia, v.A, p.598-604.
- LIDE, D. R. (1997). *Handbook of Chemistry and Physics*. 78.ed. Boca Raton, CRC Press.
- LIU, X. D.; CAO, C. W.; ZIBCINSKI, I.; STRUMILLO, C. (1998). *Determination of Effective Moisture Diffusivity of Biomaterials*. In: Drying '98 - Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS 98), Grécia, v. A, p.732-738.
- MALHOTRA, K.; LAW-KWET-CHEONG, L.; MUJUMDAR, A. S. (1984). *Pressure Drop Characteristics for Vibrated Beds of Dry and Sticky Particles*. *Powder Technology, Netherlands*. v.39, p.101-5.
- MINCHEV, A. D.; ROMANKOV, P. G.; RASHKOVSKAYA, N.B. (1968). *Investigation of Drying of Pastes in Spouted Beds of Inert Materials*. In: MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. (1974). *Spouted Beds*. Nova Iorque. Academic Press, 304p.
- MONTEDO, O. R. K. (1992). *Coeficiente de Transferência de Calor de um Corpo Submerso (Cilindro ou Esfera) para um Leito Vibro-fluidizado*. São Carlos - SP, PPG-EQ/UFSCar. 72p. Dissertação.
- MORRIS, J. A. (1990). *Análise da Taxa de Evaporação de Água de um Secador de Leito de Jorro com Partículas Inertes*. São Carlos - SP, PPG-EQ/UFSCar. 106p. Dissertação.
- MUJUMDAR, A. S. (1984). *Aerodynamic Characteristics of a Vibrated Bed of Particles*. In: Drying '84, Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque. v.1, p.178-85.
- MUSHTAYEV, V. I.; KOROTOV, B. M.; CHEVILENKO, V. A.; EFIMOV, M. G.; PLANOVSKI, A. N. (1972). *teoret. Osnovy khim*. In: STRUMILLO, C.; PAKOWSKI, Z. (1980). *Drying of Granular Products in Vibrofluidized Beds*. In: Drying '80, Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque. v.1, p.211-26.

- NOVY, M. G.; KIECKBUSH, T. G. (1987). *Secagem de Alimentos Líquidos em Leito Vibro-fluidizado Contendo Inertes*. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, XV., Uberlândia - MG, 1987. Anais do XV ENEMP, Uberlândia - MG, Ed. UFU, v.2, p.430-40.
- OLIVEIRA, W. P. (1996). *Estudo da Secagem de Pastas em Leito de Jorro Cônico*. São Carlos – SP, PPG-EQ/UFSCar. 202p. Tese.
- PAKOWSKI, Z.; MUJUMDAR, A. S. (1980). *Heat Transfer from a Cylinder to a Vibrated Fluid Bed of Wet Particles*. In: Drying '80, Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque. v.1, p.149-55.
- 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, Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque. v.1, p.208-12.
- PAKOWSKI, Z.; MUJUNDAR, A. S.; STRUMILLO, C., (1984). *Theory and Application of Vibrated Beds and Vibrated Fluid Beds for Drying Process*. In: Advances in Drying, Hemisphere Publishing Corporation, Washington. v.3, p.245-306.
- PAN, Y. K.; LI, Z. Y.; MUJUMDAR, A. S.; KUDRA, T. (1997a). *Drying of a Root Crop in Vibro-fluidized Beds*. Drying Technology, Nova Iorque. v.15, n.1, p.215-23.
- 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, Nova Iorque. 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, Nova Iorque. v.15, n.6&8, p.2037-43.
- 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, Nova Iorque. v.17, n.10, p.2323-40.
- 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 the 10<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS 96), Polônia, v.B, p.997-1000.
- PASSOS, M. L.; MUJUMDAR, A. S. (2000). *Effect of Cohesive Forces on Fluidized and Spouted Beds of Wet Particles*. Powder Technology, Netherlands. v.110, p.222-38.

- PASSOS, M. L.; MUJUMDAR, A. S.; RAGHAVAN, G. S. V. (1987). *Spouting and Spout-fluidization of Dry-wet Particles in a Two Dimensional Bed*. In: MUJUMDAR, A. S. (1990). *Drying of Solids*. Nova Delhi, Índia. Sarita Prakashan, p.211-20. In: PASSOS, M. L.; MUJUMDAR, A. S. (2000) *Effect of Cohesive Forces on Fluidized and Spouted Beds of Wet Particles*. Powder Technology, Netherlands (Países Baixos). v.110, p.222-38.
- PASSOS, M. L.; MASSARANI, G. (2001). *Análise das Forças Coesivas Interpartículas em Leitos Fluidizados*. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, XXVIII., Rio de Janeiro - RJ, 2001. Anais do XXVIII ENEMP, Rio de Janeiro - RJ, Editora da COPPE/UFRJ, v.2, p.498-503.
- PATEL, K.; BRIDGWATER, J.; BAKER, C. G. J.; SCHNEIDER, T. (1986). *Spouting Behavior of Wet Solids*. In: Drying '86, Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque, v.1, p.183-9.
- PERRY, R. H.; GREEN, D. W. (1997). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 7.ed, Nova Iorque, McGraw-Hill.
- PHAM, Q. T. (1983). *Behavior of a Conical Spouted-bed Dryer for Animal Blood*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Ottawa. v.61, n.3, p.426-34.
- RAMESH, M. N.; SRINIVASA RAO, P, N. S. (1996). *Drying Studies of Cooked Rice in a Vibrofluidized Bed Drier*. Journal of Food Engineering, Grã-bretanha/Elsevier Science Limited. v.27, p.389-96.
- 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/Food & Nutrition Press Inc. v.19, n.3, p.321-29.
- RÉ, M. I. (1996). *Secagem de sangue animal em leito de jorro*. São Carlos – SP, PPG-EQ/UFSCar. 112p. Dissertação.
- REGER, E. O.; ROMANKOV, P. G.; RASHKOVSKAYA, N. B. (1967). *Drying of Paste Materials on Inert Substances in Spouted Beds*. Zhurnal Prikladnoi Khimii. v.40, n.10, p.2276-80.
- RINGER, D. U.; MUJUMDAR, A. S. (1984). *Analysis of Aerodynamics and Heat Transfer in Vibro-fluidized Beds*. Drying Technology, Nova Iorque. v.2, n.4, p.449-70.
- SAMOGIN, M. S. (1997). *Estudo da Fluidodinâmica em Leito Vibro Fluidizado*. São Carlos - SP, DEQ/UFSCar. 118p. Trabalho de Graduação.

- SANTANA, J. D. A. M.; CHARBEL, A. L. T.; PASSOS, M. L.; MASSARANI, G. (1997). *Effect of Interparticle Forces on the Spouted Bed Flow Behavior*. In: Proceedings of the Inter-American Drying Conference (IADC '97), Brasil - SP. Editora da UNICAMP, p.135-42.
- SCHNEIDER, T.; BRIDGWATER, J. (1993). *The Stability of Wet Spouted Beds*. Drying Technology, Nova Iorque. v.11, n.2, p.277-301.
- 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, Nova Iorque. v.13, n.5&7, p.1523-41.
- SPITZNER NETO, P. I. (1997). *Secagem de Pastas em Leito de Jorro*. São Carlos - SP, PPG-EQ/UFSCar. 201p. Dissertação.
- SPITZNER NETO, P. I. (2001). *Estudo da Secagem de Pastas e da Fluidodinâmica do Leito de Jorro na Presença de Pastas e Líquidos*. São Carlos - SP, PPG-EQ/UFSCar, 2001. 281p. Tese.
- 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 the 10<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS 96), Polônia, v.B, p.1085-92.
- STRUMILLO, C.; PAKOWSKI, Z. (1980). *Drying of Granular Products in Vibrofluidized Beds*. In: Drying '80, Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque. v.1, p.211-26.
- STRUMILLO, C.; MARKOWSKI, A.; KAMINSKI, W. (1983). *Modern Developments in Drying of Pastelike Materials*. In: Advances in Drying, McGraw Hill, Washington. v.2, p.193-231.
- SHUHONG, Y.; BAOJIAO, M.; YIGIN, W. (1994). *Heat Transfer in a Quasi-continuous Vibrated Fluidized Bed*. In: Drying '94 - Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS 94), Austrália, v.A, p.317-25.
- THOMAS, B.; LIU, Y. A.; CHAN, R.; SQUIRES, A. M. (1987). *A Method for Observing Phase-dependent Phenomena in Cyclic Systems: Application to Study of Dynamics of Vibrated Beds of Granular Solids*. Powder Technology, Netherlands. v.52, p.77-92.
- VALCHÁŘ, J.; CHOC, M.; TŮMA, V.; KOLÁŘ, S.; SUŠENÍ, V. (1967). *Chemickem Průmyslu*. In: STRUMILLO, C.; PAKOWSKI, Z. (1980). *Drying of Granular Products in Vibrofluidized Beds*. In: Drying '80, Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque. v.1, p.211-26.
- WELTMAN, R. N. (1996). *Reology*. Nova Iorque. Academic Press, v.3. In: OLIVEIRA, W. P. (1996). *Estudo da Secagem de Pastas em Leito de Jorro Cônico*. São Carlos - SP, PPG-EQ/UFSCar. 202p. Tese.

WEN, C. Y.; YU, Y. H. (1966). *Mechanics of Fluidization*. Chem. Eng. Progress Symposium Ser., v.62, n.62, p. 100-111.

WINDHOLZ, M. (1996). *The Merck Index - An Encyclopedia of Chemical and Drugs*. 12. ed. Merck & Co., Inc.

## **APÊNDICE A**

### **DADOS EXPERIMENTAIS PARA A ANÁLISE DA REPRODUTIVIDADE DA QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO E DO SEU DESVIO PADRÃO PARA CADA VELOCIDADE SUPERFICIAL DO AR**





## **APÊNDICE B**

**VALORES OBTIDOS PARA A VELOCIDADE MÍNIMA DE  
FLUIDIZAÇÃO E A VELOCIDADE MÍNIMA DE MISTURA**

## Apêndice B

**Tabela B.1:** Velocidade mínima de fluidização;  $H_0 = 8,0 \times 10^{-3}$  m;  $A = 3,0 \times 10^{-3}$  m.

|                                       |          |      | $U_{mf}$ (m/s)  |              |              |                 |              |              |
|---------------------------------------|----------|------|-----------------|--------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|
|                                       |          |      | $\phi = 0,0000$ |              |              | $\phi = 0,0005$ |              |              |
|                                       |          |      | T (°C)<br>40    | T (°C)<br>50 | T (°C)<br>60 | T (°C)<br>40    | T (°C)<br>50 | T (°C)<br>60 |
| $d_p$ ( $\times 10^{-3}$ )<br>1,095 m | $\Gamma$ | 0,00 | 0,58            | 0,58         | 0,57         | 0,78            | 0,77         | 0,87         |
|                                       |          | 0,50 | 0,57            | 0,61         | 0,60         | 0,59            | 0,56         | 0,57         |
|                                       |          | 1,00 | 0,60            | 0,60         | 0,60         | 0,67            | 0,60         | 0,60         |
|                                       |          | 1,50 | 0,63            | 0,61         | 0,60         | 0,60            | 0,60         | 0,61         |
| $d_p$ ( $\times 10^{-3}$ )<br>1,545 m | $\Gamma$ | 0,00 | 0,73            | 0,87         | 0,88         | 1,22            | 1,21         | 1,09         |
|                                       |          | 0,50 | 0,72            | 0,79         | 0,74         | 0,79            | 0,90         | 0,82         |
|                                       |          | 1,00 | 0,83            | 0,95         | 0,92         | 0,82            | 0,82         | 0,87         |
|                                       |          | 1,50 | 0,82            | 0,87         | 0,97         | 0,81            | 0,79         | 0,90         |
| $d_p$ ( $\times 10^{-3}$ )<br>1,850 m | $\Gamma$ | 0,00 | 0,90            | 0,91         | 0,90         | 1,40            | 1,27         | 1,09         |
|                                       |          | 0,50 | 0,83            | 0,84         | 0,83         | 0,93            | 0,98         | 0,85         |
|                                       |          | 1,00 | 0,99            | 1,00         | 1,00         | 0,89            | 0,87         | 0,89         |
|                                       |          | 1,50 | 0,95            | 1,00         | 1,00         | 0,86            | 0,80         | 0,91         |
|                                       |          |      | $\phi = 0,0010$ |              |              | $\phi = 0,0020$ |              |              |
| $d_p$ ( $\times 10^{-3}$ )<br>1,095 m | $\Gamma$ | 0,00 | 1,03            | 0,87         | 0,96         | 1,07            | 1,05         | 1,05         |
|                                       |          | 0,50 | 0,57            | 0,52         | 0,57         | 0,57            | 0,59         | 0,57         |
|                                       |          | 1,00 | 0,67            | 0,60         | 0,59         | 0,64            | 0,68         | 0,67         |
|                                       |          | 1,50 | 0,63            | 0,59         | 0,58         | 0,61            | 0,63         | 0,64         |
| $d_p$ ( $\times 10^{-3}$ )<br>1,545 m | $\Gamma$ | 0,00 | 1,37            | 1,25         | 1,23         | -               | -            | -            |
|                                       |          | 0,50 | 0,80            | 0,83         | 0,79         | 0,82            | 0,87         | 0,75         |
|                                       |          | 1,00 | 0,86            | 0,82         | 0,82         | 0,93            | 0,89         | 0,81         |
|                                       |          | 1,50 | 0,79            | 0,82         | 0,86         | 0,81            | 0,83         | 0,83         |
| $d_p$ ( $\times 10^{-3}$ )<br>1,850 m | $\Gamma$ | 0,00 | 1,42            | 1,37         | 1,35         | -               | -            | -            |
|                                       |          | 0,50 | 0,87            | 0,83         | 0,81         | 0,87            | 0,87         | 0,87         |
|                                       |          | 1,00 | 0,90            | 0,85         | 0,81         | 0,94            | 0,94         | 0,94         |
|                                       |          | 1,50 | 0,82            | 0,80         | 0,81         | 0,83            | 0,81         | 0,78         |
|                                       |          |      | $\phi = 0,0030$ |              |              | $\phi = 0,0040$ |              |              |
| $d_p$ ( $\times 10^{-3}$ )<br>1,095 m | $\Gamma$ | 0,00 | 1,07            | 1,06         | 1,10         | 1,10            | 1,13         | 1,10         |
|                                       |          | 0,50 | 0,63            | 0,57         | 0,63         | 0,63            | 0,62         | 0,62         |
|                                       |          | 1,00 | 0,61            | 0,65         | 0,66         | 0,67            | 0,67         | 0,67         |
|                                       |          | 1,50 | 0,70            | 0,65         | 0,67         | 0,70            | 0,68         | 0,67         |

## Apêndice B

**Tabela B.2:** Velocidade mínima de mistura;  $H_0 = 8,0 \times 10^{-3}$  m;  $A = 3,0 \times 10^{-3}$  m.

|                                       |          | $U_{mm}$ (m/s)  |              |              |                 |              |              |      |
|---------------------------------------|----------|-----------------|--------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|------|
|                                       |          | $\phi = 0,0000$ |              |              | $\phi = 0,0005$ |              |              |      |
|                                       |          | T (°C)<br>40    | T (°C)<br>50 | T (°C)<br>60 | T (°C)<br>40    | T (°C)<br>50 | T (°C)<br>60 |      |
| $d_p$ ( $\times 10^{-3}$ )<br>1,095 m | $\Gamma$ | 0,00            | 0,58         | 0,58         | 0,58            | 0,74         | 0,67         | 0,89 |
|                                       |          | 0,50            | 0,58         | 0,58         | 0,57            | 0,66         | 0,57         | 0,67 |
|                                       |          | 1,00            | 0,58         | 0,57         | 0,49            | 0,66         | 0,57         | 0,66 |
|                                       |          | 1,50            | 0,57         | 0,57         | 0,48            | 0,66         | 0,57         | 0,58 |
| $d_p$ ( $\times 10^{-3}$ )<br>1,545 m | $\Gamma$ | 0,00            | 0,87         | 0,87         | 0,88            | 1,33         | 1,29         | 1,28 |
|                                       |          | 0,50            | 0,82         | 0,88         | 0,88            | 1,15         | 1,10         | 1,15 |
|                                       |          | 1,00            | 0,82         | 0,81         | 0,88            | 1,15         | 0,99         | 1,14 |
|                                       |          | 1,50            | 0,82         | 0,82         | 0,82            | 1,11         | 0,99         | 1,00 |
| $d_p$ ( $\times 10^{-3}$ )<br>1,850 m | $\Gamma$ | 0,00            | 0,99         | 0,94         | 0,96            | 1,40         | 1,24         | 1,41 |
|                                       |          | 0,50            | 0,94         | 0,88         | 0,89            | 1,19         | 1,15         | 1,23 |
|                                       |          | 1,00            | 0,90         | 0,82         | 0,89            | 1,16         | 1,15         | 1,15 |
|                                       |          | 1,50            | 0,90         | 0,82         | 0,84            | 1,14         | 1,06         | 1,09 |
|                                       |          | $\phi = 0,0010$ |              |              | $\phi = 0,0020$ |              |              |      |
| $d_p$ ( $\times 10^{-3}$ )<br>1,095 m | $\Gamma$ | 0,00            | 1,00         | 0,86         | 0,89            | 1,15         | 1,15         | 1,10 |
|                                       |          | 0,50            | 0,81         | 0,70         | 0,67            | 1,00         | 1,00         | 0,94 |
|                                       |          | 1,00            | 0,75         | 0,67         | 0,66            | 0,99         | 0,94         | 0,89 |
|                                       |          | 1,50            | 0,72         | 0,59         | 0,58            | 0,88         | 0,84         | 0,84 |
| $d_p$ ( $\times 10^{-3}$ )<br>1,545 m | $\Gamma$ | 0,00            | 1,37         | 1,29         | 1,28            | 1,37         | 1,33         | 1,36 |
|                                       |          | 0,50            | 1,28         | 1,20         | 1,15            | 1,29         | 1,32         | 1,20 |
|                                       |          | 1,00            | 1,28         | 1,19         | 1,14            | 1,29         | 1,29         | 1,15 |
|                                       |          | 1,50            | 1,24         | 1,15         | 1,00            | 1,29         | 1,28         | 1,10 |
| $d_p$ ( $\times 10^{-3}$ )<br>1,850 m | $\Gamma$ | 0,00            | 1,42         | 1,37         | 1,41            | -            | -            | -    |
|                                       |          | 0,50            | 1,36         | 1,29         | 1,23            | 1,41         | 1,40         | 1,37 |
|                                       |          | 1,00            | 1,33         | 1,23         | 1,15            | 1,33         | 1,33         | 1,37 |
|                                       |          | 1,50            | 1,32         | 1,19         | 1,09            | 1,33         | 1,33         | 1,37 |
|                                       |          | $\phi = 0,0030$ |              |              | $\phi = 0,0040$ |              |              |      |
| $d_p$ ( $\times 10^{-3}$ )<br>1,095 m | $\Gamma$ | 0,00            | 1,15         | 1,15         | 1,15            | 1,15         | 1,24         | 1,20 |
|                                       |          | 0,50            | 1,10         | 1,05         | 1,00            | 1,15         | 1,19         | 1,15 |
|                                       |          | 1,00            | 1,04         | 1,00         | 0,94            | 1,05         | 1,03         | 1,00 |
|                                       |          | 1,50            | 1,00         | 0,99         | 0,90            | 1,00         | 0,96         | 0,96 |

## **APÊNDICE C**

**DADOS EXPERIMENTAIS DA QUEDA DE PRESSÃO NO  
LEITO E DO SEU DESVIO PADRÃO EM FUNÇÃO DA  
VELOCIDADE SUPERFICIAL DO AR**

## Apêndice C

**Tabela C.1:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 40^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0000$ ;  $d_p = 1,095 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

| $\Gamma = 0,00$ |                                   | $\Gamma = 0,50$ |                                   | $\Gamma = 1,00$ |                                   | $\Gamma = 1,50$ |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,37            | 1252,11                           | 1,36            | 1273,32                           | 1,42            | 1237,52                           | 1,43            | 1234,47                           |
| 1,32            | 1259,71                           | 1,32            | 1273,76                           | 1,40            | 1271,65                           | 1,40            | 1241,98                           |
| 1,28            | 1250,47                           | 1,28            | 1245,12                           | 1,36            | 1244,24                           | 1,36            | 1266,08                           |
| 1,23            | 1248,28                           | 1,23            | 1250,28                           | 1,32            | 1211,61                           | 1,32            | 1253,56                           |
| 1,19            | 1263,91                           | 1,19            | 1263,16                           | 1,28            | 1245,43                           | 1,27            | 1247,27                           |
| 1,16            | 1266,69                           | 1,15            | 1252,71                           | 1,23            | 1232,02                           | 1,24            | 1222,10                           |
| 1,10            | 1266,79                           | 1,10            | 1256,58                           | 1,19            | 1249,00                           | 1,18            | 1252,07                           |
| 1,04            | 1263,09                           | 1,05            | 1224,33                           | 1,15            | 1248,52                           | 1,15            | 1257,41                           |
| 0,99            | 1282,59                           | 0,99            | 1263,55                           | 1,11            | 1216,29                           | 1,10            | 1232,86                           |
| 0,93            | 1260,37                           | 0,93            | 1265,24                           | 1,05            | 1223,10                           | 1,05            | 1232,43                           |
| 0,87            | 1267,32                           | 0,88            | 1264,88                           | 0,99            | 1267,04                           | 0,98            | 1231,50                           |
| 0,81            | 1278,89                           | 0,81            | 1249,33                           | 0,94            | 1211,35                           | 0,93            | 1259,37                           |
| 0,73            | 1280,12                           | 0,74            | 1246,91                           | 0,87            | 1237,17                           | 0,88            | 1217,23                           |
| 0,65            | 1297,30                           | 0,67            | 1255,26                           | 0,80            | 1247,89                           | 0,81            | 1212,82                           |
| 0,58            | 1264,64                           | 0,57            | 1154,90                           | 0,74            | 1246,58                           | 0,74            | 1248,73                           |
| 0,47            | 975,26                            | 0,47            | 1029,55                           | 0,66            | 1246,96                           | 0,67            | 1259,52                           |
| 0,36            | 675,48                            | 0,34            | 790,01                            | 0,58            | 1191,29                           | 0,58            | 1160,74                           |
| 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,47            | 977,49                            | 0,46            | 961,86                            |
|                 |                                   |                 |                                   | 0,33            | 704,46                            | 0,37            | 819,32                            |
|                 |                                   |                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,37            | 203,24                            | 1,36            | 287,77                            | 1,42            | 339,76                            | 1,43            | 411,95                            |
| 1,32            | 202,67                            | 1,32            | 375,12                            | 1,40            | 339,49                            | 1,40            | 374,94                            |
| 1,28            | 185,92                            | 1,28            | 323,68                            | 1,36            | 328,80                            | 1,36            | 296,20                            |
| 1,23            | 159,05                            | 1,23            | 292,69                            | 1,32            | 378,98                            | 1,32            | 381,20                            |
| 1,19            | 179,62                            | 1,19            | 296,35                            | 1,28            | 317,39                            | 1,27            | 347,58                            |
| 1,16            | 165,35                            | 1,15            | 300,84                            | 1,23            | 301,77                            | 1,24            | 313,54                            |
| 1,10            | 194,81                            | 1,10            | 299,93                            | 1,19            | 333,16                            | 1,18            | 364,01                            |
| 1,04            | 139,54                            | 1,05            | 260,66                            | 1,15            | 253,46                            | 1,15            | 374,40                            |
| 0,99            | 156,86                            | 0,99            | 254,75                            | 1,11            | 296,33                            | 1,10            | 328,41                            |
| 0,93            | 87,54                             | 0,93            | 193,58                            | 1,05            | 303,82                            | 1,05            | 312,82                            |
| 0,87            | 156,88                            | 0,88            | 200,56                            | 0,99            | 233,23                            | 0,98            | 291,31                            |
| 0,81            | 85,30                             | 0,81            | 159,68                            | 0,94            | 269,93                            | 0,93            | 304,68                            |
| 0,73            | 61,96                             | 0,74            | 127,13                            | 0,87            | 228,05                            | 0,88            | 299,76                            |
| 0,65            | 22,53                             | 0,67            | 121,02                            | 0,80            | 214,05                            | 0,81            | 305,00                            |
| 0,58            | 15,46                             | 0,57            | 113,22                            | 0,74            | 205,96                            | 0,74            | 303,39                            |
| 0,47            | 18,26                             | 0,47            | 98,09                             | 0,66            | 204,46                            | 0,67            | 310,32                            |
| 0,36            | 13,31                             | 0,34            | 40,20                             | 0,58            | 200,09                            | 0,58            | 318,96                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,47            | 219,81                            | 0,46            | 328,85                            |
|                 |                                   |                 |                                   | 0,33            | 214,58                            | 0,37            | 416,87                            |
|                 |                                   |                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |











## Apêndice C

**Tabela C.7:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 40^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0000$ ;  $dp = 1,545 \times 10^{-3}$  m.

| $\Gamma = 0,00$ |                                   | $\Gamma = 0,50$ |                                   | $\Gamma = 1,00$ |                                   | $\Gamma = 1,50$ |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,41            | 1259,36                           | 1,43            | 1266,81                           | 1,44            | 1285,43                           | 1,45            | 1279,00                           |
| 1,36            | 1250,80                           | 1,40            | 1251,63                           | 1,40            | 1300,75                           | 1,40            | 1285,92                           |
| 1,32            | 1264,75                           | 1,37            | 1239,00                           | 1,36            | 1278,51                           | 1,37            | 1267,86                           |
| 1,28            | 1265,31                           | 1,33            | 1266,31                           | 1,32            | 1230,64                           | 1,32            | 1256,60                           |
| 1,23            | 1257,70                           | 1,28            | 1265,58                           | 1,28            | 1255,00                           | 1,27            | 1248,56                           |
| 1,18            | 1281,74                           | 1,24            | 1276,27                           | 1,23            | 1278,53                           | 1,23            | 1242,59                           |
| 1,15            | 1275,62                           | 1,19            | 1249,86                           | 1,19            | 1265,57                           | 1,20            | 1211,48                           |
| 1,10            | 1289,32                           | 1,15            | 1274,30                           | 1,15            | 1257,26                           | 1,15            | 1245,16                           |
| 1,04            | 1294,40                           | 1,10            | 1249,67                           | 1,10            | 1264,04                           | 1,10            | 1224,25                           |
| 0,98            | 1311,32                           | 1,05            | 1234,19                           | 1,05            | 1237,75                           | 1,05            | 1202,35                           |
| 0,93            | 1320,43                           | 1,00            | 1257,77                           | 1,00            | 1255,61                           | 0,99            | 1198,91                           |
| 0,87            | 1321,99                           | 0,94            | 1244,80                           | 0,94            | 1251,74                           | 0,94            | 1203,36                           |
| 0,81            | 1337,38                           | 0,89            | 1225,64                           | 0,88            | 1217,69                           | 0,88            | 1211,46                           |
| 0,75            | 1300,79                           | 0,82            | 1199,45                           | 0,83            | 1231,28                           | 0,82            | 1204,20                           |
| 0,65            | 1115,19                           | 0,76            | 1159,07                           | 0,74            | 1110,32                           | 0,75            | 1136,03                           |
| 0,60            | 965,14                            | 0,67            | 1082,90                           | 0,66            | 1022,38                           | 0,69            | 1035,81                           |
| 0,47            | 681,44                            | 0,58            | 986,47                            | 0,58            | 905,32                            | 0,57            | 871,32                            |
| 0,34            | 423,45                            | 0,43            | 725,13                            | 0,47            | 733,91                            | 0,48            | 735,56                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,33            | 491,78                            | 0,35            | 555,91                            | 0,34            | 478,10                            |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,41            | 164,36                            | 1,43            | 295,11                            | 1,44            | 267,38                            | 1,45            | 294,51                            |
| 1,36            | 249,72                            | 1,40            | 293,45                            | 1,40            | 245,36                            | 1,40            | 305,43                            |
| 1,32            | 125,75                            | 1,37            | 298,56                            | 1,36            | 306,27                            | 1,37            | 333,69                            |
| 1,28            | 131,18                            | 1,33            | 254,28                            | 1,32            | 291,44                            | 1,32            | 348,26                            |
| 1,23            | 123,65                            | 1,28            | 260,81                            | 1,28            | 260,17                            | 1,27            | 310,65                            |
| 1,18            | 122,00                            | 1,24            | 215,99                            | 1,23            | 240,82                            | 1,23            | 313,12                            |
| 1,15            | 141,32                            | 1,19            | 232,21                            | 1,19            | 236,54                            | 1,20            | 312,80                            |
| 1,10            | 131,07                            | 1,15            | 198,19                            | 1,15            | 239,67                            | 1,15            | 295,47                            |
| 1,04            | 95,54                             | 1,10            | 213,37                            | 1,10            | 210,48                            | 1,10            | 302,61                            |
| 0,98            | 119,54                            | 1,05            | 183,32                            | 1,05            | 211,71                            | 1,05            | 276,79                            |
| 0,93            | 39,35                             | 1,00            | 153,37                            | 1,00            | 208,27                            | 0,99            | 291,46                            |
| 0,87            | 47,36                             | 0,94            | 139,38                            | 0,94            | 188,94                            | 0,94            | 269,23                            |
| 0,81            | 18,18                             | 0,89            | 118,08                            | 0,88            | 182,27                            | 0,88            | 266,34                            |
| 0,75            | 16,72                             | 0,82            | 114,42                            | 0,83            | 182,00                            | 0,82            | 272,12                            |
| 0,65            | 14,58                             | 0,76            | 114,45                            | 0,74            | 177,07                            | 0,75            | 263,29                            |
| 0,60            | 14,11                             | 0,67            | 99,22                             | 0,66            | 170,93                            | 0,69            | 264,14                            |
| 0,47            | 9,70                              | 0,58            | 91,31                             | 0,58            | 191,77                            | 0,57            | 276,57                            |
| 0,34            | 7,66                              | 0,43            | 43,30                             | 0,47            | 194,19                            | 0,48            | 326,37                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,33            | 22,14                             | 0,35            | 139,51                            | 0,34            | 352,59                            |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |



## Apêndice C

**Tabela C.9:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 40^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0010$ ;  $dp = 1,545 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

| $\Gamma = 0,00$ |                                   | $\Gamma = 0,50$ |                                   | $\Gamma = 1,00$ |                                   | $\Gamma = 1,50$ |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,42            | 1235,14                           | 1,44            | 1276,85                           | 1,44            | 1280,69                           | 1,44            | 1312,39                           |
| 1,36            | 1206,44                           | 1,40            | 1272,49                           | 1,40            | 1281,41                           | 1,41            | 1289,75                           |
| 1,33            | 1179,02                           | 1,37            | 1274,18                           | 1,37            | 1268,41                           | 1,37            | 1305,02                           |
| 1,28            | 1132,34                           | 1,33            | 1273,90                           | 1,32            | 1278,30                           | 1,32            | 1302,00                           |
| 1,24            | 1102,40                           | 1,28            | 1265,71                           | 1,28            | 1290,10                           | 1,27            | 1295,56                           |
| 1,19            | 1063,42                           | 1,25            | 1242,32                           | 1,22            | 1285,59                           | 1,24            | 1311,97                           |
| 1,15            | 1040,41                           | 1,20            | 1246,68                           | 1,15            | 1284,63                           | 1,20            | 1315,80                           |
| 1,10            | 991,35                            | 1,16            | 1256,34                           | 1,11            | 1269,58                           | 1,14            | 1319,28                           |
| 1,05            | 935,52                            | 1,11            | 1245,07                           | 1,05            | 1230,80                           | 1,10            | 1307,19                           |
| 0,98            | 882,86                            | 1,06            | 1228,90                           | 1,00            | 1191,00                           | 1,06            | 1284,13                           |
| 0,93            | 817,20                            | 1,00            | 1226,00                           | 0,94            | 1139,62                           | 1,00            | 1260,18                           |
| 0,86            | 746,20                            | 0,95            | 1201,75                           | 0,89            | 1113,45                           | 0,94            | 1105,94                           |
| 0,81            | 672,81                            | 0,88            | 1184,67                           | 0,83            | 1060,37                           | 0,89            | 1004,87                           |
| 0,74            | 590,07                            | 0,81            | 1141,32                           | 0,75            | 923,93                            | 0,81            | 962,65                            |
| 0,66            | 512,81                            | 0,75            | 1107,12                           | 0,66            | 865,88                            | 0,75            | 905,73                            |
| 0,58            | 414,72                            | 0,66            | 963,14                            | 0,56            | 785,50                            | 0,67            | 771,05                            |
| 0,48            | 316,51                            | 0,58            | 787,18                            | 0,48            | 644,52                            | 0,57            | 627,04                            |
| 0,35            | 207,40                            | 0,48            | 567,87                            | 0,35            | 405,11                            | 0,48            | 502,53                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,37            | 386,24                            | 0,00            | 0,02                              | 0,31            | 273,85                            |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,42            | 47,28                             | 1,44            | 179,77                            | 1,44            | 186,34                            | 1,44            | 244,33                            |
| 1,36            | 40,88                             | 1,40            | 174,92                            | 1,40            | 186,23                            | 1,41            | 240,99                            |
| 1,33            | 37,71                             | 1,37            | 153,90                            | 1,37            | 175,25                            | 1,37            | 225,17                            |
| 1,28            | 31,01                             | 1,33            | 150,11                            | 1,32            | 162,96                            | 1,32            | 226,69                            |
| 1,24            | 30,18                             | 1,28            | 121,95                            | 1,28            | 151,67                            | 1,27            | 225,51                            |
| 1,19            | 26,94                             | 1,25            | 123,40                            | 1,22            | 153,72                            | 1,24            | 230,42                            |
| 1,15            | 25,57                             | 1,20            | 109,32                            | 1,15            | 153,78                            | 1,20            | 233,20                            |
| 1,10            | 22,72                             | 1,16            | 102,97                            | 1,11            | 147,41                            | 1,14            | 231,02                            |
| 1,05            | 20,67                             | 1,11            | 95,18                             | 1,05            | 148,18                            | 1,10            | 236,97                            |
| 0,98            | 21,27                             | 1,06            | 98,12                             | 1,00            | 145,61                            | 1,06            | 234,82                            |
| 0,93            | 15,97                             | 1,00            | 99,24                             | 0,94            | 148,14                            | 1,00            | 228,77                            |
| 0,86            | 14,23                             | 0,95            | 94,16                             | 0,89            | 157,03                            | 0,94            | 219,70                            |
| 0,81            | 15,00                             | 0,88            | 83,06                             | 0,83            | 166,56                            | 0,89            | 217,42                            |
| 0,74            | 11,65                             | 0,81            | 73,41                             | 0,75            | 183,58                            | 0,81            | 208,42                            |
| 0,66            | 11,08                             | 0,75            | 57,53                             | 0,66            | 169,15                            | 0,75            | 225,16                            |
| 0,58            | 11,86                             | 0,66            | 32,61                             | 0,56            | 121,30                            | 0,67            | 260,17                            |
| 0,48            | 9,19                              | 0,58            | 25,01                             | 0,48            | 90,46                             | 0,57            | 266,99                            |
| 0,35            | 7,57                              | 0,48            | 20,50                             | 0,35            | 28,79                             | 0,48            | 254,28                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,37            | 14,96                             | 0,00            | 0,00                              | 0,31            | 212,33                            |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              |                 |                                   | 0,00            | 0,00                              |

## Apêndice C

**Tabela C.10:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 40^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0020$ ;  $dp = 1,545 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

| $\Gamma = 0,00$ |                                   | $\Gamma = 0,50$ |                                   | $\Gamma = 1,00$ |                                   | $\Gamma = 1,50$ |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,42            | 1203,23                           | 1,44            | 1284,49                           | 1,44            | 1305,28                           | 1,44            | 1333,31                           |
| 1,37            | 1171,69                           | 1,40            | 1272,06                           | 1,40            | 1307,78                           | 1,40            | 1329,66                           |
| 1,32            | 1100,07                           | 1,36            | 1265,59                           | 1,37            | 1304,14                           | 1,37            | 1325,69                           |
| 1,29            | 1064,83                           | 1,33            | 1247,43                           | 1,32            | 1310,29                           | 1,33            | 1332,01                           |
| 1,23            | 1016,77                           | 1,29            | 1259,35                           | 1,29            | 1312,77                           | 1,29            | 1331,26                           |
| 1,19            | 975,85                            | 1,23            | 1236,02                           | 1,24            | 1301,51                           | 1,24            | 1312,43                           |
| 1,14            | 948,15                            | 1,19            | 1234,01                           | 1,19            | 1289,41                           | 1,19            | 1303,11                           |
| 1,09            | 890,84                            | 1,15            | 1244,50                           | 1,15            | 1299,91                           | 1,14            | 1308,36                           |
| 1,04            | 828,03                            | 1,10            | 1216,42                           | 1,11            | 1276,54                           | 1,10            | 1303,11                           |
| 0,99            | 804,11                            | 1,05            | 1187,36                           | 1,05            | 1207,04                           | 1,05            | 1261,25                           |
| 0,94            | 754,25                            | 0,99            | 1205,23                           | 1,00            | 1199,72                           | 1,00            | 1184,78                           |
| 0,87            | 667,54                            | 0,94            | 1190,27                           | 0,94            | 1148,55                           | 0,95            | 1048,64                           |
| 0,80            | 587,27                            | 0,89            | 1162,38                           | 0,87            | 1092,26                           | 0,88            | 980,46                            |
| 0,74            | 522,32                            | 0,82            | 1117,91                           | 0,81            | 1014,54                           | 0,80            | 961,47                            |
| 0,65            | 438,89                            | 0,74            | 1013,90                           | 0,73            | 919,85                            | 0,74            | 910,36                            |
| 0,57            | 367,49                            | 0,65            | 858,49                            | 0,66            | 859,63                            | 0,66            | 720,68                            |
| 0,50            | 295,92                            | 0,59            | 743,34                            | 0,57            | 805,91                            | 0,54            | 557,38                            |
| 0,34            | 174,03                            | 0,48            | 540,87                            | 0,48            | 637,76                            | 0,42            | 426,42                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,34            | 329,46                            | 0,30            | 307,60                            | 0,31            | 279,37                            |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,42            | 39,03                             | 1,44            | 178,30                            | 1,44            | 170,32                            | 1,44            | 214,07                            |
| 1,37            | 38,41                             | 1,40            | 159,30                            | 1,40            | 169,56                            | 1,40            | 223,32                            |
| 1,32            | 35,94                             | 1,36            | 145,11                            | 1,37            | 160,54                            | 1,37            | 210,96                            |
| 1,29            | 30,54                             | 1,33            | 130,45                            | 1,32            | 142,02                            | 1,33            | 211,75                            |
| 1,23            | 28,33                             | 1,29            | 99,20                             | 1,29            | 142,32                            | 1,29            | 211,34                            |
| 1,19            | 29,14                             | 1,23            | 112,80                            | 1,24            | 141,95                            | 1,24            | 216,66                            |
| 1,14            | 26,68                             | 1,19            | 106,77                            | 1,19            | 140,35                            | 1,19            | 212,85                            |
| 1,09            | 23,40                             | 1,15            | 109,29                            | 1,15            | 143,14                            | 1,14            | 218,95                            |
| 1,04            | 20,78                             | 1,10            | 107,02                            | 1,11            | 145,73                            | 1,10            | 216,01                            |
| 0,99            | 22,05                             | 1,05            | 108,85                            | 1,05            | 139,10                            | 1,05            | 218,62                            |
| 0,94            | 19,15                             | 0,99            | 108,12                            | 1,00            | 142,96                            | 1,00            | 210,19                            |
| 0,87            | 16,88                             | 0,94            | 90,88                             | 0,94            | 149,39                            | 0,95            | 204,52                            |
| 0,80            | 15,57                             | 0,89            | 88,16                             | 0,87            | 160,93                            | 0,88            | 200,37                            |
| 0,74            | 14,71                             | 0,82            | 86,76                             | 0,81            | 170,11                            | 0,80            | 211,96                            |
| 0,65            | 11,50                             | 0,74            | 51,94                             | 0,73            | 165,55                            | 0,74            | 230,27                            |
| 0,57            | 12,40                             | 0,65            | 42,95                             | 0,66            | 153,05                            | 0,66            | 240,66                            |
| 0,50            | 9,73                              | 0,59            | 28,19                             | 0,57            | 110,82                            | 0,54            | 220,47                            |
| 0,34            | 7,24                              | 0,48            | 14,34                             | 0,48            | 75,95                             | 0,42            | 223,71                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,34            | 10,33                             | 0,30            | 16,36                             | 0,31            | 194,67                            |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |

## Apêndice C

**Tabela C.11:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 40^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0000$ ;  $dp = 1,850 \times 10^{-3}$  m.

| $\Gamma = 0,00$ |                                   | $\Gamma = 0,50$ |                                   | $\Gamma = 1,00$ |                                   | $\Gamma = 1,50$ |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,42            | 1320,44                           | 1,44            | 1282,53                           | 1,45            | 1312,15                           | 1,45            | 1271,84                           |
| 1,38            | 1312,33                           | 1,41            | 1295,02                           | 1,41            | 1292,99                           | 1,41            | 1256,39                           |
| 1,33            | 1316,90                           | 1,37            | 1301,71                           | 1,37            | 1301,61                           | 1,37            | 1239,71                           |
| 1,28            | 1330,59                           | 1,32            | 1292,97                           | 1,33            | 1275,16                           | 1,33            | 1253,29                           |
| 1,24            | 1326,10                           | 1,27            | 1279,36                           | 1,29            | 1277,17                           | 1,27            | 1233,02                           |
| 1,19            | 1336,71                           | 1,24            | 1262,93                           | 1,25            | 1236,87                           | 1,25            | 1217,65                           |
| 1,15            | 1363,34                           | 1,19            | 1270,71                           | 1,20            | 1245,79                           | 1,20            | 1225,20                           |
| 1,10            | 1378,35                           | 1,16            | 1293,42                           | 1,15            | 1267,18                           | 1,15            | 1225,22                           |
| 1,04            | 1409,03                           | 1,10            | 1285,35                           | 1,10            | 1264,21                           | 1,11            | 1254,84                           |
| 0,99            | 1440,36                           | 1,05            | 1256,52                           | 1,04            | 1242,53                           | 1,06            | 1230,71                           |
| 0,94            | 1428,87                           | 1,00            | 1259,50                           | 0,99            | 1262,46                           | 1,01            | 1226,33                           |
| 0,88            | 1371,49                           | 0,94            | 1224,52                           | 0,95            | 1236,84                           | 0,94            | 1204,75                           |
| 0,83            | 1238,26                           | 0,90            | 1200,32                           | 0,89            | 1130,35                           | 0,89            | 1107,94                           |
| 0,75            | 1051,79                           | 0,82            | 1144,16                           | 0,82            | 1062,56                           | 0,80            | 1000,24                           |
| 0,67            | 912,13                            | 0,74            | 1030,98                           | 0,76            | 990,81                            | 0,76            | 930,68                            |
| 0,57            | 699,69                            | 0,66            | 961,56                            | 0,68            | 882,03                            | 0,68            | 845,63                            |
| 0,49            | 551,97                            | 0,58            | 820,90                            | 0,59            | 765,71                            | 0,58            | 692,50                            |
| 0,34            | 318,48                            | 0,47            | 631,07                            | 0,48            | 648,01                            | 0,48            | 544,89                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,34            | 400,46                            | 0,39            | 501,39                            | 0,36            | 363,99                            |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,42            | 185,59                            | 1,44            | 251,80                            | 1,45            | 294,62                            | 1,45            | 301,11                            |
| 1,38            | 169,71                            | 1,41            | 248,76                            | 1,41            | 253,44                            | 1,41            | 319,63                            |
| 1,33            | 167,14                            | 1,37            | 238,36                            | 1,37            | 218,94                            | 1,37            | 288,74                            |
| 1,28            | 125,70                            | 1,32            | 211,78                            | 1,33            | 244,99                            | 1,33            | 302,84                            |
| 1,24            | 97,98                             | 1,27            | 192,08                            | 1,29            | 220,69                            | 1,27            | 273,62                            |
| 1,19            | 110,75                            | 1,24            | 199,85                            | 1,25            | 224,67                            | 1,25            | 274,80                            |
| 1,15            | 80,90                             | 1,19            | 170,36                            | 1,20            | 224,20                            | 1,20            | 267,07                            |
| 1,10            | 70,75                             | 1,16            | 155,91                            | 1,15            | 200,59                            | 1,15            | 259,54                            |
| 1,04            | 32,75                             | 1,10            | 137,13                            | 1,10            | 186,17                            | 1,11            | 239,78                            |
| 0,99            | 31,02                             | 1,05            | 126,14                            | 1,04            | 183,73                            | 1,06            | 239,84                            |
| 0,94            | 22,03                             | 1,00            | 124,31                            | 0,99            | 177,63                            | 1,01            | 243,12                            |
| 0,88            | 16,33                             | 0,94            | 122,07                            | 0,95            | 174,53                            | 0,94            | 241,49                            |
| 0,83            | 16,24                             | 0,90            | 106,93                            | 0,89            | 167,47                            | 0,89            | 233,18                            |
| 0,75            | 15,31                             | 0,82            | 101,16                            | 0,82            | 161,53                            | 0,80            | 220,70                            |
| 0,67            | 14,22                             | 0,74            | 86,99                             | 0,76            | 174,94                            | 0,76            | 234,17                            |
| 0,57            | 14,63                             | 0,66            | 61,14                             | 0,68            | 184,59                            | 0,68            | 232,11                            |
| 0,49            | 11,65                             | 0,58            | 51,96                             | 0,59            | 177,20                            | 0,58            | 269,16                            |
| 0,34            | 8,03                              | 0,47            | 33,43                             | 0,48            | 138,39                            | 0,48            | 295,69                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,34            | 20,24                             | 0,39            | 94,44                             | 0,36            | 284,69                            |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |



## Apêndice C

**Tabela C.13:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 40^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0010$ ;  $dp = 1,850 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

| $\Gamma = 0,00$ |                                   | $\Gamma = 0,50$ |                                   | $\Gamma = 1,00$ |                                   | $\Gamma = 1,50$ |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,42            | 1211,03                           | 1,44            | 1283,72                           | 1,44            | 1301,56                           | 1,45            | 1296,05                           |
| 1,37            | 1165,16                           | 1,41            | 1278,83                           | 1,40            | 1300,13                           | 1,40            | 1280,77                           |
| 1,33            | 1125,01                           | 1,36            | 1273,93                           | 1,37            | 1297,25                           | 1,37            | 1286,81                           |
| 1,28            | 1079,97                           | 1,32            | 1262,98                           | 1,32            | 1302,62                           | 1,32            | 1305,92                           |
| 1,23            | 1028,50                           | 1,28            | 1256,90                           | 1,27            | 1304,78                           | 1,28            | 1311,63                           |
| 1,20            | 994,11                            | 1,23            | 1262,97                           | 1,24            | 1303,58                           | 1,24            | 1310,65                           |
| 1,15            | 968,17                            | 1,20            | 1260,78                           | 1,20            | 1288,53                           | 1,18            | 1297,45                           |
| 1,10            | 901,75                            | 1,15            | 1256,72                           | 1,15            | 1302,69                           | 1,14            | 1302,40                           |
| 1,04            | 843,71                            | 1,11            | 1227,15                           | 1,10            | 1269,66                           | 1,11            | 1293,49                           |
| 0,98            | 803,49                            | 1,05            | 1188,08                           | 1,05            | 1192,60                           | 1,05            | 1228,95                           |
| 0,93            | 725,06                            | 0,99            | 1199,99                           | 1,01            | 1133,62                           | 0,99            | 1165,84                           |
| 0,88            | 670,92                            | 0,94            | 1193,90                           | 0,95            | 1118,32                           | 0,94            | 1023,08                           |
| 0,81            | 613,71                            | 0,89            | 1152,16                           | 0,89            | 1068,14                           | 0,89            | 1011,70                           |
| 0,74            | 536,05                            | 0,82            | 1115,51                           | 0,82            | 965,69                            | 0,82            | 971,88                            |
| 0,67            | 476,35                            | 0,75            | 1018,01                           | 0,75            | 843,23                            | 0,74            | 820,96                            |
| 0,59            | 390,83                            | 0,67            | 886,21                            | 0,67            | 816,40                            | 0,66            | 705,99                            |
| 0,48            | 297,86                            | 0,59            | 723,94                            | 0,59            | 757,12                            | 0,57            | 627,20                            |
| 0,33            | 181,51                            | 0,49            | 527,37                            | 0,48            | 570,23                            | 0,49            | 479,21                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,34            | 324,47                            | 0,34            | 341,25                            | 0,33            | 284,66                            |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,42            | 33,86                             | 1,44            | 153,34                            | 1,44            | 169,44                            | 1,45            | 223,79                            |
| 1,37            | 35,97                             | 1,41            | 143,19                            | 1,40            | 168,81                            | 1,40            | 233,65                            |
| 1,33            | 33,27                             | 1,36            | 141,07                            | 1,37            | 160,96                            | 1,37            | 212,73                            |
| 1,28            | 31,76                             | 1,32            | 128,71                            | 1,32            | 157,45                            | 1,32            | 227,50                            |
| 1,23            | 26,46                             | 1,28            | 122,30                            | 1,27            | 158,73                            | 1,28            | 227,86                            |
| 1,20            | 28,10                             | 1,23            | 116,40                            | 1,24            | 156,96                            | 1,24            | 228,40                            |
| 1,15            | 29,95                             | 1,20            | 111,29                            | 1,20            | 158,99                            | 1,18            | 228,81                            |
| 1,10            | 23,98                             | 1,15            | 111,70                            | 1,15            | 154,67                            | 1,14            | 235,62                            |
| 1,04            | 20,51                             | 1,11            | 111,08                            | 1,10            | 150,96                            | 1,11            | 239,28                            |
| 0,98            | 20,22                             | 1,05            | 113,33                            | 1,05            | 152,82                            | 1,05            | 233,86                            |
| 0,93            | 16,59                             | 0,99            | 109,31                            | 1,01            | 153,25                            | 0,99            | 236,55                            |
| 0,88            | 16,60                             | 0,94            | 99,37                             | 0,95            | 150,95                            | 0,94            | 223,83                            |
| 0,81            | 14,27                             | 0,89            | 83,75                             | 0,89            | 176,62                            | 0,89            | 237,52                            |
| 0,74            | 13,94                             | 0,82            | 77,91                             | 0,82            | 186,23                            | 0,82            | 226,94                            |
| 0,67            | 11,02                             | 0,75            | 53,90                             | 0,75            | 183,27                            | 0,74            | 248,75                            |
| 0,59            | 11,73                             | 0,67            | 36,77                             | 0,67            | 160,03                            | 0,66            | 251,31                            |
| 0,48            | 10,12                             | 0,59            | 23,14                             | 0,59            | 114,18                            | 0,57            | 276,46                            |
| 0,33            | 7,23                              | 0,49            | 18,87                             | 0,48            | 68,65                             | 0,49            | 284,53                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,34            | 14,75                             | 0,34            | 14,33                             | 0,33            | 237,41                            |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |



## Apêndice C

**Tabela C.15:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 50^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0000$ ;  $dp = 1,095 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

| $\Gamma = 0,00$ |                                   | $\Gamma = 0,50$ |                                   | $\Gamma = 1,00$ |                                   | $\Gamma = 1,50$ |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,40            | 1304,66                           | 1,42            | 1329,64                           | 1,43            | 1446,77                           | 1,42            | 1400,72                           |
| 1,37            | 1293,38                           | 1,40            | 1347,59                           | 1,40            | 1460,97                           | 1,41            | 1385,97                           |
| 1,33            | 1288,27                           | 1,37            | 1309,06                           | 1,37            | 1448,02                           | 1,37            | 1394,44                           |
| 1,28            | 1305,10                           | 1,33            | 1307,07                           | 1,32            | 1405,77                           | 1,33            | 1367,22                           |
| 1,24            | 1285,22                           | 1,29            | 1306,88                           | 1,27            | 1422,01                           | 1,29            | 1378,17                           |
| 1,19            | 1293,38                           | 1,23            | 1319,56                           | 1,24            | 1397,35                           | 1,29            | 1378,46                           |
| 1,14            | 1312,14                           | 1,20            | 1323,88                           | 1,20            | 1401,82                           | 1,23            | 1390,03                           |
| 1,10            | 1302,94                           | 1,15            | 1296,26                           | 1,15            | 1411,23                           | 1,20            | 1375,30                           |
| 1,05            | 1304,94                           | 1,11            | 1314,44                           | 1,10            | 1383,51                           | 1,15            | 1360,38                           |
| 0,99            | 1305,00                           | 1,06            | 1306,06                           | 1,05            | 1410,60                           | 1,11            | 1367,97                           |
| 0,93            | 1301,12                           | 1,01            | 1300,44                           | 1,00            | 1375,42                           | 1,05            | 1362,98                           |
| 0,87            | 1307,68                           | 0,94            | 1301,34                           | 0,94            | 1382,29                           | 0,99            | 1366,82                           |
| 0,81            | 1316,92                           | 0,89            | 1313,58                           | 0,88            | 1346,67                           | 0,94            | 1346,61                           |
| 0,74            | 1303,19                           | 0,82            | 1286,77                           | 0,81            | 1338,01                           | 0,86            | 1348,63                           |
| 0,66            | 1312,70                           | 0,76            | 1270,22                           | 0,74            | 1353,10                           | 0,80            | 1349,23                           |
| 0,58            | 1326,20                           | 0,67            | 1288,70                           | 0,65            | 1373,15                           | 0,73            | 1328,47                           |
| 0,50            | 1182,11                           | 0,58            | 1244,02                           | 0,57            | 1331,48                           | 0,65            | 1343,21                           |
| 0,34            | 714,36                            | 0,47            | 1100,34                           | 0,46            | 1106,67                           | 0,57            | 1274,84                           |
| 0,00            | 0,00                              | 0,37            | 968,48                            | 0,33            | 808,45                            | 0,46            | 1018,38                           |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,40            | 270,41                            | 1,42            | 362,41                            | 1,43            | 343,20                            | 1,42            | 352,96                            |
| 1,37            | 252,77                            | 1,40            | 345,96                            | 1,40            | 426,44                            | 1,41            | 486,09                            |
| 1,33            | 240,86                            | 1,37            | 328,65                            | 1,37            | 317,76                            | 1,37            | 360,26                            |
| 1,28            | 190,72                            | 1,33            | 351,19                            | 1,32            | 436,22                            | 1,33            | 408,10                            |
| 1,24            | 268,91                            | 1,29            | 349,31                            | 1,27            | 338,02                            | 1,29            | 392,77                            |
| 1,19            | 195,93                            | 1,23            | 273,73                            | 1,24            | 403,23                            | 1,29            | 432,63                            |
| 1,14            | 222,15                            | 1,20            | 272,65                            | 1,20            | 376,34                            | 1,23            | 404,48                            |
| 1,10            | 233,01                            | 1,15            | 325,08                            | 1,15            | 283,13                            | 1,20            | 343,56                            |
| 1,05            | 201,93                            | 1,11            | 271,60                            | 1,10            | 296,53                            | 1,15            | 385,77                            |
| 0,99            | 195,92                            | 1,06            | 214,22                            | 1,05            | 296,75                            | 1,11            | 353,06                            |
| 0,93            | 140,89                            | 1,01            | 282,55                            | 1,00            | 308,31                            | 1,05            | 369,39                            |
| 0,87            | 139,07                            | 0,94            | 238,54                            | 0,94            | 284,82                            | 0,99            | 368,78                            |
| 0,81            | 81,64                             | 0,89            | 235,81                            | 0,88            | 253,00                            | 0,94            | 352,67                            |
| 0,74            | 91,77                             | 0,82            | 207,49                            | 0,81            | 263,10                            | 0,86            | 347,37                            |
| 0,66            | 82,44                             | 0,76            | 180,21                            | 0,74            | 234,30                            | 0,80            | 349,95                            |
| 0,58            | 25,18                             | 0,67            | 121,47                            | 0,65            | 221,17                            | 0,73            | 316,15                            |
| 0,50            | 19,13                             | 0,58            | 106,16                            | 0,57            | 207,01                            | 0,65            | 337,86                            |
| 0,34            | 16,30                             | 0,47            | 92,00                             | 0,46            | 214,34                            | 0,57            | 347,06                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,37            | 72,89                             | 0,33            | 237,07                            | 0,46            | 324,54                            |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |

## Apêndice C

**Tabela C.16:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 50^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0005$ ;  $dp = 1,095 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

| $\Gamma = 0,00$ |                                   | $\Gamma = 0,50$ |                                   | $\Gamma = 1,00$ |                                   | $\Gamma = 1,50$ |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,42            | 1371,10                           | 1,43            | 1387,13                           | 1,43            | 1358,25                           | 1,43            | 1385,29                           |
| 1,37            | 1362,39                           | 1,40            | 1380,90                           | 1,40            | 1382,49                           | 1,40            | 1348,42                           |
| 1,32            | 1339,13                           | 1,37            | 1372,20                           | 1,37            | 1339,00                           | 1,37            | 1354,47                           |
| 1,28            | 1339,33                           | 1,33            | 1339,17                           | 1,32            | 1372,56                           | 1,32            | 1358,36                           |
| 1,24            | 1350,08                           | 1,29            | 1372,83                           | 1,29            | 1325,41                           | 1,29            | 1341,49                           |
| 1,20            | 1335,86                           | 1,24            | 1343,23                           | 1,23            | 1338,82                           | 1,25            | 1341,82                           |
| 1,15            | 1346,12                           | 1,19            | 1330,75                           | 1,19            | 1325,36                           | 1,20            | 1332,82                           |
| 1,10            | 1336,06                           | 1,15            | 1312,62                           | 1,15            | 1350,24                           | 1,15            | 1325,40                           |
| 1,06            | 1340,91                           | 1,11            | 1319,14                           | 1,10            | 1317,31                           | 1,11            | 1315,12                           |
| 1,00            | 1349,22                           | 1,05            | 1312,48                           | 1,05            | 1326,76                           | 1,06            | 1325,69                           |
| 0,94            | 1328,36                           | 1,00            | 1321,87                           | 0,99            | 1312,12                           | 1,00            | 1306,84                           |
| 0,89            | 1321,38                           | 0,95            | 1313,31                           | 0,95            | 1315,96                           | 0,94            | 1263,62                           |
| 0,82            | 1313,91                           | 0,89            | 1308,30                           | 0,88            | 1281,41                           | 0,88            | 1271,46                           |
| 0,74            | 1251,44                           | 0,82            | 1303,08                           | 0,83            | 1288,48                           | 0,83            | 1267,94                           |
| 0,67            | 1151,81                           | 0,75            | 1281,07                           | 0,76            | 1285,01                           | 0,75            | 1267,03                           |
| 0,58            | 975,15                            | 0,68            | 1294,27                           | 0,68            | 1295,80                           | 0,70            | 1266,60                           |
| 0,49            | 767,91                            | 0,57            | 1262,00                           | 0,57            | 1246,35                           | 0,60            | 1282,94                           |
| 0,37            | 544,17                            | 0,48            | 1098,81                           | 0,46            | 1083,54                           | 0,48            | 1110,82                           |
| 0,00            | 0,00                              | 0,37            | 904,22                            | 0,40            | 960,87                            | 0,35            | 882,61                            |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,42            | 260,44                            | 1,43            | 251,27                            | 1,43            | 375,95                            | 1,43            | 318,96                            |
| 1,37            | 190,72                            | 1,40            | 282,89                            | 1,40            | 362,50                            | 1,40            | 387,23                            |
| 1,32            | 265,46                            | 1,37            | 347,88                            | 1,37            | 357,46                            | 1,37            | 337,70                            |
| 1,28            | 220,52                            | 1,33            | 345,90                            | 1,32            | 278,26                            | 1,32            | 400,00                            |
| 1,24            | 197,80                            | 1,29            | 316,17                            | 1,29            | 399,69                            | 1,29            | 358,39                            |
| 1,20            | 252,54                            | 1,24            | 340,61                            | 1,23            | 351,33                            | 1,25            | 310,14                            |
| 1,15            | 174,75                            | 1,19            | 290,63                            | 1,19            | 343,80                            | 1,20            | 355,17                            |
| 1,10            | 169,51                            | 1,15            | 340,84                            | 1,15            | 326,13                            | 1,15            | 350,87                            |
| 1,06            | 233,01                            | 1,11            | 236,54                            | 1,10            | 308,83                            | 1,11            | 347,64                            |
| 1,00            | 172,48                            | 1,05            | 315,94                            | 1,05            | 286,47                            | 1,06            | 379,58                            |
| 0,94            | 93,22                             | 1,00            | 256,12                            | 0,99            | 290,42                            | 1,00            | 371,81                            |
| 0,89            | 116,79                            | 0,95            | 247,81                            | 0,95            | 265,93                            | 0,94            | 339,08                            |
| 0,82            | 60,53                             | 0,89            | 229,96                            | 0,88            | 284,92                            | 0,88            | 313,70                            |
| 0,74            | 25,62                             | 0,82            | 192,98                            | 0,83            | 258,06                            | 0,83            | 332,46                            |
| 0,67            | 15,72                             | 0,75            | 140,15                            | 0,76            | 215,62                            | 0,75            | 326,28                            |
| 0,58            | 15,78                             | 0,68            | 122,79                            | 0,68            | 193,27                            | 0,70            | 306,12                            |
| 0,49            | 15,85                             | 0,57            | 121,00                            | 0,57            | 193,59                            | 0,60            | 309,72                            |
| 0,37            | 13,42                             | 0,48            | 117,05                            | 0,46            | 182,46                            | 0,48            | 323,54                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,37            | 77,73                             | 0,40            | 232,73                            | 0,35            | 391,54                            |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |

## Apêndice C

**Tabela C.17:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 50^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0010$ ;  $dp = 1,095 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

| $\Gamma = 0,00$ |                                   | $\Gamma = 0,50$ |                                   | $\Gamma = 1,00$ |                                   | $\Gamma = 1,50$ |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,41            | 1314,93                           | 1,43            | 1342,50                           | 1,43            | 1323,59                           | 1,43            | 1341,14                           |
| 1,36            | 1284,30                           | 1,36            | 1324,70                           | 1,41            | 1327,36                           | 1,41            | 1345,22                           |
| 1,32            | 1291,10                           | 1,32            | 1332,66                           | 1,38            | 1349,10                           | 1,37            | 1321,75                           |
| 1,28            | 1274,58                           | 1,28            | 1330,25                           | 1,33            | 1331,67                           | 1,33            | 1321,95                           |
| 1,23            | 1265,40                           | 1,24            | 1319,25                           | 1,29            | 1305,99                           | 1,29            | 1306,53                           |
| 1,19            | 1270,67                           | 1,19            | 1315,23                           | 1,24            | 1319,53                           | 1,24            | 1334,65                           |
| 1,14            | 1252,01                           | 1,16            | 1334,66                           | 1,20            | 1310,35                           | 1,20            | 1315,83                           |
| 1,10            | 1239,20                           | 1,10            | 1293,47                           | 1,15            | 1305,61                           | 1,14            | 1322,99                           |
| 1,05            | 1230,30                           | 1,05            | 1305,74                           | 1,11            | 1316,41                           | 1,11            | 1311,49                           |
| 0,99            | 1227,07                           | 1,00            | 1317,13                           | 1,05            | 1317,07                           | 1,05            | 1282,08                           |
| 0,94            | 1176,58                           | 0,94            | 1301,24                           | 1,00            | 1294,04                           | 1,00            | 1290,31                           |
| 0,86            | 1122,06                           | 0,88            | 1288,92                           | 0,94            | 1299,52                           | 0,94            | 1304,75                           |
| 0,81            | 1044,51                           | 0,82            | 1296,08                           | 0,89            | 1302,49                           | 0,88            | 1295,78                           |
| 0,73            | 949,49                            | 0,76            | 1271,17                           | 0,83            | 1298,49                           | 0,83            | 1308,96                           |
| 0,65            | 854,79                            | 0,67            | 1280,85                           | 0,76            | 1295,35                           | 0,76            | 1299,47                           |
| 0,57            | 740,56                            | 0,57            | 1210,38                           | 0,67            | 1302,84                           | 0,67            | 1298,58                           |
| 0,47            | 584,43                            | 0,46            | 1090,08                           | 0,59            | 1174,11                           | 0,59            | 1280,33                           |
| 0,36            | 417,61                            | 0,33            | 736,57                            | 0,49            | 1061,08                           | 0,48            | 993,51                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,33            | 725,62                            | 0,35            | 699,08                            |
|                 |                                   |                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,41            | 186,06                            | 1,43            | 341,60                            | 1,43            | 359,52                            | 1,43            | 329,09                            |
| 1,36            | 162,16                            | 1,36            | 342,04                            | 1,41            | 337,62                            | 1,41            | 347,87                            |
| 1,32            | 168,55                            | 1,32            | 334,84                            | 1,38            | 284,91                            | 1,37            | 324,44                            |
| 1,28            | 139,94                            | 1,28            | 339,70                            | 1,33            | 301,84                            | 1,33            | 328,62                            |
| 1,23            | 211,69                            | 1,24            | 215,46                            | 1,29            | 271,78                            | 1,29            | 334,86                            |
| 1,19            | 109,02                            | 1,19            | 286,27                            | 1,24            | 305,05                            | 1,24            | 347,75                            |
| 1,14            | 94,32                             | 1,16            | 255,52                            | 1,20            | 296,94                            | 1,20            | 329,25                            |
| 1,10            | 63,25                             | 1,10            | 256,56                            | 1,15            | 269,04                            | 1,14            | 296,28                            |
| 1,05            | 58,77                             | 1,05            | 255,46                            | 1,11            | 222,63                            | 1,11            | 308,69                            |
| 0,99            | 39,66                             | 1,00            | 177,23                            | 1,05            | 232,86                            | 1,05            | 291,22                            |
| 0,94            | 30,41                             | 0,94            | 239,66                            | 1,00            | 249,24                            | 1,00            | 306,13                            |
| 0,86            | 27,66                             | 0,88            | 169,29                            | 0,94            | 215,99                            | 0,94            | 270,67                            |
| 0,81            | 18,03                             | 0,82            | 138,00                            | 0,89            | 188,68                            | 0,88            | 284,97                            |
| 0,73            | 18,53                             | 0,76            | 106,62                            | 0,83            | 207,61                            | 0,83            | 285,38                            |
| 0,65            | 18,08                             | 0,67            | 106,40                            | 0,76            | 190,61                            | 0,76            | 287,00                            |
| 0,57            | 14,86                             | 0,57            | 106,20                            | 0,67            | 186,71                            | 0,67            | 306,07                            |
| 0,47            | 18,22                             | 0,46            | 80,40                             | 0,59            | 191,80                            | 0,59            | 328,45                            |
| 0,36            | 10,91                             | 0,33            | 17,39                             | 0,49            | 214,85                            | 0,48            | 313,30                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,33            | 203,86                            | 0,35            | 376,61                            |
|                 |                                   |                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |

## Apêndice C

**Tabela C.18:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 50^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0020$ ;  $dp = 1,095 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

| $\Gamma = 0,00$ |                                  | $\Gamma = 0,50$ |                                  | $\Gamma = 1,00$ |                                  | $\Gamma = 1,50$ |                                  |
|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>( $\text{N/m}^2$ ) |
| 1,41            | 1290,39                          | 1,42            | 1342,37                          | 1,42            | 1395,26                          | 1,42            | 1456,10                          |
| 1,37            | 1283,07                          | 1,40            | 1370,74                          | 1,37            | 1398,18                          | 1,37            | 1426,90                          |
| 1,33            | 1283,02                          | 1,37            | 1368,70                          | 1,34            | 1392,24                          | 1,33            | 1411,08                          |
| 1,29            | 1271,30                          | 1,33            | 1360,84                          | 1,28            | 1386,88                          | 1,29            | 1399,32                          |
| 1,25            | 1252,30                          | 1,29            | 1354,43                          | 1,24            | 1371,57                          | 1,24            | 1374,36                          |
| 1,19            | 1233,38                          | 1,24            | 1350,58                          | 1,19            | 1362,17                          | 1,20            | 1373,82                          |
| 1,16            | 1259,93                          | 1,20            | 1332,67                          | 1,16            | 1369,90                          | 1,15            | 1382,77                          |
| 1,11            | 1238,86                          | 1,16            | 1362,42                          | 1,11            | 1366,74                          | 1,11            | 1355,25                          |
| 1,06            | 1164,13                          | 1,11            | 1343,99                          | 1,06            | 1349,43                          | 1,06            | 1347,45                          |
| 1,01            | 1111,00                          | 1,05            | 1336,66                          | 1,00            | 1341,43                          | 1,01            | 1336,71                          |
| 0,94            | 1079,33                          | 1,00            | 1350,11                          | 0,94            | 1352,46                          | 0,94            | 1313,04                          |
| 0,89            | 1012,60                          | 0,96            | 1343,37                          | 0,88            | 1347,83                          | 0,89            | 1320,90                          |
| 0,82            | 953,60                           | 0,89            | 1331,69                          | 0,84            | 1355,58                          | 0,83            | 1348,09                          |
| 0,74            | 867,05                           | 0,83            | 1331,35                          | 0,75            | 1325,06                          | 0,76            | 1321,33                          |
| 0,68            | 802,69                           | 0,76            | 1298,17                          | 0,68            | 1303,51                          | 0,68            | 1317,96                          |
| 0,59            | 692,25                           | 0,68            | 1269,74                          | 0,59            | 1209,16                          | 0,60            | 1251,23                          |
| 0,49            | 546,17                           | 0,59            | 1229,40                          | 0,49            | 1045,54                          | 0,49            | 1024,79                          |
| 0,37            | 401,08                           | 0,48            | 1049,30                          | 0,36            | 839,03                           | 0,39            | 850,23                           |
| 0,00            | 0,00                             | 0,37            | 746,28                           | 0,00            | 0,00                             | 0,00            | 0,00                             |
|                 |                                  | 0,00            | 0,00                             |                 |                                  |                 |                                  |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>( $\text{N/m}^2$ ) |
| 1,41            | 106,30                           | 1,42            | 280,85                           | 1,42            | 326,91                           | 1,42            | 282,81                           |
| 1,37            | 81,15                            | 1,40            | 219,61                           | 1,37            | 275,15                           | 1,37            | 356,74                           |
| 1,33            | 67,10                            | 1,37            | 264,73                           | 1,34            | 233,14                           | 1,33            | 288,62                           |
| 1,29            | 52,33                            | 1,33            | 187,66                           | 1,28            | 243,22                           | 1,29            | 316,44                           |
| 1,25            | 44,45                            | 1,29            | 250,79                           | 1,24            | 229,02                           | 1,24            | 305,33                           |
| 1,19            | 40,28                            | 1,24            | 245,37                           | 1,19            | 260,15                           | 1,20            | 295,72                           |
| 1,16            | 39,71                            | 1,20            | 231,37                           | 1,16            | 225,85                           | 1,15            | 275,00                           |
| 1,11            | 22,68                            | 1,16            | 195,13                           | 1,11            | 184,90                           | 1,11            | 259,32                           |
| 1,06            | 21,55                            | 1,11            | 199,55                           | 1,06            | 198,76                           | 1,06            | 248,29                           |
| 1,01            | 21,10                            | 1,05            | 104,70                           | 1,00            | 225,56                           | 1,01            | 228,97                           |
| 0,94            | 16,72                            | 1,00            | 116,32                           | 0,94            | 159,21                           | 0,94            | 233,35                           |
| 0,89            | 16,51                            | 0,96            | 89,00                            | 0,88            | 152,20                           | 0,89            | 226,41                           |
| 0,82            | 14,84                            | 0,89            | 94,40                            | 0,84            | 157,89                           | 0,83            | 241,16                           |
| 0,74            | 13,86                            | 0,83            | 97,46                            | 0,75            | 162,42                           | 0,76            | 261,62                           |
| 0,68            | 13,26                            | 0,76            | 101,51                           | 0,68            | 169,90                           | 0,68            | 286,70                           |
| 0,59            | 12,58                            | 0,68            | 105,52                           | 0,59            | 187,36                           | 0,60            | 285,67                           |
| 0,49            | 13,00                            | 0,59            | 101,76                           | 0,49            | 223,85                           | 0,49            | 311,78                           |
| 0,37            | 10,64                            | 0,48            | 66,78                            | 0,36            | 156,30                           | 0,39            | 384,88                           |
| 0,00            | 0,00                             | 0,37            | 16,69                            | 0,00            | 0,00                             | 0,00            | 0,00                             |
|                 |                                  | 0,00            | 0,00                             |                 |                                  |                 |                                  |

## Apêndice C

**Tabela C.19:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 50^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0030$ ;  $dp = 1,095 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

| $\Gamma = 0,00$ |                                  | $\Gamma = 0,50$ |                                  | $\Gamma = 1,00$ |                                  | $\Gamma = 1,50$ |                                  |
|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>( $\text{N/m}^2$ ) |
| 1,42            | 1289,37                          | 1,43            | 1397,13                          | 1,42            | 1400,30                          | 1,42            | 1427,11                          |
| 1,36            | 1266,60                          | 1,40            | 1392,57                          | 1,41            | 1433,59                          | 1,37            | 1432,30                          |
| 1,32            | 1271,90                          | 1,37            | 1406,84                          | 1,37            | 1402,13                          | 1,33            | 1401,54                          |
| 1,27            | 1249,64                          | 1,33            | 1389,79                          | 1,33            | 1407,31                          | 1,29            | 1401,45                          |
| 1,23            | 1247,17                          | 1,28            | 1368,85                          | 1,28            | 1412,85                          | 1,24            | 1388,93                          |
| 1,20            | 1235,16                          | 1,24            | 1368,43                          | 1,24            | 1395,51                          | 1,19            | 1360,67                          |
| 1,15            | 1248,17                          | 1,20            | 1360,32                          | 1,20            | 1370,90                          | 1,15            | 1393,35                          |
| 1,09            | 1224,99                          | 1,15            | 1387,22                          | 1,15            | 1385,73                          | 1,10            | 1360,38                          |
| 1,05            | 1148,99                          | 1,10            | 1367,32                          | 1,10            | 1380,12                          | 1,06            | 1357,33                          |
| 0,99            | 1109,50                          | 1,05            | 1374,74                          | 1,06            | 1356,54                          | 0,99            | 1384,29                          |
| 0,95            | 1075,21                          | 1,00            | 1377,86                          | 1,00            | 1381,36                          | 0,95            | 1374,98                          |
| 0,87            | 1001,00                          | 0,95            | 1365,62                          | 0,94            | 1370,83                          | 0,89            | 1363,91                          |
| 0,80            | 924,17                           | 0,88            | 1357,46                          | 0,88            | 1359,74                          | 0,82            | 1363,11                          |
| 0,74            | 842,51                           | 0,83            | 1357,01                          | 0,84            | 1367,33                          | 0,75            | 1338,77                          |
| 0,66            | 769,61                           | 0,75            | 1329,14                          | 0,75            | 1339,07                          | 0,68            | 1332,23                          |
| 0,57            | 652,09                           | 0,68            | 1338,35                          | 0,68            | 1327,96                          | 0,58            | 1229,19                          |
| 0,48            | 513,52                           | 0,59            | 1278,39                          | 0,59            | 1243,04                          | 0,46            | 1018,34                          |
| 0,32            | 308,40                           | 0,48            | 1069,59                          | 0,48            | 1066,42                          | 0,37            | 797,31                           |
| 0,00            | 0,00                             | 0,35            | 701,95                           | 0,34            | 807,44                           | 0,00            | 0,00                             |
|                 |                                  | 0,00            | 0,00                             | 0,00            | 0,00                             |                 |                                  |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>( $\text{N/m}^2$ ) |
| 1,42            | 70,63                            | 1,43            | 260,41                           | 1,42            | 356,14                           | 1,42            | 286,99                           |
| 1,36            | 48,80                            | 1,40            | 223,45                           | 1,41            | 331,15                           | 1,37            | 268,21                           |
| 1,32            | 53,86                            | 1,37            | 258,38                           | 1,37            | 285,42                           | 1,33            | 247,43                           |
| 1,27            | 47,80                            | 1,33            | 241,55                           | 1,33            | 248,92                           | 1,29            | 260,81                           |
| 1,23            | 45,50                            | 1,28            | 224,24                           | 1,28            | 250,14                           | 1,24            | 250,63                           |
| 1,20            | 44,46                            | 1,24            | 175,13                           | 1,24            | 245,86                           | 1,19            | 233,05                           |
| 1,15            | 46,18                            | 1,20            | 192,09                           | 1,20            | 183,53                           | 1,15            | 239,25                           |
| 1,09            | 25,58                            | 1,15            | 169,84                           | 1,15            | 177,73                           | 1,10            | 218,01                           |
| 1,05            | 21,54                            | 1,10            | 134,18                           | 1,10            | 191,68                           | 1,06            | 227,12                           |
| 0,99            | 18,61                            | 1,05            | 123,13                           | 1,06            | 173,00                           | 0,99            | 213,93                           |
| 0,95            | 20,74                            | 1,00            | 88,42                            | 1,00            | 188,43                           | 0,95            | 226,09                           |
| 0,87            | 16,87                            | 0,95            | 92,18                            | 0,94            | 148,26                           | 0,89            | 221,27                           |
| 0,80            | 13,17                            | 0,88            | 94,99                            | 0,88            | 157,23                           | 0,82            | 247,25                           |
| 0,74            | 13,80                            | 0,83            | 96,15                            | 0,84            | 159,37                           | 0,75            | 263,95                           |
| 0,66            | 12,30                            | 0,75            | 100,70                           | 0,75            | 171,40                           | 0,68            | 272,71                           |
| 0,57            | 14,02                            | 0,68            | 108,10                           | 0,68            | 183,84                           | 0,58            | 287,59                           |
| 0,48            | 10,43                            | 0,59            | 100,70                           | 0,59            | 200,90                           | 0,46            | 331,25                           |
| 0,32            | 7,79                             | 0,48            | 66,91                            | 0,48            | 233,50                           | 0,37            | 372,22                           |
| 0,00            | 0,00                             | 0,35            | 13,73                            | 0,34            | 142,29                           | 0,00            | 0,00                             |
|                 |                                  | 0,00            | 0,00                             | 0,00            | 0,00                             |                 |                                  |

## Apêndice C

**Tabela C.20:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 50^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0040$ ;  $dp = 1,095 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

| $\Gamma = 0,00$ |                                   | $\Gamma = 0,50$ |                                   | $\Gamma = 1,00$ |                                   | $\Gamma = 1,50$ |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,42            | 1264,76                           | 1,44            | 1361,34                           | 1,43            | 1356,22                           | 1,43            | 1398,56                           |
| 1,37            | 1269,13                           | 1,41            | 1346,04                           | 1,40            | 1378,11                           | 1,40            | 1401,86                           |
| 1,32            | 1266,27                           | 1,36            | 1367,42                           | 1,37            | 1379,35                           | 1,36            | 1365,79                           |
| 1,28            | 1237,67                           | 1,32            | 1359,62                           | 1,33            | 1357,78                           | 1,32            | 1379,94                           |
| 1,24            | 1237,18                           | 1,27            | 1332,34                           | 1,29            | 1356,27                           | 1,28            | 1368,18                           |
| 1,20            | 1174,38                           | 1,24            | 1342,54                           | 1,24            | 1340,15                           | 1,24            | 1370,18                           |
| 1,15            | 1157,00                           | 1,19            | 1342,88                           | 1,19            | 1330,76                           | 1,19            | 1364,61                           |
| 1,10            | 1123,14                           | 1,14            | 1348,37                           | 1,15            | 1365,77                           | 1,15            | 1351,89                           |
| 1,06            | 1091,49                           | 1,11            | 1348,03                           | 1,10            | 1353,20                           | 1,10            | 1366,79                           |
| 0,99            | 1060,37                           | 1,06            | 1351,16                           | 1,05            | 1346,97                           | 1,06            | 1359,81                           |
| 0,93            | 1002,81                           | 1,00            | 1359,67                           | 1,00            | 1366,16                           | 1,01            | 1355,36                           |
| 0,87            | 954,99                            | 0,96            | 1345,89                           | 0,95            | 1350,73                           | 0,96            | 1360,86                           |
| 0,82            | 894,17                            | 0,89            | 1338,12                           | 0,88            | 1350,58                           | 0,88            | 1367,88                           |
| 0,74            | 809,53                            | 0,83            | 1340,66                           | 0,82            | 1352,49                           | 0,83            | 1366,52                           |
| 0,66            | 736,61                            | 0,75            | 1310,71                           | 0,74            | 1332,42                           | 0,75            | 1343,56                           |
| 0,59            | 658,21                            | 0,66            | 1326,25                           | 0,66            | 1289,06                           | 0,67            | 1274,15                           |
| 0,46            | 484,32                            | 0,58            | 1191,54                           | 0,58            | 1197,34                           | 0,59            | 1175,26                           |
| 0,34            | 334,86                            | 0,47            | 961,68                            | 0,48            | 1042,61                           | 0,46            | 943,90                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,33            | 608,77                            | 0,35            | 793,34                            | 0,34            | 634,22                            |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,42            | 70,01                             | 1,44            | 311,02                            | 1,43            | 320,78                            | 1,43            | 284,01                            |
| 1,37            | 65,24                             | 1,41            | 246,89                            | 1,40            | 316,57                            | 1,40            | 304,70                            |
| 1,32            | 48,22                             | 1,36            | 242,36                            | 1,37            | 331,50                            | 1,36            | 251,13                            |
| 1,28            | 46,98                             | 1,32            | 237,83                            | 1,33            | 254,21                            | 1,32            | 226,53                            |
| 1,24            | 27,85                             | 1,27            | 178,95                            | 1,29            | 266,74                            | 1,28            | 223,84                            |
| 1,20            | 29,27                             | 1,24            | 138,43                            | 1,24            | 205,94                            | 1,24            | 255,00                            |
| 1,15            | 25,27                             | 1,19            | 112,22                            | 1,19            | 214,83                            | 1,19            | 246,42                            |
| 1,10            | 25,60                             | 1,14            | 100,78                            | 1,15            | 191,60                            | 1,15            | 236,81                            |
| 1,06            | 23,35                             | 1,11            | 97,71                             | 1,10            | 143,01                            | 1,10            | 212,98                            |
| 0,99            | 20,41                             | 1,06            | 102,18                            | 1,05            | 143,04                            | 1,06            | 233,10                            |
| 0,93            | 19,13                             | 1,00            | 93,88                             | 1,00            | 150,19                            | 1,01            | 221,53                            |
| 0,87            | 17,69                             | 0,96            | 95,73                             | 0,95            | 152,24                            | 0,96            | 225,44                            |
| 0,82            | 15,84                             | 0,89            | 101,01                            | 0,88            | 162,96                            | 0,88            | 239,36                            |
| 0,74            | 14,32                             | 0,83            | 99,38                             | 0,82            | 168,00                            | 0,83            | 251,09                            |
| 0,66            | 13,06                             | 0,75            | 108,65                            | 0,74            | 173,38                            | 0,75            | 274,17                            |
| 0,59            | 11,40                             | 0,66            | 101,10                            | 0,66            | 186,77                            | 0,67            | 281,40                            |
| 0,46            | 8,81                              | 0,58            | 106,54                            | 0,58            | 206,94                            | 0,59            | 288,16                            |
| 0,34            | 7,95                              | 0,47            | 53,29                             | 0,48            | 215,77                            | 0,46            | 325,58                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,33            | 22,12                             | 0,35            | 144,86                            | 0,34            | 353,23                            |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |

## Apêndice C

**Tabela C.21:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 50^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0000$ ;  $dp = 1,545 \times 10^{-3}$  m.

| $\Gamma = 0,00$ |                                  | $\Gamma = 0,50$ |                                  | $\Gamma = 1,00$ |                                  | $\Gamma = 1,50$ |                                  |
|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>( $\text{N/m}^2$ ) |
| 1,41            | 1299,30                          | 1,44            | 1338,76                          | 1,43            | 1329,60                          | 1,45            | 1420,59                          |
| 1,36            | 1310,70                          | 1,40            | 1339,68                          | 1,40            | 1320,57                          | 1,40            | 1383,95                          |
| 1,32            | 1312,52                          | 1,37            | 1339,85                          | 1,36            | 1327,78                          | 1,36            | 1402,87                          |
| 1,28            | 1307,75                          | 1,32            | 1313,65                          | 1,32            | 1277,65                          | 1,32            | 1383,17                          |
| 1,23            | 1303,50                          | 1,28            | 1309,17                          | 1,28            | 1271,49                          | 1,28            | 1336,66                          |
| 1,19            | 1321,37                          | 1,24            | 1301,96                          | 1,24            | 1252,60                          | 1,23            | 1336,38                          |
| 1,14            | 1331,43                          | 1,20            | 1301,67                          | 1,20            | 1278,68                          | 1,19            | 1316,59                          |
| 1,09            | 1343,59                          | 1,15            | 1301,64                          | 1,15            | 1308,52                          | 1,15            | 1315,76                          |
| 1,04            | 1370,42                          | 1,10            | 1309,10                          | 1,10            | 1299,34                          | 1,10            | 1281,60                          |
| 0,98            | 1403,45                          | 1,05            | 1293,73                          | 1,05            | 1282,07                          | 1,05            | 1272,76                          |
| 0,93            | 1409,88                          | 1,00            | 1294,18                          | 0,99            | 1301,24                          | 0,99            | 1303,64                          |
| 0,87            | 1404,13                          | 0,94            | 1255,39                          | 0,94            | 1264,67                          | 0,94            | 1238,90                          |
| 0,80            | 1303,20                          | 0,88            | 1219,32                          | 0,88            | 1166,80                          | 0,87            | 1247,65                          |
| 0,73            | 1125,72                          | 0,81            | 1152,97                          | 0,81            | 1087,08                          | 0,82            | 1172,28                          |
| 0,66            | 980,22                           | 0,73            | 1079,23                          | 0,74            | 979,26                           | 0,74            | 1025,79                          |
| 0,57            | 801,89                           | 0,66            | 1041,96                          | 0,67            | 882,08                           | 0,67            | 968,87                           |
| 0,48            | 610,09                           | 0,56            | 906,42                           | 0,57            | 747,89                           | 0,57            | 835,38                           |
| 0,35            | 382,63                           | 0,47            | 757,81                           | 0,46            | 654,58                           | 0,47            | 630,78                           |
| 0,00            | 0,00                             | 0,35            | 515,69                           | 0,35            | 477,58                           | 0,33            | 405,75                           |
|                 |                                  | 0,00            | 0,00                             | 0,00            | 0,00                             | 0,00            | 0,00                             |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>( $\text{N/m}^2$ ) |
| 1,41            | 180,13                           | 1,44            | 257,92                           | 1,43            | 274,77                           | 1,45            | 323,52                           |
| 1,36            | 169,38                           | 1,40            | 256,61                           | 1,40            | 273,18                           | 1,40            | 303,54                           |
| 1,32            | 174,51                           | 1,37            | 249,92                           | 1,36            | 238,58                           | 1,36            | 310,81                           |
| 1,28            | 137,25                           | 1,32            | 243,47                           | 1,32            | 267,26                           | 1,32            | 300,17                           |
| 1,23            | 129,34                           | 1,28            | 185,00                           | 1,28            | 254,29                           | 1,28            | 315,68                           |
| 1,19            | 87,90                            | 1,24            | 191,37                           | 1,24            | 245,09                           | 1,23            | 289,27                           |
| 1,14            | 136,27                           | 1,20            | 179,22                           | 1,20            | 209,21                           | 1,19            | 284,77                           |
| 1,09            | 105,41                           | 1,15            | 155,58                           | 1,15            | 204,04                           | 1,15            | 265,48                           |
| 1,04            | 60,28                            | 1,10            | 141,72                           | 1,10            | 193,83                           | 1,10            | 271,06                           |
| 0,98            | 48,66                            | 1,05            | 135,94                           | 1,05            | 188,84                           | 1,05            | 260,95                           |
| 0,93            | 27,36                            | 1,00            | 125,53                           | 0,99            | 189,28                           | 0,99            | 247,96                           |
| 0,87            | 24,84                            | 0,94            | 115,74                           | 0,94            | 180,89                           | 0,94            | 251,22                           |
| 0,80            | 19,72                            | 0,88            | 110,35                           | 0,88            | 166,19                           | 0,87            | 252,49                           |
| 0,73            | 17,42                            | 0,81            | 104,26                           | 0,81            | 155,52                           | 0,82            | 238,49                           |
| 0,66            | 19,38                            | 0,73            | 97,91                            | 0,74            | 173,27                           | 0,74            | 220,41                           |
| 0,57            | 17,69                            | 0,66            | 74,34                            | 0,67            | 179,55                           | 0,67            | 230,01                           |
| 0,48            | 16,16                            | 0,56            | 53,25                            | 0,57            | 172,38                           | 0,57            | 278,47                           |
| 0,35            | 9,97                             | 0,47            | 34,61                            | 0,46            | 149,28                           | 0,47            | 295,46                           |
| 0,00            | 0,00                             | 0,35            | 17,17                            | 0,35            | 101,80                           | 0,33            | 310,98                           |
|                 |                                  | 0,00            | 0,00                             | 0,00            | 0,00                             | 0,00            | 0,00                             |

## Apêndice C

**Tabela C.22:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 50^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0005$ ;  $dp = 1,545 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

| $\Gamma = 0,00$ |                                   | $\Gamma = 0,50$ |                                   | $\Gamma = 1,00$ |                                   | $\Gamma = 1,50$ |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,41            | 1326,65                           | 1,42            | 1336,63                           | 1,43            | 1378,11                           | 1,43            | 1340,71                           |
| 1,37            | 1330,18                           | 1,37            | 1322,43                           | 1,40            | 1369,86                           | 1,40            | 1335,03                           |
| 1,32            | 1313,03                           | 1,32            | 1311,50                           | 1,37            | 1356,14                           | 1,37            | 1306,29                           |
| 1,29            | 1314,26                           | 1,29            | 1323,22                           | 1,33            | 1350,82                           | 1,32            | 1278,49                           |
| 1,24            | 1255,66                           | 1,24            | 1311,22                           | 1,28            | 1344,04                           | 1,28            | 1293,24                           |
| 1,20            | 1206,33                           | 1,19            | 1304,40                           | 1,24            | 1325,57                           | 1,24            | 1267,59                           |
| 1,15            | 1169,94                           | 1,15            | 1309,70                           | 1,19            | 1331,04                           | 1,19            | 1294,62                           |
| 1,09            | 1091,88                           | 1,10            | 1306,54                           | 1,15            | 1335,24                           | 1,16            | 1268,76                           |
| 1,05            | 1033,80                           | 1,05            | 1302,89                           | 1,11            | 1325,56                           | 1,10            | 1275,13                           |
| 0,99            | 982,38                            | 1,00            | 1283,98                           | 1,05            | 1293,61                           | 1,04            | 1237,76                           |
| 0,93            | 879,58                            | 0,95            | 1236,39                           | 0,99            | 1291,26                           | 1,00            | 1286,28                           |
| 0,87            | 795,07                            | 0,88            | 1154,99                           | 0,94            | 1147,40                           | 0,94            | 1187,87                           |
| 0,81            | 718,58                            | 0,81            | 1088,10                           | 0,88            | 1088,10                           | 0,88            | 1021,56                           |
| 0,74            | 616,50                            | 0,75            | 1035,47                           | 0,82            | 1070,03                           | 0,82            | 977,54                            |
| 0,66            | 533,30                            | 0,66            | 922,36                            | 0,74            | 939,97                            | 0,74            | 903,20                            |
| 0,66            | 531,00                            | 0,58            | 793,21                            | 0,67            | 851,08                            | 0,66            | 832,39                            |
| 0,57            | 433,82                            | 0,47            | 586,91                            | 0,58            | 716,78                            | 0,57            | 642,32                            |
| 0,48            | 338,64                            | 0,36            | 396,50                            | 0,47            | 597,42                            | 0,47            | 487,45                            |
| 0,36            | 227,85                            | 0,00            | 0,00                              | 0,35            | 421,19                            | 0,34            | 312,83                            |
| 0,00            | 0,00                              |                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,41            | 53,57                             | 1,42            | 184,05                            | 1,43            | 208,04                            | 1,43            | 274,20                            |
| 1,37            | 41,67                             | 1,37            | 164,66                            | 1,40            | 204,32                            | 1,40            | 286,54                            |
| 1,32            | 34,17                             | 1,32            | 175,24                            | 1,37            | 209,98                            | 1,37            | 274,16                            |
| 1,29            | 38,04                             | 1,29            | 140,04                            | 1,33            | 198,03                            | 1,32            | 269,19                            |
| 1,24            | 29,45                             | 1,24            | 139,31                            | 1,28            | 190,85                            | 1,28            | 255,16                            |
| 1,20            | 27,89                             | 1,19            | 137,08                            | 1,24            | 201,34                            | 1,24            | 249,57                            |
| 1,15            | 28,03                             | 1,15            | 136,08                            | 1,19            | 179,39                            | 1,19            | 239,41                            |
| 1,09            | 25,04                             | 1,10            | 131,46                            | 1,15            | 183,29                            | 1,16            | 253,30                            |
| 1,05            | 19,52                             | 1,05            | 132,64                            | 1,11            | 185,48                            | 1,10            | 251,68                            |
| 0,99            | 21,31                             | 1,00            | 129,22                            | 1,05            | 175,53                            | 1,04            | 250,01                            |
| 0,93            | 18,43                             | 0,95            | 125,18                            | 0,99            | 179,71                            | 1,00            | 254,97                            |
| 0,87            | 16,20                             | 0,88            | 102,10                            | 0,94            | 168,08                            | 0,94            | 241,00                            |
| 0,81            | 17,24                             | 0,81            | 96,53                             | 0,88            | 162,93                            | 0,88            | 226,86                            |
| 0,74            | 14,75                             | 0,75            | 74,62                             | 0,82            | 170,67                            | 0,82            | 228,57                            |
| 0,66            | 13,05                             | 0,66            | 68,09                             | 0,74            | 177,07                            | 0,74            | 236,36                            |
| 0,66            | 11,77                             | 0,58            | 38,89                             | 0,67            | 181,17                            | 0,66            | 260,18                            |
| 0,57            | 13,07                             | 0,47            | 20,33                             | 0,58            | 164,71                            | 0,57            | 247,74                            |
| 0,48            | 12,98                             | 0,36            | 12,06                             | 0,47            | 110,26                            | 0,47            | 262,51                            |
| 0,36            | 9,13                              | 0,00            | 0,00                              | 0,35            | 66,76                             | 0,34            | 256,11                            |
| 0,00            | 0,00                              |                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |

## Apêndice C

**Tabela C.23:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 50^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0010$ ;  $dp = 1,545 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

| $\Gamma = 0,00$ |                                  | $\Gamma = 0,50$ |                                  | $\Gamma = 1,00$ |                                  | $\Gamma = 1,50$ |                                  |
|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>( $\text{N/m}^2$ ) |
| 1,42            | 1352,38                          | 1,43            | 1349,42                          | 1,43            | 1351,01                          | 1,43            | 1368,58                          |
| 1,37            | 1320,31                          | 1,40            | 1337,99                          | 1,40            | 1340,12                          | 1,41            | 1354,74                          |
| 1,33            | 1290,88                          | 1,37            | 1336,57                          | 1,37            | 1343,65                          | 1,36            | 1347,60                          |
| 1,29            | 1265,16                          | 1,32            | 1321,35                          | 1,33            | 1323,43                          | 1,32            | 1347,08                          |
| 1,25            | 1234,37                          | 1,28            | 1321,52                          | 1,29            | 1332,67                          | 1,28            | 1348,29                          |
| 1,19            | 1149,53                          | 1,24            | 1297,00                          | 1,25            | 1320,89                          | 1,24            | 1339,44                          |
| 1,15            | 1124,23                          | 1,20            | 1306,53                          | 1,19            | 1339,24                          | 1,20            | 1317,53                          |
| 1,10            | 1064,38                          | 1,15            | 1307,05                          | 1,15            | 1348,82                          | 1,15            | 1346,34                          |
| 1,05            | 999,72                           | 1,10            | 1293,47                          | 1,11            | 1332,41                          | 1,11            | 1352,34                          |
| 0,98            | 944,74                           | 1,06            | 1263,31                          | 1,05            | 1299,85                          | 1,06            | 1338,10                          |
| 0,94            | 878,51                           | 0,99            | 1237,27                          | 1,00            | 1262,77                          | 1,00            | 1309,03                          |
| 0,88            | 796,57                           | 0,94            | 1202,54                          | 0,95            | 1140,65                          | 0,89            | 1072,33                          |
| 0,81            | 719,88                           | 0,88            | 1158,09                          | 0,88            | 1116,21                          | 0,81            | 979,77                           |
| 0,74            | 613,16                           | 0,82            | 1130,78                          | 0,82            | 1069,79                          | 0,74            | 923,66                           |
| 0,67            | 541,06                           | 0,74            | 1081,28                          | 0,74            | 920,00                           | 0,66            | 843,46                           |
| 0,58            | 444,99                           | 0,66            | 995,67                           | 0,67            | 826,82                           | 0,58            | 671,45                           |
| 0,50            | 357,75                           | 0,60            | 858,88                           | 0,57            | 716,08                           | 0,47            | 521,81                           |
| 0,38            | 246,21                           | 0,47            | 595,26                           | 0,47            | 619,45                           | 0,36            | 362,33                           |
| 0,00            | 0,00                             | 0,37            | 430,11                           | 0,36            | 433,00                           | 0,00            | 0,00                             |
|                 |                                  | 0,00            | 0,00                             | 0,00            | 0,00                             |                 |                                  |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>( $\text{N/m}^2$ ) |
| 1,42            | 50,03                            | 1,43            | 166,14                           | 1,43            | 175,29                           | 1,43            | 256,67                           |
| 1,37            | 41,94                            | 1,40            | 184,76                           | 1,40            | 221,13                           | 1,41            | 253,08                           |
| 1,33            | 38,25                            | 1,37            | 168,09                           | 1,37            | 194,00                           | 1,36            | 236,93                           |
| 1,29            | 35,59                            | 1,32            | 159,46                           | 1,33            | 182,57                           | 1,32            | 238,05                           |
| 1,25            | 27,32                            | 1,28            | 132,63                           | 1,29            | 157,83                           | 1,28            | 229,63                           |
| 1,19            | 30,88                            | 1,24            | 133,91                           | 1,25            | 171,05                           | 1,24            | 230,23                           |
| 1,15            | 29,64                            | 1,20            | 120,45                           | 1,19            | 170,57                           | 1,20            | 227,03                           |
| 1,10            | 26,28                            | 1,15            | 113,13                           | 1,15            | 168,35                           | 1,15            | 237,65                           |
| 1,05            | 24,78                            | 1,10            | 111,97                           | 1,11            | 171,20                           | 1,11            | 241,28                           |
| 0,98            | 21,12                            | 1,06            | 109,25                           | 1,05            | 166,50                           | 1,06            | 248,20                           |
| 0,94            | 22,55                            | 0,99            | 112,34                           | 1,00            | 163,68                           | 1,00            | 245,32                           |
| 0,88            | 15,59                            | 0,94            | 111,12                           | 0,95            | 155,48                           | 0,89            | 234,65                           |
| 0,81            | 16,21                            | 0,88            | 98,96                            | 0,88            | 159,36                           | 0,81            | 236,32                           |
| 0,74            | 12,57                            | 0,82            | 98,02                            | 0,82            | 172,42                           | 0,74            | 240,94                           |
| 0,67            | 12,57                            | 0,74            | 78,29                            | 0,74            | 195,36                           | 0,66            | 259,85                           |
| 0,58            | 12,14                            | 0,66            | 58,48                            | 0,67            | 193,80                           | 0,58            | 245,70                           |
| 0,50            | 11,49                            | 0,60            | 28,02                            | 0,57            | 159,86                           | 0,47            | 276,56                           |
| 0,38            | 7,71                             | 0,47            | 17,70                            | 0,47            | 105,55                           | 0,36            | 265,83                           |
| 0,00            | 0,00                             | 0,37            | 14,47                            | 0,36            | 63,55                            | 0,00            | 0,00                             |
|                 |                                  | 0,00            | 0,00                             | 0,00            | 0,00                             |                 |                                  |

## Apêndice C

**Tabela C.24:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 50^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0020$ ;  $dp = 1,545 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

| $\Gamma = 0,00$ |                                   | $\Gamma = 0,50$ |                                   | $\Gamma = 1,00$ |                                   | $\Gamma = 1,50$ |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,42            | 1398,95                           | 1,43            | 1411,44                           | 1,43            | 1393,43                           | 1,43            | 1389,36                           |
| 1,37            | 1303,01                           | 1,41            | 1400,99                           | 1,41            | 1401,80                           | 1,37            | 1370,18                           |
| 1,33            | 1269,49                           | 1,37            | 1400,89                           | 1,37            | 1386,28                           | 1,33            | 1370,94                           |
| 1,29            | 1241,41                           | 1,33            | 1380,87                           | 1,33            | 1352,90                           | 1,28            | 1380,72                           |
| 1,24            | 1188,90                           | 1,28            | 1375,67                           | 1,29            | 1368,99                           | 1,24            | 1374,51                           |
| 1,19            | 1133,32                           | 1,25            | 1360,50                           | 1,24            | 1359,19                           | 1,19            | 1356,50                           |
| 1,15            | 1110,17                           | 1,19            | 1353,71                           | 1,19            | 1349,52                           | 1,15            | 1364,39                           |
| 1,10            | 1054,95                           | 1,15            | 1354,54                           | 1,15            | 1353,39                           | 1,11            | 1357,50                           |
| 1,05            | 985,01                            | 1,10            | 1325,83                           | 1,10            | 1335,08                           | 1,06            | 1315,74                           |
| 0,99            | 943,52                            | 1,04            | 1297,91                           | 1,05            | 1295,17                           | 1,00            | 1282,19                           |
| 0,93            | 844,40                            | 0,99            | 1299,36                           | 1,01            | 1220,80                           | 0,95            | 1175,08                           |
| 0,87            | 786,07                            | 0,94            | 1273,03                           | 0,95            | 1194,92                           | 0,89            | 1064,46                           |
| 0,81            | 716,25                            | 0,88            | 1223,53                           | 0,89            | 1159,24                           | 0,82            | 1016,23                           |
| 0,74            | 622,63                            | 0,83            | 1193,46                           | 0,83            | 1100,08                           | 0,75            | 959,72                            |
| 0,67            | 552,46                            | 0,74            | 1121,12                           | 0,75            | 955,22                            | 0,68            | 861,48                            |
| 0,58            | 448,29                            | 0,65            | 961,68                            | 0,68            | 911,94                            | 0,58            | 698,69                            |
| 0,48            | 349,72                            | 0,58            | 811,58                            | 0,57            | 824,70                            | 0,51            | 599,24                            |
| 0,36            | 235,79                            | 0,47            | 595,84                            | 0,47            | 656,85                            | 0,35            | 357,84                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,30            | 312,41                            | 0,36            | 457,29                            | 0,00            | 0,00                              |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |                 |                                   |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,42            | 48,74                             | 1,43            | 167,37                            | 1,43            | 192,72                            | 1,43            | 213,43                            |
| 1,37            | 43,62                             | 1,41            | 175,07                            | 1,41            | 175,35                            | 1,37            | 207,06                            |
| 1,33            | 35,98                             | 1,37            | 142,42                            | 1,37            | 154,81                            | 1,33            | 208,44                            |
| 1,29            | 35,12                             | 1,33            | 111,84                            | 1,33            | 204,28                            | 1,28            | 213,88                            |
| 1,24            | 30,73                             | 1,28            | 97,33                             | 1,29            | 139,62                            | 1,24            | 213,30                            |
| 1,19            | 33,20                             | 1,25            | 95,73                             | 1,24            | 146,88                            | 1,19            | 220,43                            |
| 1,15            | 28,21                             | 1,19            | 97,00                             | 1,19            | 149,69                            | 1,15            | 221,85                            |
| 1,10            | 28,09                             | 1,15            | 97,49                             | 1,15            | 151,18                            | 1,11            | 226,52                            |
| 1,05            | 24,13                             | 1,10            | 100,98                            | 1,10            | 150,28                            | 1,06            | 226,81                            |
| 0,99            | 23,77                             | 1,04            | 100,93                            | 1,05            | 149,42                            | 1,00            | 232,07                            |
| 0,93            | 19,88                             | 0,99            | 102,82                            | 1,01            | 150,09                            | 0,95            | 235,08                            |
| 0,87            | 16,62                             | 0,94            | 98,01                             | 0,95            | 149,09                            | 0,89            | 227,80                            |
| 0,81            | 15,10                             | 0,88            | 90,57                             | 0,89            | 166,61                            | 0,82            | 232,97                            |
| 0,74            | 13,16                             | 0,83            | 81,36                             | 0,83            | 176,03                            | 0,75            | 242,35                            |
| 0,67            | 12,78                             | 0,74            | 67,79                             | 0,75            | 193,72                            | 0,68            | 257,89                            |
| 0,58            | 12,44                             | 0,65            | 35,04                             | 0,68            | 162,68                            | 0,58            | 260,55                            |
| 0,48            | 12,38                             | 0,58            | 28,61                             | 0,57            | 124,39                            | 0,51            | 270,71                            |
| 0,36            | 9,46                              | 0,47            | 23,45                             | 0,47            | 94,25                             | 0,35            | 256,29                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,30            | 12,27                             | 0,36            | 53,80                             | 0,00            | 0,00                              |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |                 |                                   |

## Apêndice C

**Tabela C.25:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 50^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0000$ ;  $d_p = 1,850 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

| $\Gamma = 0,00$ |                                   | $\Gamma = 0,50$ |                                   | $\Gamma = 1,00$ |                                   | $\Gamma = 1,50$ |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,42            | 1389,45                           | 1,43            | 1353,13                           | 1,43            | 1317,36                           | 1,42            | 1289,95                           |
| 1,37            | 1369,87                           | 1,41            | 1329,15                           | 1,37            | 1343,88                           | 1,37            | 1280,07                           |
| 1,33            | 1374,47                           | 1,37            | 1345,98                           | 1,33            | 1262,93                           | 1,33            | 1264,30                           |
| 1,29            | 1367,95                           | 1,33            | 1348,55                           | 1,28            | 1286,42                           | 1,29            | 1270,18                           |
| 1,24            | 1377,68                           | 1,29            | 1321,02                           | 1,23            | 1279,13                           | 1,24            | 1255,49                           |
| 1,20            | 1385,59                           | 1,24            | 1317,03                           | 1,19            | 1274,73                           | 1,20            | 1244,13                           |
| 1,15            | 1402,96                           | 1,19            | 1314,04                           | 1,15            | 1300,14                           | 1,15            | 1256,06                           |
| 1,11            | 1426,17                           | 1,15            | 1319,69                           | 1,10            | 1289,34                           | 1,10            | 1260,20                           |
| 1,05            | 1445,71                           | 1,11            | 1319,59                           | 1,05            | 1272,49                           | 1,05            | 1249,11                           |
| 1,00            | 1469,65                           | 1,06            | 1301,23                           | 1,00            | 1276,76                           | 0,99            | 1245,42                           |
| 0,94            | 1446,25                           | 0,99            | 1285,74                           | 0,94            | 1188,27                           | 0,94            | 1160,83                           |
| 0,88            | 1362,93                           | 0,94            | 1250,90                           | 0,88            | 1095,20                           | 0,88            | 1102,43                           |
| 0,82            | 1253,78                           | 0,88            | 1171,34                           | 0,82            | 1034,40                           | 0,82            | 1014,46                           |
| 0,74            | 1042,20                           | 0,82            | 1109,28                           | 0,75            | 951,88                            | 0,73            | 887,81                            |
| 0,67            | 917,41                            | 0,75            | 1049,41                           | 0,68            | 846,13                            | 0,67            | 838,46                            |
| 0,58            | 740,25                            | 0,67            | 996,76                            | 0,58            | 739,62                            | 0,59            | 696,13                            |
| 0,48            | 546,80                            | 0,57            | 841,98                            | 0,48            | 656,07                            | 0,50            | 559,74                            |
| 0,37            | 376,95                            | 0,48            | 673,01                            | 0,34            | 425,31                            | 0,36            | 381,36                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,36            | 458,81                            | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              |                 |                                   |                 |                                   |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,42            | 163,28                            | 1,43            | 246,55                            | 1,43            | 274,84                            | 1,42            | 301,79                            |
| 1,37            | 177,40                            | 1,41            | 239,92                            | 1,37            | 243,60                            | 1,37            | 306,16                            |
| 1,33            | 169,22                            | 1,37            | 219,84                            | 1,33            | 248,77                            | 1,33            | 285,29                            |
| 1,29            | 152,61                            | 1,33            | 199,96                            | 1,28            | 223,51                            | 1,29            | 275,46                            |
| 1,24            | 128,44                            | 1,29            | 189,30                            | 1,23            | 202,31                            | 1,24            | 269,99                            |
| 1,20            | 94,39                             | 1,24            | 170,53                            | 1,19            | 201,70                            | 1,20            | 247,64                            |
| 1,15            | 99,82                             | 1,19            | 150,29                            | 1,15            | 193,40                            | 1,15            | 244,93                            |
| 1,11            | 63,98                             | 1,15            | 149,63                            | 1,10            | 182,27                            | 1,10            | 246,92                            |
| 1,05            | 46,26                             | 1,11            | 130,31                            | 1,05            | 181,84                            | 1,05            | 244,13                            |
| 1,00            | 37,01                             | 1,06            | 125,14                            | 1,00            | 179,96                            | 0,99            | 242,58                            |
| 0,94            | 22,57                             | 0,99            | 120,50                            | 0,94            | 172,61                            | 0,94            | 235,38                            |
| 0,88            | 19,86                             | 0,94            | 114,61                            | 0,88            | 166,03                            | 0,88            | 230,45                            |
| 0,82            | 18,63                             | 0,88            | 108,37                            | 0,82            | 165,08                            | 0,82            | 209,20                            |
| 0,74            | 16,95                             | 0,82            | 103,99                            | 0,75            | 174,91                            | 0,73            | 218,84                            |
| 0,67            | 15,09                             | 0,75            | 91,02                             | 0,68            | 172,20                            | 0,67            | 246,89                            |
| 0,58            | 14,16                             | 0,67            | 70,09                             | 0,58            | 162,70                            | 0,59            | 269,30                            |
| 0,48            | 17,76                             | 0,57            | 47,24                             | 0,48            | 140,88                            | 0,50            | 283,58                            |
| 0,37            | 12,77                             | 0,48            | 28,45                             | 0,34            | 76,28                             | 0,36            | 258,79                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,36            | 19,97                             | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              |                 |                                   |                 |                                   |



## Apêndice C

**Tabela C.27:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 50^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0010$ ;  $dp = 1,850 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

| $\Gamma = 0,00$ |                                   | $\Gamma = 0,50$ |                                   | $\Gamma = 1,00$ |                                   | $\Gamma = 1,50$ |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,41            | 1285,06                           | 1,43            | 1326,13                           | 1,42            | 1333,52                           | 1,42            | 1381,69                           |
| 1,37            | 1254,19                           | 1,41            | 1321,52                           | 1,41            | 1323,71                           | 1,41            | 1372,73                           |
| 1,33            | 1200,65                           | 1,37            | 1298,02                           | 1,36            | 1324,20                           | 1,37            | 1374,18                           |
| 1,28            | 1162,17                           | 1,32            | 1291,63                           | 1,32            | 1319,83                           | 1,33            | 1370,20                           |
| 1,24            | 1109,28                           | 1,29            | 1295,32                           | 1,28            | 1319,45                           | 1,28            | 1360,04                           |
| 1,19            | 1065,52                           | 1,24            | 1283,60                           | 1,23            | 1329,59                           | 1,24            | 1350,84                           |
| 1,15            | 1039,97                           | 1,20            | 1276,21                           | 1,20            | 1329,60                           | 1,19            | 1361,16                           |
| 1,10            | 980,31                            | 1,15            | 1278,85                           | 1,15            | 1331,09                           | 1,15            | 1373,10                           |
| 1,05            | 921,28                            | 1,10            | 1251,73                           | 1,10            | 1308,46                           | 1,10            | 1359,57                           |
| 0,99            | 887,82                            | 1,05            | 1225,30                           | 1,05            | 1259,44                           | 1,05            | 1338,05                           |
| 0,93            | 797,06                            | 1,00            | 1211,29                           | 0,99            | 1190,63                           | 1,00            | 1313,42                           |
| 0,88            | 735,67                            | 0,95            | 1173,38                           | 0,93            | 1115,10                           | 0,95            | 1188,80                           |
| 0,81            | 659,56                            | 0,88            | 1130,37                           | 0,88            | 1104,80                           | 0,88            | 1032,98                           |
| 0,73            | 562,34                            | 0,82            | 1101,98                           | 0,82            | 1042,86                           | 0,82            | 998,91                            |
| 0,64            | 477,06                            | 0,74            | 1041,98                           | 0,75            | 906,65                            | 0,74            | 930,83                            |
| 0,57            | 407,42                            | 0,66            | 934,14                            | 0,67            | 829,67                            | 0,67            | 829,65                            |
| 0,48            | 319,20                            | 0,57            | 732,81                            | 0,58            | 745,17                            | 0,57            | 669,64                            |
| 0,37            | 218,96                            | 0,47            | 554,13                            | 0,47            | 627,78                            | 0,49            | 547,85                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,32            | 317,97                            | 0,37            | 447,52                            | 0,31            | 299,82                            |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,41            | 42,31                             | 1,43            | 169,67                            | 1,42            | 207,98                            | 1,42            | 263,26                            |
| 1,37            | 38,61                             | 1,41            | 169,63                            | 1,41            | 193,73                            | 1,41            | 238,51                            |
| 1,33            | 32,26                             | 1,37            | 164,22                            | 1,36            | 186,92                            | 1,37            | 219,12                            |
| 1,28            | 31,64                             | 1,32            | 158,41                            | 1,32            | 164,41                            | 1,33            | 219,37                            |
| 1,24            | 30,60                             | 1,29            | 132,21                            | 1,28            | 166,09                            | 1,28            | 220,25                            |
| 1,19            | 29,04                             | 1,24            | 122,49                            | 1,23            | 159,83                            | 1,24            | 223,85                            |
| 1,15            | 25,44                             | 1,20            | 113,39                            | 1,20            | 164,73                            | 1,19            | 229,19                            |
| 1,10            | 26,10                             | 1,15            | 111,74                            | 1,15            | 159,72                            | 1,15            | 236,54                            |
| 1,05            | 23,34                             | 1,10            | 113,37                            | 1,10            | 157,66                            | 1,10            | 237,96                            |
| 0,99            | 20,13                             | 1,05            | 115,96                            | 1,05            | 158,25                            | 1,05            | 239,94                            |
| 0,93            | 18,17                             | 1,00            | 116,47                            | 0,99            | 154,83                            | 1,00            | 230,71                            |
| 0,88            | 17,08                             | 0,95            | 110,28                            | 0,93            | 155,46                            | 0,95            | 222,57                            |
| 0,81            | 13,59                             | 0,88            | 97,68                             | 0,88            | 156,19                            | 0,88            | 219,77                            |
| 0,73            | 14,41                             | 0,82            | 84,62                             | 0,82            | 168,52                            | 0,82            | 221,02                            |
| 0,64            | 12,64                             | 0,74            | 61,04                             | 0,75            | 188,28                            | 0,74            | 234,52                            |
| 0,57            | 12,80                             | 0,66            | 35,32                             | 0,67            | 179,49                            | 0,67            | 246,02                            |
| 0,48            | 11,16                             | 0,57            | 32,10                             | 0,58            | 147,99                            | 0,57            | 246,90                            |
| 0,37            | 8,44                              | 0,47            | 27,25                             | 0,47            | 96,88                             | 0,49            | 262,40                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,32            | 19,24                             | 0,37            | 44,51                             | 0,31            | 238,50                            |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |

## Apêndice C

**Tabela C.28:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 50^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0020$ ;  $dp = 1,850 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

| $\Gamma = 0,00$ |                                   | $\Gamma = 0,50$ |                                   | $\Gamma = 1,00$ |                                   | $\Gamma = 1,50$ |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,42            | 1386,78                           | 1,44            | 1376,97                           | 1,44            | 1403,19                           | 1,43            | 1447,90                           |
| 1,38            | 1295,88                           | 1,40            | 1374,10                           | 1,41            | 1387,14                           | 1,41            | 1436,79                           |
| 1,32            | 1241,82                           | 1,37            | 1353,95                           | 1,37            | 1362,30                           | 1,37            | 1426,06                           |
| 1,28            | 1206,56                           | 1,33            | 1334,17                           | 1,33            | 1387,37                           | 1,33            | 1428,75                           |
| 1,24            | 1159,00                           | 1,29            | 1331,95                           | 1,29            | 1379,79                           | 1,29            | 1414,01                           |
| 1,19            | 1103,31                           | 1,24            | 1326,90                           | 1,23            | 1359,68                           | 1,24            | 1403,44                           |
| 1,15            | 1078,82                           | 1,19            | 1308,05                           | 1,19            | 1347,80                           | 1,20            | 1388,31                           |
| 1,11            | 1029,96                           | 1,15            | 1309,66                           | 1,15            | 1354,12                           | 1,15            | 1382,81                           |
| 1,05            | 941,43                            | 1,10            | 1274,35                           | 1,10            | 1291,28                           | 1,11            | 1367,42                           |
| 0,99            | 905,18                            | 1,06            | 1269,50                           | 1,05            | 1215,06                           | 1,06            | 1313,95                           |
| 0,95            | 823,25                            | 0,99            | 1257,46                           | 0,99            | 1215,10                           | 1,00            | 1252,35                           |
| 0,89            | 747,63                            | 0,94            | 1209,53                           | 0,94            | 1151,89                           | 0,95            | 1100,18                           |
| 0,82            | 681,00                            | 0,89            | 1186,14                           | 0,88            | 1094,60                           | 0,88            | 1045,85                           |
| 0,75            | 580,70                            | 0,82            | 1153,89                           | 0,82            | 1009,52                           | 0,82            | 1020,33                           |
| 0,66            | 491,32                            | 0,75            | 1014,81                           | 0,74            | 909,23                            | 0,74            | 884,04                            |
| 0,58            | 409,22                            | 0,67            | 880,59                            | 0,67            | 851,66                            | 0,67            | 746,20                            |
| 0,49            | 321,23                            | 0,58            | 705,23                            | 0,57            | 743,97                            | 0,58            | 654,17                            |
| 0,35            | 205,83                            | 0,48            | 519,98                            | 0,45            | 535,16                            | 0,48            | 485,67                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,37            | 367,94                            | 0,35            | 359,35                            | 0,28            | 232,97                            |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,42            | 43,72                             | 1,44            | 172,26                            | 1,44            | 183,21                            | 1,43            | 196,76                            |
| 1,38            | 39,86                             | 1,40            | 137,00                            | 1,41            | 201,88                            | 1,41            | 202,57                            |
| 1,32            | 36,91                             | 1,37            | 133,21                            | 1,37            | 188,46                            | 1,37            | 196,07                            |
| 1,28            | 32,96                             | 1,33            | 120,83                            | 1,33            | 142,80                            | 1,33            | 198,07                            |
| 1,24            | 31,09                             | 1,29            | 106,24                            | 1,29            | 138,41                            | 1,29            | 194,80                            |
| 1,19            | 26,68                             | 1,24            | 100,26                            | 1,23            | 137,50                            | 1,24            | 199,79                            |
| 1,15            | 27,68                             | 1,19            | 99,98                             | 1,19            | 138,69                            | 1,20            | 205,20                            |
| 1,11            | 26,35                             | 1,15            | 99,26                             | 1,15            | 137,24                            | 1,15            | 202,74                            |
| 1,05            | 21,58                             | 1,10            | 98,66                             | 1,10            | 138,21                            | 1,11            | 206,04                            |
| 0,99            | 18,79                             | 1,06            | 100,24                            | 1,05            | 133,33                            | 1,06            | 204,44                            |
| 0,95            | 21,09                             | 0,99            | 95,46                             | 0,99            | 137,52                            | 1,00            | 211,16                            |
| 0,89            | 16,48                             | 0,94            | 81,98                             | 0,94            | 151,99                            | 0,95            | 208,69                            |
| 0,82            | 15,96                             | 0,89            | 73,04                             | 0,88            | 163,63                            | 0,88            | 204,69                            |
| 0,75            | 14,87                             | 0,82            | 67,12                             | 0,82            | 174,01                            | 0,82            | 214,48                            |
| 0,66            | 12,52                             | 0,75            | 41,36                             | 0,74            | 157,33                            | 0,74            | 230,64                            |
| 0,58            | 12,30                             | 0,67            | 31,47                             | 0,67            | 141,72                            | 0,67            | 233,66                            |
| 0,49            | 10,64                             | 0,58            | 25,93                             | 0,57            | 106,08                            | 0,58            | 243,80                            |
| 0,35            | 8,43                              | 0,48            | 21,50                             | 0,45            | 54,50                             | 0,48            | 233,63                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,37            | 15,70                             | 0,35            | 23,11                             | 0,28            | 187,22                            |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |



## Apêndice C

**Tabela C.30:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 60^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0005$ ;  $dp = 1,095 \times 10^{-3}$  m.

| $\Gamma = 0,00$ |                                   | $\Gamma = 0,50$ |                                   | $\Gamma = 1,00$ |                                   | $\Gamma = 1,50$ |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,41            | 1412,70                           | 1,43            | 1437,10                           | 1,43            | 1402,06                           | 1,43            | 1416,01                           |
| 1,37            | 1415,87                           | 1,40            | 1457,32                           | 1,41            | 1402,13                           | 1,40            | 1404,95                           |
| 1,33            | 1423,67                           | 1,37            | 1433,29                           | 1,37            | 1388,43                           | 1,37            | 1407,40                           |
| 1,29            | 1411,36                           | 1,32            | 1422,35                           | 1,33            | 1398,39                           | 1,32            | 1387,16                           |
| 1,24            | 1405,66                           | 1,28            | 1423,13                           | 1,28            | 1411,74                           | 1,29            | 1374,96                           |
| 1,20            | 1386,83                           | 1,23            | 1404,26                           | 1,24            | 1349,45                           | 1,23            | 1385,58                           |
| 1,15            | 1402,43                           | 1,20            | 1400,48                           | 1,20            | 1373,64                           | 1,19            | 1393,86                           |
| 1,10            | 1400,35                           | 1,15            | 1413,96                           | 1,15            | 1388,45                           | 1,15            | 1408,14                           |
| 1,05            | 1398,78                           | 1,11            | 1387,18                           | 1,10            | 1390,29                           | 1,11            | 1378,16                           |
| 0,99            | 1400,15                           | 1,05            | 1399,14                           | 1,05            | 1377,10                           | 1,05            | 1387,68                           |
| 0,93            | 1380,15                           | 1,00            | 1385,32                           | 1,00            | 1405,65                           | 0,99            | 1393,81                           |
| 0,87            | 1320,64                           | 0,95            | 1397,82                           | 0,94            | 1385,62                           | 0,94            | 1358,10                           |
| 0,81            | 1294,88                           | 0,88            | 1376,89                           | 0,87            | 1389,75                           | 0,88            | 1373,52                           |
| 0,74            | 1157,13                           | 0,82            | 1383,98                           | 0,81            | 1382,92                           | 0,82            | 1381,64                           |
| 0,66            | 1016,17                           | 0,73            | 1368,31                           | 0,73            | 1376,29                           | 0,74            | 1345,47                           |
| 0,57            | 861,51                            | 0,66            | 1366,82                           | 0,66            | 1387,43                           | 0,66            | 1354,64                           |
| 0,46            | 668,41                            | 0,57            | 1281,39                           | 0,58            | 1314,22                           | 0,57            | 1324,78                           |
| 0,32            | 422,01                            | 0,46            | 1108,70                           | 0,47            | 1086,24                           | 0,58            | 1280,93                           |
| 0,00            | 0,00                              | 0,35            | 858,47                            | 0,36            | 827,47                            | 0,47            | 1004,00                           |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,41            | 250,42                            | 1,43            | 386,39                            | 1,43            | 336,00                            | 1,43            | 375,94                            |
| 1,37            | 214,97                            | 1,40            | 378,38                            | 1,41            | 408,62                            | 1,40            | 366,07                            |
| 1,33            | 231,72                            | 1,37            | 268,63                            | 1,37            | 331,25                            | 1,37            | 407,66                            |
| 1,29            | 229,34                            | 1,32            | 284,26                            | 1,33            | 364,82                            | 1,32            | 353,81                            |
| 1,24            | 193,96                            | 1,28            | 289,94                            | 1,28            | 328,04                            | 1,29            | 345,60                            |
| 1,20            | 188,16                            | 1,23            | 252,26                            | 1,24            | 298,26                            | 1,23            | 376,22                            |
| 1,15            | 137,97                            | 1,20            | 286,78                            | 1,20            | 314,23                            | 1,19            | 383,97                            |
| 1,10            | 124,46                            | 1,15            | 285,57                            | 1,15            | 315,59                            | 1,15            | 348,27                            |
| 1,05            | 142,35                            | 1,11            | 277,73                            | 1,10            | 260,31                            | 1,11            | 316,36                            |
| 0,99            | 118,75                            | 1,05            | 220,69                            | 1,05            | 273,08                            | 1,05            | 347,54                            |
| 0,93            | 76,21                             | 1,00            | 249,27                            | 1,00            | 279,48                            | 0,99            | 315,60                            |
| 0,87            | 33,23                             | 0,95            | 211,49                            | 0,94            | 219,04                            | 0,94            | 326,40                            |
| 0,81            | 14,88                             | 0,88            | 181,21                            | 0,87            | 240,26                            | 0,88            | 305,26                            |
| 0,74            | 13,38                             | 0,82            | 131,31                            | 0,81            | 236,74                            | 0,82            | 318,02                            |
| 0,66            | 14,08                             | 0,73            | 130,91                            | 0,73            | 213,07                            | 0,74            | 319,55                            |
| 0,57            | 13,26                             | 0,66            | 125,80                            | 0,66            | 221,08                            | 0,66            | 329,54                            |
| 0,46            | 14,85                             | 0,57            | 129,22                            | 0,58            | 219,44                            | 0,57            | 338,57                            |
| 0,32            | 10,10                             | 0,46            | 113,44                            | 0,47            | 246,42                            | 0,58            | 352,79                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,35            | 46,12                             | 0,36            | 261,31                            | 0,47            | 314,35                            |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |



## Apêndice C

**Tabela C.32:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 60^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0020$ ;  $dp = 1,095 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

| $\Gamma = 0,00$ |                                  | $\Gamma = 0,50$ |                                  | $\Gamma = 1,00$ |                                  | $\Gamma = 1,50$ |                                  |
|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>( $\text{N/m}^2$ ) |
| 1,41            | 1300,80                          | 1,43            | 1325,96                          | 1,42            | 1363,67                          | 1,42            | 1398,36                          |
| 1,37            | 1283,22                          | 1,41            | 1296,55                          | 1,41            | 1358,21                          | 1,37            | 1376,70                          |
| 1,33            | 1289,16                          | 1,37            | 1329,99                          | 1,37            | 1377,89                          | 1,33            | 1379,40                          |
| 1,29            | 1276,14                          | 1,33            | 1333,66                          | 1,33            | 1330,64                          | 1,28            | 1381,15                          |
| 1,24            | 1261,27                          | 1,29            | 1335,68                          | 1,29            | 1340,41                          | 1,24            | 1358,95                          |
| 1,20            | 1250,42                          | 1,25            | 1327,13                          | 1,24            | 1330,74                          | 1,19            | 1334,80                          |
| 1,15            | 1251,73                          | 1,19            | 1318,71                          | 1,20            | 1324,00                          | 1,15            | 1337,82                          |
| 1,10            | 1246,39                          | 1,15            | 1330,56                          | 1,16            | 1345,81                          | 1,11            | 1317,01                          |
| 1,06            | 1175,17                          | 1,11            | 1330,59                          | 1,11            | 1318,41                          | 1,06            | 1342,04                          |
| 1,01            | 1135,90                          | 1,05            | 1334,33                          | 1,06            | 1300,38                          | 1,00            | 1337,77                          |
| 0,94            | 1098,59                          | 1,01            | 1338,69                          | 1,00            | 1324,12                          | 0,95            | 1341,15                          |
| 0,89            | 1043,85                          | 0,94            | 1351,15                          | 0,94            | 1341,34                          | 0,91            | 1333,78                          |
| 0,81            | 975,81                           | 0,89            | 1346,93                          | 0,89            | 1343,67                          | 0,82            | 1350,75                          |
| 0,74            | 872,38                           | 0,83            | 1348,58                          | 0,82            | 1356,86                          | 0,75            | 1340,94                          |
| 0,67            | 798,08                           | 0,75            | 1306,97                          | 0,75            | 1326,94                          | 0,67            | 1331,39                          |
| 0,58            | 673,95                           | 0,67            | 1298,03                          | 0,66            | 1272,68                          | 0,59            | 1160,61                          |
| 0,48            | 525,75                           | 0,58            | 1238,84                          | 0,56            | 1182,36                          | 0,48            | 999,36                           |
| 0,35            | 358,25                           | 0,48            | 1093,12                          | 0,47            | 989,91                           | 0,36            | 772,09                           |
| 0,00            | 0,00                             | 0,34            | 732,54                           | 0,35            | 835,54                           | 0,00            | 0,00                             |
|                 |                                  | 0,00            | 0,00                             | 0,00            | 0,00                             |                 |                                  |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>( $\text{N/m}^2$ ) |
| 1,41            | 102,71                           | 1,43            | 334,44                           | 1,42            | 302,50                           | 1,42            | 333,30                           |
| 1,37            | 57,91                            | 1,41            | 212,40                           | 1,41            | 255,81                           | 1,37            | 312,48                           |
| 1,33            | 55,86                            | 1,37            | 265,04                           | 1,37            | 346,80                           | 1,33            | 287,75                           |
| 1,29            | 53,09                            | 1,33            | 255,34                           | 1,33            | 270,22                           | 1,28            | 274,46                           |
| 1,24            | 35,24                            | 1,29            | 229,33                           | 1,29            | 264,50                           | 1,24            | 290,27                           |
| 1,20            | 34,18                            | 1,25            | 228,11                           | 1,24            | 234,23                           | 1,19            | 258,49                           |
| 1,15            | 39,17                            | 1,19            | 188,01                           | 1,20            | 253,05                           | 1,15            | 312,36                           |
| 1,10            | 38,82                            | 1,15            | 172,73                           | 1,16            | 201,80                           | 1,11            | 288,53                           |
| 1,06            | 25,93                            | 1,11            | 141,82                           | 1,11            | 214,86                           | 1,06            | 233,98                           |
| 1,01            | 24,65                            | 1,05            | 128,21                           | 1,06            | 258,58                           | 1,00            | 264,88                           |
| 0,94            | 24,36                            | 1,01            | 93,82                            | 1,00            | 217,30                           | 0,95            | 244,43                           |
| 0,89            | 22,45                            | 0,94            | 104,69                           | 0,94            | 169,03                           | 0,91            | 232,99                           |
| 0,81            | 23,06                            | 0,89            | 104,54                           | 0,89            | 162,42                           | 0,82            | 252,44                           |
| 0,74            | 18,60                            | 0,83            | 112,09                           | 0,82            | 170,22                           | 0,75            | 264,64                           |
| 0,67            | 17,32                            | 0,75            | 115,53                           | 0,75            | 172,67                           | 0,67            | 281,61                           |
| 0,58            | 15,79                            | 0,67            | 121,83                           | 0,66            | 177,71                           | 0,59            | 287,06                           |
| 0,48            | 14,07                            | 0,58            | 95,43                            | 0,56            | 206,92                           | 0,48            | 298,94                           |
| 0,35            | 10,92                            | 0,48            | 70,07                            | 0,47            | 242,56                           | 0,36            | 385,25                           |
| 0,00            | 0,00                             | 0,34            | 40,85                            | 0,35            | 168,86                           | 0,00            | 0,00                             |
|                 |                                  | 0,00            | 0,00                             | 0,00            | 0,00                             |                 |                                  |

## Apêndice C

**Tabela C.33:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 60^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0030$ ;  $dp = 1,095 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

| $\Gamma = 0,00$ |                                  | $\Gamma = 0,50$ |                                  | $\Gamma = 1,00$ |                                  | $\Gamma = 1,50$ |                                  |
|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>( $\text{N/m}^2$ ) |
| 1,41            | 1329,46                          | 1,45            | 1317,13                          | 1,44            | 1397,78                          | 1,45            | 1442,13                          |
| 1,37            | 1321,30                          | 1,40            | 1363,35                          | 1,40            | 1413,23                          | 1,41            | 1424,19                          |
| 1,33            | 1313,46                          | 1,36            | 1336,70                          | 1,36            | 1411,29                          | 1,36            | 1416,83                          |
| 1,29            | 1314,69                          | 1,32            | 1347,08                          | 1,32            | 1391,48                          | 1,32            | 1403,34                          |
| 1,25            | 1259,91                          | 1,29            | 1349,34                          | 1,28            | 1383,91                          | 1,28            | 1393,44                          |
| 1,19            | 1237,98                          | 1,24            | 1350,38                          | 1,24            | 1364,08                          | 1,24            | 1370,67                          |
| 1,15            | 1221,05                          | 1,19            | 1331,48                          | 1,18            | 1369,37                          | 1,19            | 1350,67                          |
| 1,12            | 1195,99                          | 1,14            | 1363,75                          | 1,15            | 1363,14                          | 1,15            | 1362,54                          |
| 1,06            | 1155,52                          | 1,10            | 1352,91                          | 1,11            | 1340,63                          | 1,10            | 1362,64                          |
| 1,01            | 1122,66                          | 1,05            | 1344,89                          | 1,05            | 1346,26                          | 1,04            | 1351,00                          |
| 0,95            | 1098,47                          | 1,00            | 1357,02                          | 1,00            | 1365,79                          | 1,00            | 1357,36                          |
| 0,89            | 1019,95                          | 0,94            | 1346,74                          | 0,94            | 1359,01                          | 0,95            | 1350,82                          |
| 0,83            | 969,59                           | 0,89            | 1338,81                          | 0,88            | 1348,15                          | 0,90            | 1363,46                          |
| 0,75            | 871,51                           | 0,82            | 1343,24                          | 0,82            | 1344,30                          | 0,83            | 1366,74                          |
| 0,68            | 806,77                           | 0,73            | 1314,90                          | 0,74            | 1316,77                          | 0,75            | 1340,02                          |
| 0,58            | 692,38                           | 0,66            | 1311,71                          | 0,67            | 1299,59                          | 0,68            | 1309,85                          |
| 0,48            | 543,89                           | 0,59            | 1245,65                          | 0,57            | 1194,31                          | 0,57            | 1147,15                          |
| 0,36            | 362,68                           | 0,48            | 962,19                           | 0,46            | 1004,15                          | 0,47            | 1034,27                          |
| 0,00            | 0,00                             | 0,32            | 534,89                           | 0,35            | 820,63                           | 0,33            | 652,84                           |
|                 |                                  | 0,00            | 0,00                             | 0,00            | 0,00                             | 0,00            | 0,00                             |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>( $\text{N/m}^2$ ) |
| 1,41            | 62,93                            | 1,45            | 279,51                           | 1,44            | 286,96                           | 1,45            | 272,71                           |
| 1,37            | 60,91                            | 1,40            | 297,63                           | 1,40            | 315,73                           | 1,41            | 268,31                           |
| 1,33            | 57,50                            | 1,36            | 179,35                           | 1,36            | 357,61                           | 1,36            | 310,64                           |
| 1,29            | 54,54                            | 1,32            | 189,79                           | 1,32            | 221,52                           | 1,32            | 300,27                           |
| 1,25            | 31,20                            | 1,29            | 196,57                           | 1,28            | 265,07                           | 1,28            | 266,84                           |
| 1,19            | 30,98                            | 1,24            | 179,93                           | 1,24            | 302,10                           | 1,24            | 279,04                           |
| 1,15            | 28,98                            | 1,19            | 201,17                           | 1,18            | 239,95                           | 1,19            | 232,67                           |
| 1,12            | 30,64                            | 1,14            | 152,46                           | 1,15            | 178,32                           | 1,15            | 258,13                           |
| 1,06            | 25,47                            | 1,10            | 120,93                           | 1,11            | 193,82                           | 1,10            | 255,83                           |
| 1,01            | 22,30                            | 1,05            | 103,86                           | 1,05            | 168,88                           | 1,04            | 241,62                           |
| 0,95            | 20,37                            | 1,00            | 89,29                            | 1,00            | 170,65                           | 1,00            | 240,82                           |
| 0,89            | 18,52                            | 0,94            | 87,94                            | 0,94            | 160,27                           | 0,95            | 237,67                           |
| 0,83            | 18,50                            | 0,89            | 92,89                            | 0,88            | 160,65                           | 0,90            | 241,36                           |
| 0,75            | 16,55                            | 0,82            | 98,12                            | 0,82            | 165,17                           | 0,83            | 257,59                           |
| 0,68            | 15,03                            | 0,73            | 102,56                           | 0,74            | 175,91                           | 0,75            | 275,00                           |
| 0,58            | 13,39                            | 0,66            | 101,84                           | 0,67            | 185,77                           | 0,68            | 279,11                           |
| 0,48            | 11,57                            | 0,59            | 85,81                            | 0,57            | 208,61                           | 0,57            | 299,92                           |
| 0,36            | 10,73                            | 0,48            | 32,49                            | 0,46            | 226,47                           | 0,47            | 358,73                           |
| 0,00            | 0,00                             | 0,32            | 11,06                            | 0,35            | 156,41                           | 0,33            | 413,51                           |
|                 |                                  | 0,00            | 0,00                             | 0,00            | 0,00                             | 0,00            | 0,00                             |

## Apêndice C

**Tabela C.34:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 60^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0040$ ;  $dp = 1,095 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

| $\Gamma = 0,00$ |                                   | $\Gamma = 0,50$ |                                   | $\Gamma = 1,00$ |                                   | $\Gamma = 1,50$ |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,41            | 1372,25                           | 1,43            | 1403,55                           | 1,43            | 1394,42                           | 1,41            | 1444,22                           |
| 1,37            | 1358,75                           | 1,37            | 1410,99                           | 1,41            | 1375,84                           | 1,37            | 1410,57                           |
| 1,33            | 1343,26                           | 1,33            | 1408,57                           | 1,38            | 1370,72                           | 1,33            | 1386,65                           |
| 1,29            | 1316,48                           | 1,29            | 1390,45                           | 1,32            | 1384,80                           | 1,29            | 1411,75                           |
| 1,25            | 1302,86                           | 1,25            | 1394,73                           | 1,28            | 1377,35                           | 1,24            | 1384,82                           |
| 1,20            | 1299,85                           | 1,19            | 1379,63                           | 1,23            | 1383,77                           | 1,20            | 1373,17                           |
| 1,14            | 1303,89                           | 1,15            | 1389,70                           | 1,19            | 1362,92                           | 1,15            | 1375,86                           |
| 1,11            | 1270,27                           | 1,11            | 1384,97                           | 1,14            | 1378,86                           | 1,11            | 1369,79                           |
| 1,05            | 1310,50                           | 1,06            | 1375,43                           | 1,10            | 1374,76                           | 1,06            | 1372,17                           |
| 1,00            | 1246,72                           | 1,00            | 1380,83                           | 1,05            | 1364,55                           | 1,01            | 1374,05                           |
| 0,95            | 1122,91                           | 0,95            | 1376,70                           | 1,00            | 1376,78                           | 0,96            | 1393,26                           |
| 0,88            | 1051,75                           | 0,89            | 1358,66                           | 0,94            | 1377,92                           | 0,90            | 1355,30                           |
| 0,82            | 995,81                            | 0,83            | 1368,19                           | 0,88            | 1367,07                           | 0,83            | 1387,52                           |
| 0,74            | 894,62                            | 0,76            | 1341,82                           | 0,83            | 1371,30                           | 0,75            | 1375,77                           |
| 0,67            | 820,53                            | 0,67            | 1352,24                           | 0,75            | 1350,65                           | 0,56            | 1166,02                           |
| 0,58            | 700,59                            | 0,57            | 1226,54                           | 0,67            | 1334,94                           | 0,47            | 1027,13                           |
| 0,48            | 553,11                            | 0,48            | 1001,84                           | 0,58            | 1216,68                           | 0,35            | 754,57                            |
| 0,36            | 383,70                            | 0,32            | 574,16                            | 0,48            | 1031,23                           | 0,00            | 0,00                              |
| 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,37            | 855,28                            |                 |                                   |
|                 |                                   |                 |                                   | 0,00            | 0,00                              |                 |                                   |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,41            | 86,90                             | 1,43            | 228,42                            | 1,43            | 344,58                            | 1,41            | 360,90                            |
| 1,37            | 62,11                             | 1,37            | 285,24                            | 1,41            | 335,75                            | 1,37            | 277,41                            |
| 1,33            | 59,71                             | 1,33            | 232,90                            | 1,38            | 260,80                            | 1,33            | 234,01                            |
| 1,29            | 42,84                             | 1,29            | 223,07                            | 1,32            | 241,83                            | 1,29            | 274,66                            |
| 1,25            | 45,44                             | 1,25            | 238,21                            | 1,28            | 243,74                            | 1,24            | 280,28                            |
| 1,20            | 43,58                             | 1,19            | 203,17                            | 1,23            | 273,16                            | 1,20            | 284,13                            |
| 1,14            | 43,73                             | 1,15            | 192,41                            | 1,19            | 192,62                            | 1,15            | 244,15                            |
| 1,11            | 33,71                             | 1,11            | 163,33                            | 1,14            | 220,97                            | 1,11            | 267,62                            |
| 1,05            | 23,39                             | 1,06            | 121,92                            | 1,10            | 189,34                            | 1,06            | 230,12                            |
| 1,00            | 21,82                             | 1,00            | 87,85                             | 1,05            | 175,62                            | 1,01            | 218,65                            |
| 0,95            | 20,23                             | 0,95            | 89,02                             | 1,00            | 170,30                            | 0,96            | 225,57                            |
| 0,88            | 16,10                             | 0,89            | 97,49                             | 0,94            | 149,34                            | 0,90            | 214,02                            |
| 0,82            | 15,31                             | 0,83            | 99,15                             | 0,88            | 158,27                            | 0,83            | 242,90                            |
| 0,74            | 13,74                             | 0,76            | 103,48                            | 0,83            | 162,55                            | 0,75            | 260,17                            |
| 0,67            | 12,22                             | 0,67            | 110,43                            | 0,75            | 175,19                            | 0,56            | 291,68                            |
| 0,58            | 13,08                             | 0,57            | 105,12                            | 0,67            | 189,80                            | 0,47            | 314,85                            |
| 0,48            | 10,04                             | 0,48            | 49,59                             | 0,58            | 210,78                            | 0,35            | 378,88                            |
| 0,36            | 7,81                              | 0,32            | 13,80                             | 0,48            | 229,63                            | 0,00            | 0,00                              |
| 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,37            | 155,80                            |                 |                                   |
|                 |                                   |                 |                                   | 0,00            | 0,00                              |                 |                                   |



## Apêndice C

**Tabela C.36:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 60^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0005$ ;  $dp = 1,545 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

| $\Gamma = 0,00$ |                                   | $\Gamma = 0,50$ |                                   | $\Gamma = 1,00$ |                                   | $\Gamma = 1,50$ |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,42            | 1382,32                           | 1,44            | 1379,94                           | 1,43            | 1374,18                           | 1,44            | 1365,99                           |
| 1,36            | 1378,00                           | 1,40            | 1343,90                           | 1,40            | 1360,42                           | 1,40            | 1378,97                           |
| 1,32            | 1373,17                           | 1,36            | 1355,26                           | 1,36            | 1333,35                           | 1,37            | 1349,83                           |
| 1,28            | 1364,84                           | 1,32            | 1321,02                           | 1,33            | 1314,27                           | 1,32            | 1380,14                           |
| 1,24            | 1351,59                           | 1,28            | 1340,34                           | 1,28            | 1313,60                           | 1,27            | 1320,52                           |
| 1,19            | 1354,04                           | 1,23            | 1323,05                           | 1,23            | 1308,21                           | 1,23            | 1322,87                           |
| 1,15            | 1357,76                           | 1,18            | 1312,17                           | 1,19            | 1305,08                           | 1,18            | 1305,61                           |
| 1,10            | 1297,51                           | 1,14            | 1334,70                           | 1,15            | 1274,75                           | 1,15            | 1294,86                           |
| 1,04            | 1235,06                           | 1,10            | 1313,45                           | 1,10            | 1319,10                           | 1,11            | 1275,81                           |
| 0,99            | 1196,16                           | 1,05            | 1300,35                           | 1,06            | 1313,53                           | 1,06            | 1262,99                           |
| 0,93            | 1098,98                           | 1,00            | 1306,58                           | 0,99            | 1313,13                           | 0,99            | 1286,58                           |
| 0,87            | 1004,14                           | 0,95            | 1278,04                           | 0,93            | 1257,38                           | 0,93            | 1263,62                           |
| 0,80            | 876,44                            | 0,87            | 1225,42                           | 0,87            | 1240,03                           | 0,88            | 1239,33                           |
| 0,73            | 760,97                            | 0,82            | 1160,22                           | 0,81            | 1105,95                           | 0,82            | 1176,23                           |
| 0,64            | 642,65                            | 0,73            | 1060,31                           | 0,73            | 1044,69                           | 0,74            | 1014,27                           |
| 0,57            | 536,89                            | 0,65            | 989,65                            | 0,65            | 944,89                            | 0,66            | 937,96                            |
| 0,47            | 414,28                            | 0,58            | 892,28                            | 0,56            | 770,07                            | 0,56            | 817,30                            |
| 0,32            | 237,16                            | 0,45            | 638,15                            | 0,47            | 648,84                            | 0,45            | 623,52                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,35            | 441,10                            | 0,30            | 389,07                            | 0,31            | 374,24                            |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,42            | 142,71                            | 1,44            | 224,90                            | 1,43            | 272,90                            | 1,44            | 317,62                            |
| 1,36            | 76,17                             | 1,40            | 252,76                            | 1,40            | 226,11                            | 1,40            | 289,03                            |
| 1,32            | 68,41                             | 1,36            | 191,82                            | 1,36            | 240,93                            | 1,37            | 291,77                            |
| 1,28            | 58,38                             | 1,32            | 200,26                            | 1,33            | 235,58                            | 1,32            | 269,71                            |
| 1,24            | 40,08                             | 1,28            | 171,51                            | 1,28            | 244,51                            | 1,27            | 275,69                            |
| 1,19            | 36,66                             | 1,23            | 163,92                            | 1,23            | 232,50                            | 1,23            | 279,99                            |
| 1,15            | 33,93                             | 1,18            | 154,73                            | 1,19            | 205,14                            | 1,18            | 272,31                            |
| 1,10            | 25,91                             | 1,14            | 140,62                            | 1,15            | 216,05                            | 1,15            | 289,67                            |
| 1,04            | 26,08                             | 1,10            | 133,37                            | 1,10            | 185,05                            | 1,11            | 266,71                            |
| 0,99            | 24,10                             | 1,05            | 127,43                            | 1,06            | 179,36                            | 1,06            | 250,52                            |
| 0,93            | 22,91                             | 1,00            | 125,21                            | 0,99            | 179,44                            | 0,99            | 236,07                            |
| 0,87            | 17,96                             | 0,95            | 125,52                            | 0,93            | 172,75                            | 0,93            | 245,13                            |
| 0,80            | 17,07                             | 0,87            | 121,57                            | 0,87            | 171,96                            | 0,88            | 244,69                            |
| 0,73            | 13,34                             | 0,82            | 114,44                            | 0,81            | 163,42                            | 0,82            | 242,21                            |
| 0,64            | 13,76                             | 0,73            | 90,36                             | 0,73            | 167,10                            | 0,74            | 233,60                            |
| 0,57            | 12,94                             | 0,65            | 67,77                             | 0,65            | 177,39                            | 0,66            | 232,46                            |
| 0,47            | 10,23                             | 0,58            | 43,31                             | 0,56            | 179,21                            | 0,56            | 263,45                            |
| 0,32            | 8,01                              | 0,45            | 23,15                             | 0,47            | 159,58                            | 0,45            | 306,38                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,35            | 15,42                             | 0,30            | 69,92                             | 0,31            | 314,67                            |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |

## Apêndice C

**Tabela C.37:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 60^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0010$ ;  $dp = 1,545 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

| $\Gamma = 0,00$ |                                   | $\Gamma = 0,50$ |                                   | $\Gamma = 1,00$ |                                   | $\Gamma = 1,50$ |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,42            | 1310,62                           | 1,43            | 1404,79                           | 1,43            | 1417,71                           | 1,43            | 1437,87                           |
| 1,37            | 1286,50                           | 1,40            | 1391,32                           | 1,40            | 1396,99                           | 1,39            | 1427,15                           |
| 1,32            | 1257,13                           | 1,36            | 1373,76                           | 1,37            | 1414,31                           | 1,36            | 1408,71                           |
| 1,28            | 1234,98                           | 1,31            | 1368,87                           | 1,32            | 1380,13                           | 1,32            | 1382,60                           |
| 1,24            | 1186,66                           | 1,27            | 1346,42                           | 1,27            | 1370,88                           | 1,27            | 1363,35                           |
| 1,19            | 1151,67                           | 1,24            | 1328,36                           | 1,23            | 1371,01                           | 1,23            | 1361,03                           |
| 1,15            | 1142,96                           | 1,20            | 1318,20                           | 1,19            | 1351,88                           | 1,19            | 1347,73                           |
| 1,09            | 1069,92                           | 1,15            | 1330,29                           | 1,14            | 1364,41                           | 1,14            | 1339,73                           |
| 1,04            | 1023,06                           | 1,10            | 1313,30                           | 1,10            | 1367,84                           | 1,10            | 1334,57                           |
| 0,98            | 980,37                            | 1,06            | 1297,31                           | 1,05            | 1367,74                           | 1,04            | 1333,76                           |
| 0,93            | 892,66                            | 0,99            | 1301,37                           | 1,00            | 1369,38                           | 1,00            | 1366,84                           |
| 0,87            | 830,48                            | 0,94            | 1254,73                           | 0,94            | 1328,33                           | 0,95            | 1346,95                           |
| 0,80            | 730,28                            | 0,88            | 1209,94                           | 0,86            | 1182,17                           | 0,88            | 1315,12                           |
| 0,74            | 661,31                            | 0,81            | 1165,59                           | 0,81            | 1128,32                           | 0,82            | 1224,49                           |
| 0,65            | 547,47                            | 0,74            | 1109,56                           | 0,74            | 1045,39                           | 0,74            | 1010,50                           |
| 0,55            | 426,09                            | 0,66            | 1039,84                           | 0,65            | 902,00                            | 0,65            | 962,41                            |
| 0,43            | 311,91                            | 0,57            | 883,01                            | 0,55            | 773,58                            | 0,56            | 810,20                            |
| 0,31            | 192,16                            | 0,46            | 649,34                            | 0,46            | 689,41                            | 0,47            | 593,02                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,34            | 400,86                            | 0,34            | 448,06                            | 0,31            | 339,69                            |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,42            | 40,75                             | 1,43            | 177,35                            | 1,43            | 196,54                            | 1,43            | 301,87                            |
| 1,37            | 43,47                             | 1,40            | 184,37                            | 1,40            | 216,25                            | 1,39            | 251,88                            |
| 1,32            | 34,31                             | 1,36            | 184,27                            | 1,37            | 166,39                            | 1,36            | 298,84                            |
| 1,28            | 30,15                             | 1,31            | 176,65                            | 1,32            | 215,16                            | 1,32            | 282,35                            |
| 1,24            | 29,69                             | 1,27            | 147,87                            | 1,27            | 179,79                            | 1,27            | 260,17                            |
| 1,19            | 29,33                             | 1,24            | 158,11                            | 1,23            | 176,89                            | 1,23            | 251,41                            |
| 1,15            | 28,89                             | 1,20            | 140,78                            | 1,19            | 186,60                            | 1,19            | 224,04                            |
| 1,09            | 25,67                             | 1,15            | 129,51                            | 1,14            | 162,22                            | 1,14            | 227,47                            |
| 1,04            | 23,69                             | 1,10            | 118,83                            | 1,10            | 158,99                            | 1,10            | 232,34                            |
| 0,98            | 18,45                             | 1,06            | 114,36                            | 1,05            | 166,20                            | 1,04            | 235,42                            |
| 0,93            | 20,24                             | 0,99            | 105,91                            | 1,00            | 166,74                            | 1,00            | 248,86                            |
| 0,87            | 15,88                             | 0,94            | 109,78                            | 0,94            | 169,80                            | 0,95            | 246,97                            |
| 0,80            | 13,79                             | 0,88            | 109,65                            | 0,86            | 159,75                            | 0,88            | 254,81                            |
| 0,74            | 13,77                             | 0,81            | 100,34                            | 0,81            | 151,95                            | 0,82            | 245,54                            |
| 0,65            | 11,28                             | 0,74            | 94,36                             | 0,74            | 181,07                            | 0,74            | 230,10                            |
| 0,55            | 9,31                              | 0,66            | 58,73                             | 0,65            | 196,66                            | 0,65            | 245,62                            |
| 0,43            | 7,20                              | 0,57            | 29,87                             | 0,55            | 171,94                            | 0,56            | 275,49                            |
| 0,31            | 7,10                              | 0,46            | 23,72                             | 0,46            | 124,98                            | 0,47            | 272,32                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,34            | 19,18                             | 0,34            | 41,85                             | 0,31            | 311,85                            |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |

## Apêndice C

**Tabela C.38:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 60^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0020$ ;  $dp = 1,545 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

| $\Gamma = 0,00$ |                                  | $\Gamma = 0,50$ |                                  | $\Gamma = 1,00$ |                                  | $\Gamma = 1,50$ |                                  |
|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>( $\text{N/m}^2$ ) |
| 1,41            | 1433,24                          | 1,44            | 1491,15                          | 1,44            | 1464,59                          | 1,43            | 1507,90                          |
| 1,36            | 1414,73                          | 1,40            | 1479,95                          | 1,40            | 1482,90                          | 1,41            | 1497,02                          |
| 1,32            | 1356,47                          | 1,37            | 1476,95                          | 1,37            | 1454,71                          | 1,36            | 1485,82                          |
| 1,29            | 1302,66                          | 1,33            | 1435,20                          | 1,32            | 1457,41                          | 1,32            | 1481,51                          |
| 1,24            | 1257,19                          | 1,28            | 1441,31                          | 1,27            | 1453,06                          | 1,28            | 1476,41                          |
| 1,19            | 1226,47                          | 1,25            | 1433,87                          | 1,24            | 1447,77                          | 1,23            | 1454,92                          |
| 1,14            | 1199,60                          | 1,20            | 1409,58                          | 1,19            | 1437,29                          | 1,19            | 1433,28                          |
| 1,10            | 1139,51                          | 1,15            | 1409,62                          | 1,15            | 1442,54                          | 1,15            | 1440,21                          |
| 1,04            | 1069,72                          | 1,11            | 1410,80                          | 1,11            | 1431,07                          | 1,10            | 1455,93                          |
| 0,98            | 1034,94                          | 1,05            | 1383,51                          | 1,04            | 1411,91                          | 1,05            | 1464,75                          |
| 0,93            | 961,22                           | 0,99            | 1393,98                          | 0,99            | 1414,07                          | 1,00            | 1470,43                          |
| 0,86            | 901,37                           | 0,94            | 1355,43                          | 0,95            | 1382,78                          | 0,95            | 1431,41                          |
| 0,80            | 785,84                           | 0,89            | 1307,12                          | 0,88            | 1259,28                          | 0,89            | 1393,21                          |
| 0,74            | 719,05                           | 0,82            | 1288,34                          | 0,82            | 1244,59                          | 0,83            | 1282,99                          |
| 0,65            | 605,50                           | 0,74            | 1220,22                          | 0,73            | 1113,16                          | 0,75            | 1094,18                          |
| 0,56            | 511,93                           | 0,66            | 1161,60                          | 0,66            | 959,09                           | 0,67            | 1034,93                          |
| 0,48            | 397,27                           | 0,57            | 912,44                           | 0,57            | 874,73                           | 0,57            | 799,91                           |
| 0,29            | 200,87                           | 0,47            | 677,81                           | 0,48            | 769,43                           | 0,46            | 656,09                           |
| 0,00            | 0,00                             | 0,32            | 398,86                           | 0,33            | 453,75                           | 0,35            | 418,45                           |
|                 |                                  | 0,00            | 0,00                             | 0,00            | 0,00                             | 0,00            | 0,00                             |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>( $\text{N/m}^2$ ) |
| 1,41            | 49,18                            | 1,44            | 191,28                           | 1,44            | 227,03                           | 1,43            | 272,74                           |
| 1,36            | 44,65                            | 1,40            | 189,63                           | 1,40            | 224,91                           | 1,41            | 288,44                           |
| 1,32            | 38,19                            | 1,37            | 183,00                           | 1,37            | 233,07                           | 1,36            | 274,93                           |
| 1,29            | 35,19                            | 1,33            | 161,74                           | 1,32            | 197,84                           | 1,32            | 270,59                           |
| 1,24            | 34,60                            | 1,28            | 141,37                           | 1,27            | 194,36                           | 1,28            | 234,87                           |
| 1,19            | 30,62                            | 1,25            | 142,73                           | 1,24            | 179,10                           | 1,23            | 234,61                           |
| 1,14            | 31,22                            | 1,20            | 143,62                           | 1,19            | 149,87                           | 1,19            | 243,56                           |
| 1,10            | 24,54                            | 1,15            | 125,04                           | 1,15            | 150,51                           | 1,15            | 246,18                           |
| 1,04            | 24,83                            | 1,11            | 105,14                           | 1,11            | 155,48                           | 1,10            | 227,76                           |
| 0,98            | 22,13                            | 1,05            | 103,65                           | 1,04            | 157,98                           | 1,05            | 240,23                           |
| 0,93            | 18,50                            | 0,99            | 98,62                            | 0,99            | 160,76                           | 1,00            | 243,85                           |
| 0,86            | 18,95                            | 0,94            | 100,98                           | 0,95            | 159,49                           | 0,95            | 255,08                           |
| 0,80            | 15,12                            | 0,89            | 102,99                           | 0,88            | 155,18                           | 0,89            | 245,41                           |
| 0,74            | 14,14                            | 0,82            | 96,87                            | 0,82            | 159,38                           | 0,83            | 248,52                           |
| 0,65            | 13,30                            | 0,74            | 85,98                            | 0,73            | 191,21                           | 0,75            | 257,84                           |
| 0,56            | 11,17                            | 0,66            | 65,37                            | 0,66            | 212,98                           | 0,67            | 251,36                           |
| 0,48            | 10,11                            | 0,57            | 33,71                            | 0,57            | 172,75                           | 0,57            | 278,81                           |
| 0,29            | 7,36                             | 0,47            | 15,09                            | 0,48            | 120,90                           | 0,46            | 322,64                           |
| 0,00            | 0,00                             | 0,32            | 12,05                            | 0,33            | 28,50                            | 0,35            | 309,68                           |
|                 |                                  | 0,00            | 0,00                             | 0,00            | 0,00                             | 0,00            | 0,00                             |

## Apêndice C

**Tabela C.39:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 60^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0000$ ;  $dp = 1,850 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

| $\Gamma = 0,00$ |                                   | $\Gamma = 0,50$ |                                   | $\Gamma = 1,00$ |                                   | $\Gamma = 1,50$ |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,41            | 1435,21                           | 1,43            | 1388,84                           | 1,43            | 1360,96                           | 1,43            | 1365,72                           |
| 1,41            | 1436,71                           | 1,37            | 1375,90                           | 1,41            | 1371,85                           | 1,40            | 1343,85                           |
| 1,37            | 1427,84                           | 1,33            | 1364,70                           | 1,37            | 1323,06                           | 1,37            | 1343,55                           |
| 1,33            | 1407,43                           | 1,29            | 1344,63                           | 1,32            | 1350,90                           | 1,32            | 1302,26                           |
| 1,29            | 1406,70                           | 1,24            | 1349,55                           | 1,29            | 1312,97                           | 1,28            | 1285,49                           |
| 1,23            | 1395,40                           | 1,19            | 1324,45                           | 1,24            | 1323,79                           | 1,24            | 1290,66                           |
| 1,19            | 1422,10                           | 1,15            | 1338,11                           | 1,20            | 1311,09                           | 1,20            | 1271,95                           |
| 1,14            | 1441,97                           | 1,10            | 1349,99                           | 1,15            | 1309,68                           | 1,15            | 1301,22                           |
| 1,11            | 1439,60                           | 1,05            | 1327,94                           | 1,10            | 1294,73                           | 1,11            | 1280,79                           |
| 1,05            | 1463,98                           | 1,01            | 1304,24                           | 1,05            | 1300,15                           | 1,05            | 1255,48                           |
| 0,99            | 1498,89                           | 0,94            | 1270,56                           | 0,99            | 1296,47                           | 1,00            | 1263,32                           |
| 0,96            | 1495,13                           | 0,89            | 1220,58                           | 0,94            | 1232,27                           | 0,95            | 1200,76                           |
| 0,89            | 1446,14                           | 0,83            | 1171,72                           | 0,89            | 1165,11                           | 0,90            | 1121,51                           |
| 0,83            | 1339,50                           | 0,75            | 1079,55                           | 0,83            | 1095,72                           | 0,84            | 1058,83                           |
| 0,74            | 1098,15                           | 0,68            | 1048,96                           | 0,75            | 984,81                            | 0,76            | 927,44                            |
| 0,67            | 958,79                            | 0,60            | 924,86                            | 0,68            | 878,05                            | 0,67            | 824,38                            |
| 0,58            | 776,23                            | 0,49            | 716,34                            | 0,57            | 729,99                            | 0,59            | 709,11                            |
| 0,48            | 561,24                            | 0,32            | 379,70                            | 0,48            | 645,33                            | 0,49            | 553,92                            |
| 0,35            | 350,30                            | 0,00            | 0,00                              | 0,38            | 482,23                            | 0,36            | 380,74                            |
| 0,00            | 0,00                              |                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,41            | 160,40                            | 1,43            | 257,14                            | 1,43            | 257,34                            | 1,43            | 315,02                            |
| 1,41            | 187,35                            | 1,37            | 233,15                            | 1,41            | 268,37                            | 1,40            | 307,76                            |
| 1,37            | 170,75                            | 1,33            | 213,51                            | 1,37            | 264,52                            | 1,37            | 282,67                            |
| 1,33            | 175,42                            | 1,29            | 178,89                            | 1,32            | 208,26                            | 1,32            | 276,65                            |
| 1,29            | 157,11                            | 1,24            | 177,73                            | 1,29            | 250,71                            | 1,28            | 265,07                            |
| 1,23            | 139,22                            | 1,19            | 147,38                            | 1,24            | 192,93                            | 1,24            | 247,60                            |
| 1,19            | 86,04                             | 1,15            | 166,40                            | 1,20            | 196,76                            | 1,20            | 247,21                            |
| 1,14            | 60,88                             | 1,10            | 138,75                            | 1,15            | 193,23                            | 1,15            | 233,49                            |
| 1,11            | 72,71                             | 1,05            | 122,65                            | 1,10            | 181,70                            | 1,11            | 237,14                            |
| 1,05            | 41,32                             | 1,01            | 117,45                            | 1,05            | 173,04                            | 1,05            | 235,61                            |
| 0,99            | 30,47                             | 0,94            | 106,50                            | 0,99            | 169,87                            | 1,00            | 232,03                            |
| 0,96            | 29,06                             | 0,89            | 106,15                            | 0,94            | 165,13                            | 0,95            | 226,95                            |
| 0,89            | 21,15                             | 0,83            | 104,59                            | 0,89            | 153,38                            | 0,90            | 218,22                            |
| 0,83            | 19,44                             | 0,75            | 99,57                             | 0,83            | 154,45                            | 0,84            | 213,22                            |
| 0,74            | 18,71                             | 0,68            | 92,65                             | 0,75            | 171,23                            | 0,76            | 224,91                            |
| 0,67            | 17,54                             | 0,60            | 54,65                             | 0,68            | 175,47                            | 0,67            | 228,98                            |
| 0,58            | 15,32                             | 0,49            | 18,41                             | 0,57            | 158,01                            | 0,59            | 247,77                            |
| 0,48            | 12,12                             | 0,32            | 10,80                             | 0,48            | 129,49                            | 0,49            | 280,01                            |
| 0,35            | 8,38                              | 0,00            | 0,00                              | 0,38            | 88,45                             | 0,36            | 290,76                            |
| 0,00            | 0,00                              |                 |                                   | 0,00            | 0,00                              | 0,00            | 0,00                              |

## Apêndice C

**Tabela C.40:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 60^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0005$ ;  $dp = 1,850 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

| $\Gamma = 0,00$ |                                   | $\Gamma = 0,50$ |                                   | $\Gamma = 1,00$ |                                   | $\Gamma = 1,50$ |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,41            | 1390,93                           | 1,43            | 1394,43                           | 1,42            | 1363,01                           | 1,43            | 1348,75                           |
| 1,37            | 1388,25                           | 1,40            | 1378,50                           | 1,36            | 1330,24                           | 1,41            | 1364,07                           |
| 1,33            | 1379,69                           | 1,37            | 1371,39                           | 1,32            | 1331,03                           | 1,37            | 1350,06                           |
| 1,28            | 1360,31                           | 1,32            | 1359,41                           | 1,29            | 1326,13                           | 1,33            | 1303,87                           |
| 1,24            | 1343,96                           | 1,28            | 1355,05                           | 1,24            | 1319,77                           | 1,28            | 1330,58                           |
| 1,19            | 1323,48                           | 1,24            | 1333,72                           | 1,18            | 1305,59                           | 1,24            | 1283,61                           |
| 1,15            | 1323,02                           | 1,19            | 1319,49                           | 1,15            | 1307,62                           | 1,19            | 1297,33                           |
| 1,11            | 1272,32                           | 1,15            | 1342,23                           | 1,11            | 1295,58                           | 1,15            | 1293,50                           |
| 1,05            | 1199,71                           | 1,10            | 1313,31                           | 1,06            | 1305,41                           | 1,11            | 1267,99                           |
| 1,00            | 1157,51                           | 1,06            | 1319,76                           | 1,01            | 1309,52                           | 1,05            | 1266,37                           |
| 0,94            | 1058,40                           | 1,00            | 1314,42                           | 0,96            | 1303,16                           | 1,00            | 1281,47                           |
| 0,88            | 956,20                            | 0,95            | 1265,50                           | 0,89            | 1141,63                           | 0,95            | 1268,34                           |
| 0,82            | 860,62                            | 0,90            | 1196,79                           | 0,83            | 1092,31                           | 0,89            | 1213,95                           |
| 0,75            | 725,46                            | 0,83            | 1144,38                           | 0,74            | 982,64                            | 0,84            | 1107,17                           |
| 0,66            | 627,81                            | 0,76            | 1066,65                           | 0,68            | 885,51                            | 0,75            | 936,38                            |
| 0,58            | 517,76                            | 0,69            | 995,90                            | 0,60            | 769,52                            | 0,68            | 931,31                            |
| 0,48            | 390,75                            | 0,59            | 833,24                            | 0,48            | 624,66                            | 0,58            | 737,40                            |
| 0,37            | 269,35                            | 0,51            | 672,31                            | 0,37            | 439,48                            | 0,49            | 599,38                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,35            | 386,96                            | 0,00            | 0,00                              | 0,36            | 384,94                            |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              |                 |                                   | 0,00            | 0,00                              |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>(N/m <sup>2</sup> ) |
| 1,41            | 50,45                             | 1,43            | 201,69                            | 1,42            | 262,45                            | 1,43            | 280,60                            |
| 1,37            | 43,69                             | 1,40            | 168,07                            | 1,36            | 236,60                            | 1,41            | 271,04                            |
| 1,33            | 40,63                             | 1,37            | 154,76                            | 1,32            | 203,13                            | 1,37            | 290,62                            |
| 1,28            | 34,08                             | 1,32            | 132,47                            | 1,29            | 196,15                            | 1,33            | 262,09                            |
| 1,24            | 34,49                             | 1,28            | 139,58                            | 1,24            | 176,31                            | 1,28            | 229,84                            |
| 1,19            | 29,72                             | 1,24            | 142,58                            | 1,18            | 179,53                            | 1,24            | 242,26                            |
| 1,15            | 29,84                             | 1,19            | 136,20                            | 1,15            | 178,00                            | 1,19            | 233,85                            |
| 1,11            | 27,53                             | 1,15            | 131,82                            | 1,11            | 169,21                            | 1,15            | 237,02                            |
| 1,05            | 25,39                             | 1,10            | 128,71                            | 1,06            | 162,99                            | 1,11            | 233,36                            |
| 1,00            | 21,41                             | 1,06            | 124,14                            | 1,01            | 166,66                            | 1,05            | 237,58                            |
| 0,94            | 23,36                             | 1,00            | 113,87                            | 0,96            | 164,40                            | 1,00            | 229,71                            |
| 0,88            | 19,03                             | 0,95            | 120,96                            | 0,89            | 161,64                            | 0,95            | 242,81                            |
| 0,82            | 18,30                             | 0,90            | 126,28                            | 0,83            | 162,37                            | 0,89            | 245,50                            |
| 0,75            | 16,16                             | 0,83            | 105,32                            | 0,74            | 183,63                            | 0,84            | 240,08                            |
| 0,66            | 14,60                             | 0,76            | 93,25                             | 0,68            | 184,75                            | 0,75            | 245,80                            |
| 0,58            | 13,54                             | 0,69            | 65,47                             | 0,60            | 173,77                            | 0,68            | 237,13                            |
| 0,48            | 11,82                             | 0,59            | 35,76                             | 0,48            | 121,75                            | 0,58            | 268,06                            |
| 0,37            | 10,82                             | 0,51            | 15,63                             | 0,37            | 86,57                             | 0,49            | 301,32                            |
| 0,00            | 0,00                              | 0,35            | 11,74                             | 0,00            | 0,00                              | 0,36            | 296,44                            |
|                 |                                   | 0,00            | 0,00                              |                 |                                   | 0,00            | 0,00                              |

## Apêndice C

**Tabela C.41:** Queda de pressão no leito e desvio padrão destes pontos para cada velocidade superficial do ar;  $T = 60^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi = 0,0010$ ;  $dp = 1,850 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

| $\Gamma = 0,00$ |                                  | $\Gamma = 0,50$ |                                  | $\Gamma = 1,00$ |                                  | $\Gamma = 1,50$ |                                  |
|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|
| $U_s$<br>(m/s)  | $\Delta p$<br>( $\text{N/m}^2$ ) |
| 1,41            | 1326,01                          | 1,43            | 1378,63                          | 1,43            | 1418,40                          | 1,44            | 1390,75                          |
| 1,37            | 1300,50                          | 1,40            | 1373,16                          | 1,40            | 1411,68                          | 1,40            | 1382,08                          |
| 1,32            | 1239,51                          | 1,36            | 1360,65                          | 1,36            | 1388,64                          | 1,37            | 1332,89                          |
| 1,28            | 1215,06                          | 1,32            | 1344,49                          | 1,32            | 1387,67                          | 1,32            | 1353,79                          |
| 1,23            | 1174,50                          | 1,27            | 1339,07                          | 1,28            | 1355,94                          | 1,27            | 1267,59                          |
| 1,19            | 1124,96                          | 1,23            | 1323,66                          | 1,23            | 1353,36                          | 1,23            | 1319,12                          |
| 1,14            | 1095,94                          | 1,19            | 1312,61                          | 1,19            | 1355,81                          | 1,19            | 1317,10                          |
| 1,09            | 1030,84                          | 1,14            | 1319,51                          | 1,15            | 1390,04                          | 1,14            | 1304,80                          |
| 1,03            | 975,84                           | 1,10            | 1300,60                          | 1,10            | 1370,40                          | 1,09            | 1304,14                          |
| 0,99            | 940,37                           | 1,04            | 1269,52                          | 1,05            | 1348,35                          | 1,04            | 1305,93                          |
| 0,93            | 829,11                           | 0,98            | 1223,14                          | 0,99            | 1331,68                          | 1,00            | 1315,88                          |
| 0,86            | 771,66                           | 0,93            | 1184,81                          | 0,94            | 1187,94                          | 0,94            | 1277,87                          |
| 0,80            | 666,36                           | 0,88            | 1164,88                          | 0,88            | 1118,63                          | 0,87            | 1134,40                          |
| 0,73            | 599,16                           | 0,80            | 1107,37                          | 0,81            | 1077,90                          | 0,82            | 1007,89                          |
| 0,65            | 511,01                           | 0,71            | 1034,03                          | 0,73            | 902,54                           | 0,73            | 931,54                           |
| 0,57            | 427,60                           | 0,64            | 885,92                           | 0,65            | 794,11                           | 0,65            | 829,40                           |
| 0,46            | 310,48                           | 0,56            | 721,49                           | 0,56            | 758,29                           | 0,58            | 691,16                           |
| 0,33            | 187,87                           | 0,45            | 524,90                           | 0,46            | 591,87                           | 0,46            | 527,04                           |
| 0,00            | 0,00                             | 0,30            | 280,19                           | 0,31            | 323,72                           | 0,34            | 339,00                           |
|                 |                                  | 0,00            | 0,00                             | 0,00            | 0,00                             | 0,00            | 0,00                             |
| $U_s$<br>(m/s)  | $\delta p$<br>( $\text{N/m}^2$ ) |
| 1,41            | 43,24                            | 1,43            | 167,56                           | 1,43            | 204,04                           | 1,44            | 239,87                           |
| 1,37            | 42,99                            | 1,40            | 153,74                           | 1,40            | 192,50                           | 1,40            | 229,49                           |
| 1,32            | 37,32                            | 1,36            | 150,56                           | 1,36            | 189,48                           | 1,37            | 269,09                           |
| 1,28            | 33,69                            | 1,32            | 143,56                           | 1,32            | 169,04                           | 1,32            | 225,20                           |
| 1,23            | 31,59                            | 1,27            | 130,33                           | 1,28            | 196,62                           | 1,27            | 260,02                           |
| 1,19            | 28,84                            | 1,23            | 127,65                           | 1,23            | 168,84                           | 1,23            | 210,99                           |
| 1,14            | 27,98                            | 1,19            | 123,00                           | 1,19            | 162,70                           | 1,19            | 221,14                           |
| 1,09            | 28,21                            | 1,14            | 113,84                           | 1,15            | 158,78                           | 1,14            | 219,50                           |
| 1,03            | 23,65                            | 1,10            | 114,27                           | 1,10            | 166,09                           | 1,09            | 216,78                           |
| 0,99            | 24,23                            | 1,04            | 106,99                           | 1,05            | 164,59                           | 1,04            | 229,92                           |
| 0,93            | 21,18                            | 0,98            | 110,47                           | 0,99            | 162,77                           | 1,00            | 243,52                           |
| 0,86            | 19,08                            | 0,93            | 107,26                           | 0,94            | 157,93                           | 0,94            | 244,74                           |
| 0,80            | 17,75                            | 0,88            | 99,06                            | 0,88            | 151,33                           | 0,87            | 220,23                           |
| 0,73            | 14,01                            | 0,80            | 88,04                            | 0,81            | 159,75                           | 0,82            | 236,18                           |
| 0,65            | 13,89                            | 0,71            | 61,08                            | 0,73            | 183,20                           | 0,73            | 228,93                           |
| 0,57            | 12,17                            | 0,64            | 28,75                            | 0,65            | 179,14                           | 0,65            | 248,75                           |
| 0,46            | 10,20                            | 0,56            | 18,25                            | 0,56            | 127,72                           | 0,58            | 255,41                           |
| 0,33            | 8,21                             | 0,45            | 15,98                            | 0,46            | 103,35                           | 0,46            | 300,12                           |
| 0,00            | 0,00                             | 0,30            | 11,87                            | 0,31            | 20,85                            | 0,34            | 278,50                           |
|                 |                                  | 0,00            | 0,00                             | 0,00            | 0,00                             | 0,00            | 0,00                             |

